

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**Richtlinie
DKD-R 3-1**

**Kalibrierung von
Beschleunigungsmessgeräten
nach dem Vergleichsverfahren**

Blatt 3

Sinus- und Multisinus-Anregung

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180823D>



	Kalibrierung von Beschleunigungsmess- geräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2 / 36

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-8021

Internet: www.dkd.eu

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3 / 36

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-1 Blatt 3 Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus-Anregung, Ausgabe 00/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180823D>

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Mitglieder des Fachausschusses *Mechanische Größen* (später *Kraft und Beschleunigung*) des DKD in der Zeit von 2003 bis 2009.

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Kraft und Beschleunigung* des DKD.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	5
2	Anwendungsbereich.....	6
3	Symbole und Benennungen	6
4	Kalibrierverfahren.....	8
4.1	Grundlagen	8
4.2	Erregung mit Sinussignal	9
4.3	Erregung mit Multisinussignal.....	9
4.4	Einheitliche Betrachtung.....	11
4.5	Messwertverarbeitung	11
4.5.1	Kontinuierliche Ergebnisbildung	11
4.5.2	Ergebnisbildung durch Sinus-Approximation	11
4.5.3	Ergebnisbildung durch Sinus-Korrelation.....	12
4.5.4	Bewertung der verschiedenen Verfahren	12
5	Kalibriereinrichtungen.....	13
5.1	Schwingungserreger für die Kalibrierung.....	13
5.1.1	Aufstellung des Schwingungserregers	14
5.1.2	Quer-, Kipp- und Taumelschwingungen des Schwingteils	15
5.2	Beschleunigungsaufnehmer-Normale	15
5.3	Elektronik	16
5.4	Typische Kalibriereinrichtungen	17
5.5	Kalibrierablauf	17
5.6	Einflussfaktoren und praktische Hinweise	19
6	Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung.....	19
6.1	Vorbereitende Maßnahmen.....	19
6.1.1	Bestimmung der Kalibrierfähigkeit.....	19
6.1.2	Adaptierung der Aufnehmer	20
6.2	Spezielle Vorbereitungen	21
6.3	Ablauf der Kalibrierung.....	21
6.3.1	Globale Grundeinstellungen vornehmen	21
6.3.2	Spezielle Grundeinstellungen vornehmen	22
6.3.3	Testbeschreibung erstellen	22
6.3.4	Umgebungstemperatur.....	22
6.3.5	Kalibrierung durchführen	22
6.3.6	Kalibrierung bewerten	23
7	Wartung und Kontrolle.....	23

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5 / 36

8	Aspekte bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern	23
9	Messunsicherheitsbetrachtungen	25
9.1	Darstellung der Einflussgrößen	25
9.2	Modell	25
9.3	Abweichungsspanne W^*	27
9.4	Ermittlung der Messunsicherheit	27
9.4.1	Spezifikation von BNME, BA-Normal und Kalibriergegenstand	27
9.4.2	Messunsicherheitsanalyse (Budgettabelle, allgemein)	29
9.4.3	Messunsicherheitsbudget.....	30
9.4.4	Säulendiagramm der Einflussgrößen	31
10	Angaben im Kalibrierschein	31
11	Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium.....	32
12	Literatur	33

1 Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 3-1, Blatt 3 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 3-1, Blatt 3 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 03/2003 veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage

2 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie bezieht sich auf Kalibrierverfahren, bei denen eine sinus- oder multisinusförmige Anregung mit einem vorzugsweise elektrodynamischen Schwingungserreger erzeugt wird. Sie gilt für die Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern und für die Kalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit eigener Anzeige.

Schwingungsaufnehmer im weitesten Sinne formen eine der kinematischen Größen *Schwingbeschleunigung*, *Schwinggeschwindigkeit* oder *Schwingweg* in ein elektrisches Signal um.

Unabhängig davon, ob der Schwingungsaufnehmer ein der Schwingbeschleunigung, der Schwinggeschwindigkeit oder dem Schwingweg proportionales Signal liefert, wird in dieser Richtlinie die physikalische Größe Beschleunigung als Messgröße behandelt.

Bei sinusförmiger Anregung lassen sich die Amplitude \hat{a} und der Nullphasenwinkel φ_a der Beschleunigung a in die entsprechenden Kenngrößen der Schwinggeschwindigkeit v (Amplitude \hat{v} , Nullphasenwinkel φ_v) und des Schwingweges (Amplitude \hat{s} , Nullphasenwinkel φ_s) umrechnen:

$$\hat{v} = \frac{\hat{a}}{\omega}, \quad \varphi_v = \varphi_a - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$\hat{s} = \frac{\hat{a}}{\omega^2}, \quad \varphi_s = \varphi_a - \pi \quad (2)$$

3 Symbole und Benennungen

Für die Anwendung dieser DKD-Richtlinie gelten die in Tabelle 1 genannten Symbole. Alle kinematischen Größen sowie die Übertragungskenngrößen gelten jeweils für die Messfrequenz f_{mess} . Im Interesse einer besseren Lesbarkeit wird auf die explizite Angabe dieser Abhängigkeit verzichtet. Die kinematischen Größen a , v , s und die Übertragungskenngrößen G_s , G_x , S_s , S_x usw. werden im Allgemeinen als komplexe Größen \underline{x} beschrieben. Die komplexe Schreibweise

$$\underline{x} = x e^{j\varphi_x} \quad (3)$$

wird in der vorliegenden Richtlinie dann angewendet, wenn der Betrag x und die Phasenverschiebung φ_x von Bedeutung sind.

Symbol	Benennung
BA	Beschleunigungsaufnehmer
BN	Bezugsnormal
BNME	Bezugsnormalmesseinrichtung
BtB	Back-to-Back (Rücken-an-Rücken-Ankopplung)
CCLD	Constant Current Line Drive (Konstant-Gleichstrom-Speisung)
KG	Kalibriergegenstand
SE	Single Ended (einseitige Ankopplung)
$\tilde{a}_{z,S}$	Beschleunigungseffektivwert ¹ , der bei der Frequenz f_{mess} auf das BA-Normal wirkt
$\tilde{a}_{z,X}$	Beschleunigungseffektivwert, der bei der Frequenz f_{mess} auf den Kalibriergegenstand wirkt
C_{SM}	Schwerpunkt der seismischen Masse (Centre of seismic mass)
f_{res}	Resonanzfrequenz eines Beschleunigungsaufnehmers (im montierten Zustand)
G_S	Übertragungskoeffizient des Verstärkers (Normal) bei der Frequenz f_{mess}
G_X	Übertragungskoeffizient des Verstärkers (KG) bei der Frequenz f_{mess}
H_{SH}	Übertragungsfunktion von Leistungsverstärker und Schwingungserreger in (m/s ²)/V bei der Frequenz f_{mess}
\tilde{q}_S	Ladungseffektivwert eines Beschleunigungsaufnehmers (Normal) bei der Frequenz f_{mess}
\tilde{q}_X	Ladungseffektivwert eines Beschleunigungsaufnehmers (KG) bei der Frequenz f_{mess}
$S_{ua,X}$	Übertragungskoeffizient der Messkette (KG) bei der Frequenz f_{mess}
S_S	Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmers (Normal) bei der Frequenz f_{mess}
S_X	Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmers (KG) bei der Frequenz f_{mess}
$u_S(m)$	A/D- umgesetzter m -ter Probenwert der Ausgangsspannung des Verstärkers (Normal) bei der Frequenz f_{mess}
$u_X(m)$	A/D- umgesetzter m -ter Probenwert der Ausgangsspannung des Verstärkers (KG) bei der Frequenz f_{mess}
\tilde{u}_S	Spannungseffektivwert am Ausgang des Verstärkers (Normal) bei der Frequenz f_{mess}
\tilde{u}_X	Spannungseffektivwert am Ausgang des Verstärkers (KG) bei der Frequenz f_{mess}
φ_{ua}	Phasenverschiebewinkel zwischen Ausgangssignal des BA und anregender Beschleunigung

¹ Wegen der alternativ möglichen Anregung mit einem Multisinus-Signal wird mit Effektivwerten gerechnet, da sich daraus der Effektivwert des Gesamtsignals errechnen lässt.

Tabelle 1: Symbole und Benennungen (Die im Abschnitt 9 „Messunsicherheitsbetrachtungen“ verwendeten Symbole werden dort extra aufgeführt.)

4 Kalibrierverfahren

4.1 Grundlagen

Wie in Abschnitt 2 erläutert, bezieht sich diese Richtlinie auf Kalibrierverfahren, bei denen eine sinus- oder multisinusförmige Anregung mit einem vorzugsweise elektrodynamischen Schwingungserreger erzeugt wird. Sie gilt für die Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern ohne oder mit Signalkonditionierer (Anpasser) sowie für die Kalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit eigener Anzeige.

Die Unterschiede der Verfahren liegen

- im Kalibriergegenstand (Typ, Masse)
- in der Art der Anregung [Sinus (Abschnitt 4.2) oder Multisinus (Abschnitt 4.3)]
- in der Art der Messwertgewinnung und -verarbeitung
 - Frequenzselektive Verfahren wie z.B.
 - digitale Filterung und Effektivwertbildung (Abschnitt 4.5.1)
 - Sinus-Approximation (Abschnitt 4.5.2)
 - Sinus-Korrelation (Abschnitt 4.5.3)
 - Fourier-Transformation
 - Breitbandige Verfahren wie Echt-Effektivwertmessung
 Anmerkung: Breitbandige Verfahren setzen eine verzerrungsarme Anregung und einen ausreichend hohen Signal/Rausch-Abstand voraus
- im geforderten Frequenzbereich in Kombination mit der Masse (Abschnitt 5.4)
- im Kalibrierablauf (Abschnitt 5.5)
- in der Montage von BA-Normal und Kalibriergegenstand zueinander (z.B. Rücken-an-Rücken-Ankopplung oder Befestigung des Kalibriergegenstandes auf dem Schwingteil des Schwingungserregers unter Nutzung eines im Erreger eingebauten BA-Normals)
- in der Automatisierbarkeit bzw. dem benötigten Zeitaufwand für eine Kalibrierung

Das Blockschaltbild einer Kalibriereinrichtung zur Kalibrierung von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern unter Verwendung eines piezoelektrischen BA-Normals in Rücken-an-Rücken-Ankopplung zeigt Bild 1.

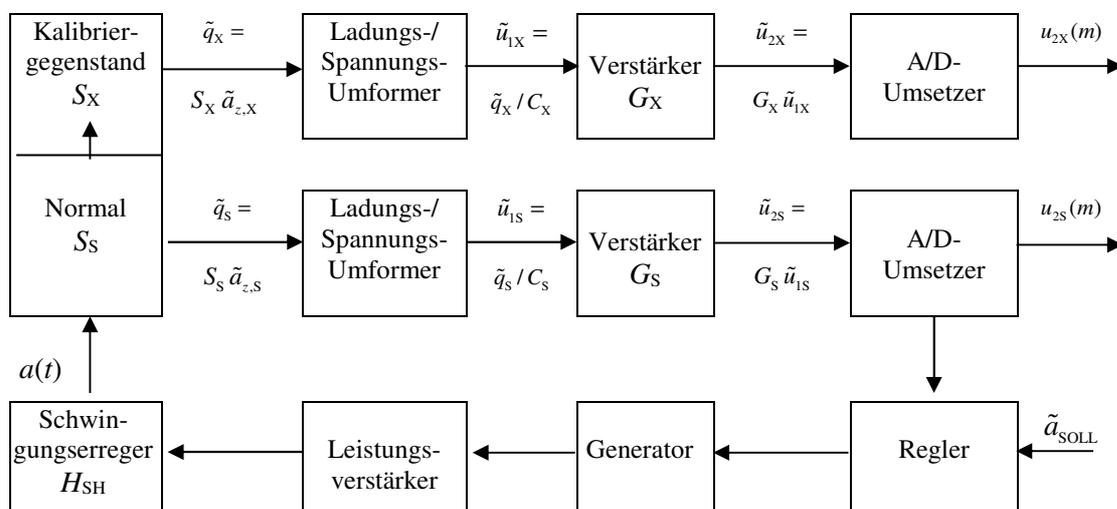


Bild 1: Blockschaltbild einer Kalibriereinrichtung

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9 / 36

Sofern einer der beteiligten Beschleunigungsaufnehmer nach einem anderen Messprinzip arbeitet, muss in Bild 1 anstelle eines Ladungsverstärkers ein der Aufnehmerbauart entsprechender Anpasser eingesetzt werden.

Der prinzipielle Aufbau ist unabhängig davon, ob als Anregungssignal ein Sinus- oder ein Multisinussignal benutzt wird. Die Unterschiede liegen allein in der Verarbeitung, wie in den Folgeabschnitten erläutert wird.

4.2 Erregung mit Sinussignal

Ein elektrodynamischer Schwingungserreger wandelt im Idealfall einen sinusförmig verlaufenden Strom $i(t)$ in eine sinusförmige Beschleunigung

$$a(t) = \hat{a} \sin(2\pi f_{\text{mess}} t) \quad (4)$$

um, die in gleicher Weise auf BA-Normal und Kalibriergegenstand einwirkt. Bei tiefen Frequenzen weicht jedoch die Signalform je nach Bauart des Schwingungserregers mehr oder weniger von der Sinusform ab. Durch Vorverzerrung des Treibersignals lässt sich eine Beschleunigung mit sinusförmiger Zeitabhängigkeit erreichen. Das vom BA-Normal erzeugte Signal wird ggf. in eine Spannung umgeformt, verstärkt und einem Analog-Digital-Umsetzer zugeführt, der daraus unter Beachtung des Abtasttheorems eine Folge von Abtast- oder Probenwerten $u_{2S}(mT_a) = u_{2S}(m)$ erzeugt. Aus diesen Probenwerten wird in geeigneter Weise (s. Abschnitt 4.5) der Effektivwert $\tilde{a}_{z,S,\text{ist}}$ des Beschleunigungssignals $a(t)$ errechnet und einem digitalen Regler zugeführt. Dieser vergleicht den Istwert (Reglereingangsgröße) mit einem vorgegebenen Sollwert (Führungsgröße) und berechnet daraus nach einem gängigen Regelalgorithmus eine Stellgröße, welche die Spannung des Signalgenerators solange verändert, bis Istwert und Sollwert bis auf eine vorgegebene maximal zulässige Regelabweichung (z.B. 1 %) übereinstimmen.

Sobald dieser Zustand erreicht ist, wird im zweiten, dem Kalibriergegenstand zugeordneten Kanal, in gleicher Weise eine Folge von Probenwerten $u_{2X}(mT_a) = u_{2X}(m)$ erzeugt. Unter Einbeziehung der Übertragungskoeffizienten beider Verstärkerkanäle und des bekannten Übertragungskoeffizienten des BA-Normals (alle Werte für die Frequenz f_{mess}) wird daraus in geeigneter Weise der Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes berechnet.

4.3 Erregung mit Multisinussignal

Im Gegensatz zu Gl. (4) erzeugt in diesem Fall der Schwingungserreger das Signalgemisch

$$a(t) = \sum_{k=1}^M (\hat{a}_k \sin(k2\pi f_0 t + \varphi_k)) \quad (5)$$

Darin sind:

- f_0 eine beliebige untere Bezugsfrequenz (z. B. 0,1 Hz), die nicht zwangsläufig im Signalgemisch enthalten sein muss
- \hat{a}_k der Beschleunigungsspitzenwert (Amplitude) bei der k -fachen Bezugsfrequenz, wobei dieser Wert auch gleich Null sein kann
- k ein Laufindex von 1 bis M (z. B. von 1 bis 2000)
- φ_k ein Phasenverschiebungswinkel (durch Zufallsgenerator erzeugt)

Weiterhin wird mit N die Anzahl der von Null verschiedenen Beschleunigungsspitzenwerte bezeichnet. Für die Gesamtheit aller Amplitudenwerte $\hat{a}_k > 0$, normiert auf den größten vorkommenden Wert, ist die Bezeichnung *Beschleunigungsprofil* eingeführt.

Beispiel:

Zu erzeugen sei ein Gemisch mit den Frequenzen der Terzreihe 125 Hz / 160 Hz / 200 Hz / 250 Hz / 315 Hz / 400 Hz / 500 Hz / 630 Hz / 800 Hz / 1000 Hz und konstanter Beschleunigung bei allen Frequenzen.

Wählt man als Bezugsfrequenz $f_0 = 5$ Hz und setzt man alle Amplituden Null außer für $k = 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 126, 160$ und 200 , so erhält man die gewünschten Frequenzen. Die Spannungsamplituden der einzelnen Komponenten errechnen sich aus der auf (zum Beispiel) 160 Hz normierten inversen Übertragungsfunktion $H_{SH}(kf_0)$ von Leistungsverstärker und Schwingungserreger. Die zufälligen Phasenverschiebungswinkel φ_k werden solange verändert, bis sich ein Scheitelfaktor im Bereich 3 bis 4 ergibt.

Auch hier wird zunächst das vom Normal erzeugte Signal ggf. in eine Spannung umgeformt, verstärkt und einem Analog-Digital-Umsetzer zugeführt, der daraus unter Beachtung des Abtasttheorems eine Folge von Abtast- oder Probenwerten $u_{2S}(mT_a) = u_{2S}(m)$ erzeugt. Diese Probenwerte passieren eine Bank mit N parallelen Schmalbandfiltern, deren Mittenfrequenzen den Frequenzen des Signalgemisches (5) entsprechen. Die an den Ausgängen der Filter gebildeten Effektivwerte werden N parallelen digitalen Reglern zugeführt. Ist die relative Abweichung zwischen $\tilde{a}_{z,S,ist}(k)$ und $\tilde{a}_{z,S,soll}(k)$ größer als eine vorgegebene maximal zulässige Regelabweichung und ist sie für alle Werte k gleich, so wird die Gesamtamplitude korrigiert. Stimmt jedoch außerdem das Beschleunigungsprofil nicht mit dem Sollprofil überein, so wird auch korrigierend auf die einzelnen Komponenten zugegriffen, wobei in der Regel der Vektor der Zufallsphasen unverändert bleibt.

Sobald das Beschleunigungsprofil und der Effektivwert des Signals (5) innerhalb vorgegebener Grenzen liegen, wird im zweiten, dem Kalibriergegenstand zugeordneten Kanal eine Folge von Probenwerten $u_{2X}(mT_a) = u_{2X}(m)$ erzeugt und einer Filterbank zugeführt, die mit der des ersten Kanals identisch ist. Aus den Ausgangssignalen der Filterbank werden auch hier N Effektivwerte errechnet. Damit steht am Ausgang jedes Kanals je ein Vektor mit N Effektivwerten zur Verfügung.

Stellt man die Übertragungskoeffizienten beider Verstärkerkanäle und den Übertragungskoeffizienten des BA-Normals gleichfalls als Vektoren mit N Elementen dar, so kann daraus der Übertragungskoeffizienten-Vektor des Kalibriergegenstandes berechnet werden.

Letztlich empfiehlt es sich, die verwendeten Frequenzen ebenfalls als einen Vektor mit den Elementen 1 bis N darzustellen.

Für das oben beschriebene Beispiel erhält man:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	25	32	40	50	63	80	100	126	160	200
f_k / Hz	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000

Tabelle 2: Beispiel für ein Multisinussignal

Damit lässt sich der Vektor der einzelnen Frequenzen mit n indizieren und beispielsweise ist mit $S_5(5)$ der Übertragungskoeffizient des BA-Normals bei der Frequenz $f = 315$ Hz bezeichnet.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11 / 36

4.4 Einheitliche Betrachtung

Formal gesehen ist die Kalibrierung mit einem Sinussignal ein Sonderfall der Multisinus-Kalibrierung mit $N = 1$. Unter Einbeziehung des Frequenzvektors kann man das Ergebnis somit darstellen als

$$S_X(n) = S_S(n) \frac{G_S(n) \tilde{u}_X(n)}{G_X(n) \tilde{u}_S(n)} = S_S(n) G(n) R(n) \quad \text{mit } n=1, \dots, N \quad (6)$$

Diese Beziehung gilt für den Betrag des Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes. Ist auch der Phasenverschiebungswinkel zu messen, dann ist Gl.6 komplex zu schreiben, und zwar in der Form

$$\underline{S}_X(n) = \underline{S}_S(n) \frac{\underline{G}_S(n) \underline{\tilde{u}}_X(n)}{\underline{G}_X(n) \underline{\tilde{u}}_S(n)} = \underline{S}_S(n) \underline{G}(n) \underline{R}(n) \quad \text{mit } n=1, \dots, N \quad (7)$$

Wählt man für die bei einer Kalibrierung mit (Einzel-) Sinus-Anregung nacheinander einzustellenden Frequenzen denselben Frequenzvektor $f(n)$ wie bei einer Kalibrierung mit Multisinus-Anregung, dann müssen die seriell gewonnenen Ergebnisse $S_X(n)$ den Vektor gemäß Gl. (6) ergeben. Dies bedeutet jedoch, dass die Kalibrierung mit Multisinus-Erregung rückführbar ist auf eine serielle Kalibrierung mit Sinus-Erregung und damit auch rückführbar auf das nationale Normal.

Die Validierung von Verfahren, die auf der Fourier-Transformation beruhen (DFT und FFT), ist nicht Gegenstand der vorliegenden Richtlinie.

4.5 Messwertverarbeitung

4.5.1 Kontinuierliche Ergebnisbildung

Die in jedem Kanal gewonnenen Probenwerte werden vorzugsweise zunächst einem Digitalfilter zugeführt. Dies ist in der Regel ein Bandpass höherer Ordnung, jedoch ist bei sehr tiefen Frequenzen auch ein Tiefpass möglich, um kürzere Einschwingzeiten zu erzielen. Durch die Filterung wird das Signal von unerwünschten Störsignalen befreit. Auf das Filter kann verzichtet werden, wenn der Abstand von Nutz- zu Störsignal hinreichend groß ist.

Die Folge der gefilterten Probenwerte wird anschließend zum Effektivwert verarbeitet. Dazu werden die Probenwerte quadriert und durch ein sogenanntes RMS-Filter (Echt-Effektivwertbildner) bewertet. Dieses Filter besteht in der Regel aus einem Tiefpass und weiteren Filterelementen zur Unterdrückung störender Signalanteile.

Bei diesem Verfahren wird jeder vom A/D-Umsetzer gelieferte Probenwert den dargestellten Verarbeitungsschritten unterworfen. Die Verarbeitung erfolgt kontinuierlich (in Echtzeit). Je nach Einstellung des Tiefpasses und der daraus resultierenden Einschwingzeit bildet der errechnete Effektivwert den zeitlich 1 bis 3 Perioden der Messfrequenz zurückliegenden Wert ab.

4.5.2 Ergebnisbildung durch Sinus-Approximation

Bei diesem Verfahren wird zunächst in beiden Kanälen taktsynchron je ein größerer Block von Probenwerten $u_S(mT_a)$ und $u_X(mT_a)$ gewonnen und im Speicher abgelegt. Zu jeder der beiden Folgen wird eine Sinusfunktion $y(m)$ derart synthetisiert, dass die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen der realen Wertefolge $u(m)$ und der Sinusfunktion $y(m)$ ein Minimum erreicht. Ist dieser Zustand erreicht, dann ist $y(m)$ das bestmögliche Abbild der Signalfunktion im jeweiligen Kanal. Man erhält also die beiden Lösungsfunktionen

$$y_s(m) = y_{s0} + \hat{y}_s \sin(2\pi f_{\text{mess}} T_a m + \varphi_s) \quad (8)$$

$$y_x(m) = y_{x0} + \hat{y}_x \sin(2\pi f_{\text{mess}} T_a m + \varphi_x) \quad (9)$$

Darin sind

y_{s0}, y_{x0} unvermeidbare, aber für das Ergebnis nicht relevante Offsetspannungen

\hat{y}_s, \hat{y}_x die Spitzenwerte beider Signalspannungen

T_a die Abtastperiode (Probenabstand)

φ_s, φ_x die Nullphasenwinkel beider Signale

In der komplexen Darstellung Gl. (7) kann man damit das Verhältnis der Spannungseffektivwerte ersetzen durch den Ausdruck

$$\frac{\underline{u}_x}{\underline{u}_s} = \underline{R} = \frac{\hat{y}_x}{\hat{y}_s} e^{j(\varphi_x - \varphi_s)} \quad (10)$$

Stehen in Gl. (7) der Quotient $G = G_s / G_x$ der Verstärkungsfaktoren und der Übertragungskoeffizient S_s des BA-Normals ebenfalls komplex zur Verfügung, dann lässt sich mit Gl. (7) der komplexe Übertragungskoeffizient des zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmers ohne oder mit Signalkonditionierer bestimmen. Die Sinus-Approximation ist, takt synchrone Abtastung vorausgesetzt, ein geeignetes Mittel zur Messung des komplexen Übertragungskoeffizienten.

Da die Blockgröße der Probensätze so zu wählen ist, dass mindestens 2 Perioden der aktuellen Frequenz f_{mess} darin enthalten sind, bildet das Ergebnis bei tiefen Frequenzen wie bei der ersten Methode den zeitlich 1 bis 3 Perioden der Messfrequenz zurückliegenden Wert ab. Bei mittleren und hohen Frequenzen muss jedoch im Interesse einer niedrigen Approximationsunsicherheit auf eine Mindestblockgröße B_0 (z.B. 512 oder 1024 Probenwerte) übergegangen werden, da sich die Abtastfrequenz nicht beliebig erhöhen lässt. Damit wird ein Messwert abgebildet, der um die konstante Zeit $B_0 T_a$ zurückliegt (z. B. 4 ms). Die Verarbeitung kann ebenfalls in Echtzeit erfolgen.

4.5.3 Ergebnisbildung durch Sinus-Korrelation

Bei der Sinus-Korrelation wird das klassische Fourier-Integral

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\omega}^{\omega} f(t) \cos(\omega t) dt - j \int_{-\omega}^{\omega} f(t) \sin(\omega t) dt$$

durch eine spezielle Hardware realisiert, die einen Sinus-Kosinus-Generator, zwei Multiplikatoren und zwei Integratoren enthält. Im Gegensatz zum Fourier-Integral wird hierbei nur eine einzige frei wählbare Frequenz $\omega = \omega_{\text{mess}} = 2\pi f_{\text{mess}}$ betrachtet und die Integration wird auf endlich viele Perioden dieser Frequenz f_{mess} beschränkt. Damit unterscheidet sich dieses Verfahren grundsätzlich von der FFT, bei der die möglichen Frequenzlinien allein durch Abtastfrequenz und Blocklänge bestimmt sind. Die beiden Methoden Sinus-Korrelation und Sinus-Approximation sind adäquat.

4.5.4 Bewertung der verschiedenen Verfahren

Prinzipiell ist die Sinus-Approximation auch bei Multisinus-Anregung einsetzbar, indem an den Ausgängen der N Schmalbandfilter N Blöcke von Probenwerten gebildet und der Sinus-Approximation unterworfen werden. Die Kosten für ihre Realisierung stehen zur Zeit aber in

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	13 / 36

keinem günstigen Verhältnis zum Zeitgewinn einer Multisinus-Kalibrierung. Unter diesem Aspekt wird empfohlen, die Multisinus-Anregung in Kombination mit der klassischen Effektivwertbildung (Abschnitt 4.5.1) dann zu nutzen, wenn eine reine Betragskalibrierung gefordert ist, während die Einzelsinus-Anregung in Kombination mit der Sinus-Approximation (Abschnitt 4.5.2) oder Sinus-Korrelation (Abschnitt 4.5.3) dann zu bevorzugen ist, wenn auch der Phasenverschiebungswinkel des komplexen Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes von Interesse ist.

Eine Einzelsinus-Anregung in Kombination mit digitaler Filterung und klassischer Effektivwertbildung (Abschnitt 4.5.1) wird dann empfohlen, wenn eine maximale Störsignalunterdrückung gefordert ist, da die Selektionswirkungen von Sinus-Approximation und Sinus-Korrelation gering sind, wenn das Störsignal in der Nähe der Nutzfrequenz liegt.

5 Kalibriereinrichtungen

5.1 Schwingungserreger für die Kalibrierung

Für die Erzeugung einer Sinus- oder Multisinusschwingung kommen hauptsächlich elektrodynamische Schwingungserreger in Betracht, bei denen sich eine mit dem Schwingteil verbundene (meist zylindrische) Spule in einem Magnetfeld bewegt. Die axiale Führung dieses Systems erfolgt mit Luftlagern oder durch Membranfedern. Es gibt keinen Schwingungserreger, der für alle Frequenzen und KG-Massen gleich gut geeignet ist. Die Membranfedern begrenzen den Frequenzbereich nach unten, während die obere Frequenzgrenze durch die Eigenresonanz der bewegten Gesamtmasse (Schwingteil, Spule, Aufnehmer) bestimmt wird. Unter den vielen Schwingungserreger-Typen, die vorwiegend für Schwingungsprüfungen entwickelt wurden, haben sich nur wenige Typen für Kalibrierzwecke mit folgenden Merkmalen durchgesetzt:

- Quer- und Taumelschwingungen möglichst gering
- Magnetfeld an der Ankopplungsfläche des Schwingteils möglichst gering
- Masse des Schwingteils möglichst klein
- Betrieb des Schwingungserregers möglichst ohne Kühlung
- wahlweise vertikale oder horizontale Schwingungsrichtung (bauformabhängig)

Die nachfolgende Tabelle gibt beispielhaft eine Übersicht.

Bezeichnung	Lagerung / max. Hub ^{*)} / max. Kraftvektor ^{*)}	Frequenz- bereich ^{**)} in Hz	Maximale Last (KG) ^{***)} in g	Normal
Elektrodynamischer Erreger (Typ A)	Membran 12,7 mm 112 N	2 bis 5 000	250	BtB
Elektrodynamischer Erreger (Typ B)	Membran 8 mm 45 N	10 bis 10 000	50	BtB
Elektrodynamischer Erreger (Typ B)	Membran 8 mm 45 N	10 bis 2 000	250	BtB
Elektrodynamischer Erreger (Typ C)	Luft 10 mm 32 N	2 bis 20 000	200	BA-Normal im Schwingteil integriert
Langhuberreger ohne Gleittisch (Typ D)	Luft 155 mm 45 N	0,4 bis 160	800 / 1 000 (horizontal oder vertikal)	BtB oder SE
Langhuberreger mit Gleittisch (Typ E)	Luft 155 mm 45 N	0,4 bis 160	2 000 (nur horizontal)	BtB oder SE

Tabelle 3: Beispiele von Schwingungserregern für Kalibrierzwecke

- *) die angegebenen Maximalwerte für Hub (Schwingweg-Doppelamplitude) und Kraftvektor (Kraft-Amplitude) können bei Kalibriervorgängen nicht ausgeschöpft werden (starke Signalverzerrungen)
- **) bei den genannten unteren Frequenzgrenzen treten im Allgemeinen hohe Klirrfaktoren auf, die sich mit vorverzerrten Treibersignalen erheblich verringern lassen (siehe Abschnitt 4.2).
- ***) bei Nutzung der Maximallast werden die oberen Frequenzgrenzen herabgesetzt

Bei Rücken-an-Rücken-Ankopplung wird die maximale Belastung durch den Kalibriergegenstand nur durch die verwendeten BA-Normale begrenzt (siehe Tabelle 4).

5.1.1 Aufstellung des Schwingungserregers

Damit die das Schwingteil des Schwingungserregers antreibende Kraft vollständig für die Anregungsbeschleunigung des Kalibriergegenstandes verfügbar ist, muss eine theoretisch unendlich große statische Gegenkraft aufgebracht werden. Dies gelingt näherungsweise, indem man den Schwingungserreger mit einem großen Masseblock fest verbindet (z.B. Beton). Da die Summe aller bewegten Massen durchaus 1 kg erreichen kann, die Basismasse nicht weniger als das 2 000-fache der bewegten Masse betragen sollte, erhält man hierfür eine Mindestmasse von 2 000 kg. Benutzt man Beton mit einer Dichte von 2,6 t/m³, so ergibt das ein Mindestvolumen von etwa 0,8 m³. Der Betonblock sollte nach Möglichkeit im Erd- oder Kellergeschoß mit einer Dämmschicht auf gewachsenem Boden aufgebracht und gegen die Umgebung isoliert werden. Eine Aufstellung auf einer Gebäudedecke führt nur dann zu einem störungsfreien Ablauf, wenn durch eine

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	15 / 36

schwingungsisolierende Lagerung einer schweren Masse eine tiefe Eigenfrequenz des Systems realisiert werden kann. Durch diese Lagerung wird ein Einfluss von Gebäude-Schwingungen und anderen Störungen mit einer Frequenz oberhalb dieser System-Eigenfrequenz reduziert bzw. vermieden. Dabei kann sich die für die Kalibrierung nutzbare untere Frequenzgrenze erhöhen.

5.1.2 Quer-, Kipp- und Taumelschwingungen des Schwingteils

Es gibt keinen Schwingungserreger, dessen Schwingteil sich ausschließlich in axialer Richtung (z -Richtung) bewegt. Je nach konstruktiver Ausführung des Schwingungserregers entstehen frequenz- und belastungsabhängig Kipp- und/oder Taumelbewegungen des Schwingteils, die transversal (x -, y -Richtung) zur nominellen Schwingungsrichtung Querkomponenten der Beschleunigung erzeugen. Durch die Querrichtungsempfindlichkeit von BA-Normal und Kalibriergegenstand werden über die an den Positionen ihrer seismischen Zentren C_{SM} wirksamen Querschwingungen parasitäre Signalkomponenten generiert. Diese Störeinflüsse sind bei membrangeführten Erregern besonders ausgeprägt. Bei diesen Frequenzen kann nicht oder nur mit erhöhter Messunsicherheit kalibriert werden. Luftgelagerte Schwingungserreger zeigen dieses Verhalten in weit geringerem Maße.

5.2 Beschleunigungsaufnehmer-Normale

Unter den auf dem Markt angebotenen Beschleunigungsaufnehmern gibt es nur einige wenige Typen, die auf Grund ihrer Langzeitstabilität, des nutzbaren Frequenzbereiches, der Linearität und anderer Parameter als Normale geeignet sind. Als BA-Normale haben sich je nach Verwendungszweck zwei verschiedene Bauformen durchgesetzt:

- BtB-Ausführung (Back-to-Back-Ankopplung bzw. Rücken-an-Rücken-Ankopplung)
- SE-Ausführung (Single-Ended-Ankopplung bzw. einseitige Ankopplung)

Bei der BtB-Ausführung wird eine Koppelfläche mit dem Schwingteil des Schwingungserregers, die andere mit dem Kalibriergegenstand verschraubt; sie wird vorzugsweise als BA-Normal in der BNME eingesetzt.

Die SE-Ausführung hat nur eine Koppelfläche und wird vorzugsweise zum Kalibrieren eines zur BNME gehörenden BA-Normals oder direkt als BA-Normal in der BNME eingesetzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt beispielhaft eine Übersicht der als Normal geeigneten Beschleunigungsaufnehmer an.

Bezeichnung	Konstruktion	Frequenzbereich in Hz	Übertr.-Koeffizient in pC/(m/s ²) bzw. in mV/(m/s ²)	Masse in g	Max. Last (KG) in g
Quarz Kompressionstyp (Typ I)	BtB	10 bis 5 000 **)	0,13	45	50
Quarz Kompressionstyp (Typ II)	SE *)	10 bis 5 000 **)	0,13	30	-
Piezoelektrische Keramik Kompressionstyp (Typ III)	BtB	10 bis 20 000	0,22	40	50
Piezoelektrische Keramik Kompressionstyp (Typ IV)	SE *)	10 bis 20 000	0,22	20	-
Piezoelektrischer Quarzkristall (CCLD) (Typ V)	BtB	0,4 bis 5 000	10	180	250
Piezoelektrischer Quarzkristall (CCLD) (Typ VI)	BtB	10 bis 10 000	1	80	100
Quarzkristall Schertyp (CCLD) (Typ VII)	SE *)	10 bis >20 000	0,22	20	-
Servo-BA (Typ VIII)	SE *)	0 bis 100	skalierbar	50	-

Tabelle 4: Beispiele von Beschleunigungsaufnehmer-Normalen

*) auch in das Schwingteil des Schwingungserregers integrierbar

**) mit eingeschränkten Eigenschaften auch für $f > 5\,000$ Hz nutzbar

Bei piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern ohne integrierten Ladungsumformer muss ein geeignetes rauscharmes Kabel eingesetzt werden.

5.3 Elektronik

Jeder der beiden Messkanäle (s. Bild 1) besteht aus einem dem Sensorfunktionsprinzip adäquaten Anpasser, einem Hochpass, einem Verstärker, einem Anti-Aliasing-Tiefpass und

einem A/D-Umsetzer, wobei die Eigenschaften dieser Komponenten (untere und obere Grenzfrequenz, Verstärkungskoeffizient, Taktfrequenz) variiert und somit an die Kalibrierung angepasst werden können (Parametrierung). Infolge der unvermeidbaren Bauelemente-Toleranzen weichen die tatsächlichen komplexen Übertragungskoeffizienten, sowie die Frequenz- und Phasengänge für jede der möglichen Verstärkungseinstellungen von den erwarteten Idealwerten ab. Sind diese Abweichungen zwischen den Soll- und Istwerten als Funktion der Frequenz bekannt, so kann das Messergebnis korrigiert werden, andernfalls ist das Messergebnis mit einer hohen Messunsicherheit belastet.

5.4 Typische Kalibriereinrichtungen

Wie aus Tabelle 3 und Tabelle 4 zu ersehen ist, sind Schwingungserreger und verfügbare BA-Normale immer nur für bestimmte Bereiche von Frequenz und Masse des Kalibriergegenstandes einsetzbar. Deshalb ist es üblich, typische Bezugsnormal-Messeinrichtungen (BNME) zu definieren. Einige Beispiele seien nachfolgend genannt:

Bezeichnung	max. Masse des KG in g	Schwingungs- erreger gemäß Tabelle 3	BA-Normal gemäß Tabelle 4
Beschleunigungs-BNME 10 Hz bis 20 kHz	50	Typ C	Typ VII
Beschleunigungs-BNME 10 Hz bis 10 kHz	50	Typ B	Typ III
Beschleunigungs-BNME 2 Hz bis 5 kHz	250	Typ A	Typ V
Beschleunigungs-BNME 0,4 Hz bis 160 Hz	800	Typ D oder E	Typ V oder VI

Tabelle 5: Beispiele für Bezugsnormal-Messeinrichtungen (BNME)

Zur Definition von Bezugs- und Gebrauchsnormalen s. DAkkS-DKD-4. Verbreitet werden – abgeleitet aus dem Arbeitsfrequenzbereich – auch folgende Bezeichnungen in der Schwingungsmess- und Kalibriertechnik verwendet:

HF-Bereich: Kalibrierungen im Frequenzbereich 10 kHz bis mindestens 20 kHz

MF-Bereich: Kalibrierungen im Frequenzbereich 10 Hz bis 10 kHz

TF-Bereich: Kalibrierungen im Frequenzbereich unterhalb 10 Hz

5.5 Kalibrierablauf

Der typische Ablauf einer Kalibrierung besteht darin, zunächst den Übertragungskoeffizienten bei einer **Bezugsfrequenz** und anschließend bei N weiteren Frequenzen zu bestimmen. Dabei ist es üblich, die Frequenzen der Terzreihe gemäß DIN EN ISO 266 zu verwenden. Als Bezugsfrequenzen sind nach ISO 16063-21, s. [3] $f = 160 \text{ Hz}$, 80 Hz , 40 Hz , 16 Hz und 8 Hz oder $\omega = 1\,000 \text{ s}^{-1}$, 500 s^{-1} , 250 s^{-1} , 100 s^{-1} , 50 s^{-1} zu wählen (in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet des Kalibriergegenstandes). In Ländern mit einer Netzfrequenz von 50 Hz sollten diese und die doppelte Netzfrequenz von 100 Hz als Bezugsfrequenz vermieden werden.

Erfahrungen in akkreditierten Kalibrierlaboratorien haben gezeigt, dass sich ein schleichender Verschleiß oder ein möglicher Funktionsausfall bei Aufnehmern insbesondere bei höheren Frequenzen durch Abweichungen von der Monotonie oder durch starke Abweichung vom Ergebnis der vorangegangenen Kalibrierung ankündigen. Deshalb ist von

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	18 / 36

einer Kalibrierung bei nur wenigen Frequenzen abzuraten. Es wird empfohlen, im bei der Anwendung des Kalibriergegenstands genutzten Frequenzbereich bei der Bezugsfrequenz und einer ausreichenden Anzahl Frequenzpunkten – vorzugsweise im Terzabstand gemäß ISO 16063-21, s. [3] – zu kalibrieren.

Die Empfehlung einer ausreichenden Anzahl von Messpunkten im genutzten Anwendungsbereich des Kalibriergegenstandes gilt auch für die Bestimmung der Amplitudenabhängigkeit (Linearität) bei einer festen Frequenz. Sieht man von der Linearitätsmessung ab, so sollten die Messungen bei den genannten N Frequenzen mit einer konstanten Beschleunigungsamplitude bzw. einem konstanten Beschleunigungs-Effektivwert von (1, 2, 5, 10, 20, 50 oder 100) m/s^2 erfolgen, wobei sich die Wahl nach den Eigenschaften des Kalibriergegenstandes und seinem Einsatzgebiet richtet. Generell gilt: je kleiner der Betrag des Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes ist, desto größer sollte die anregende Beschleunigung sein und umgekehrt. Insbesondere ist bei Kalibriergegenständen mit großem Übertragungskoeffizienten (z.B. 0,1 $\text{V}/(\text{m/s}^2)$) und interner Elektronik (CCLD-Typen) die anregende Beschleunigung so zu wählen, dass die sich einstellende Versorgungsspannung (10 V bis 15 V) nicht überschritten wird.

Wird für die anregende Beschleunigung ein großer Wert gewählt (z.B. 100 m/s^2), so ist zu beachten, dass dieser Wert bei tiefen Frequenzen den maximal nutzbaren Schwingweg des Schwingungserregers nicht überschreitet (z.B. Doppelamplitude 6 mm für Schwingungserreger Typ B, 10 mm für Schwingungserreger Typ A und Typ C). Bei einigen Kalibriersystemen wird dies automatisch berücksichtigt.

Die nacheinander oder parallel auszuwählenden Frequenzen und die zugehörigen Beschleunigungswerte (alternativ Geschwindigkeit oder Weg) werden üblicherweise in einer Steuertabelle aufgelistet.

Ein typisches Kalibriersystem arbeitet diese Steuertabelle ab und generiert für jede Frequenz eine Ergebniszeile mit folgenden Spalten:

- Frequenz in Hz
- anregende Schwingungsamplitude (a , v oder s als Effektivwert oder Amplitude in metrischen Einheiten, a auch in g_n , wobei gilt $1 g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$)
- Betrag des Übertragungskoeffizienten, Einheiten abhängig vom KG

Darüber hinaus können folgende Kenngrößen ermittelt und ausgegeben werden:

- Phasenverschiebungswinkel des Übertragungskoeffizienten (optional und nur bei Einzelanregung)
- relative Standardabweichung der anregenden Amplitude
- relative Standardabweichung des Betrages des Übertragungskoeffizienten
- absolute Standardabweichung des Phasenverschiebungswinkels des Übertragungskoeffizienten
- Frequenzgang des Betrages des Übertragungskoeffizienten, bezogen auf die vorgegebene Bezugsfrequenz (wahlweise in % oder dB)
- Klirrfaktor in beiden Kanälen (optional und nur bei Einzelanregung)

Bei der Einzelsinus-Anregung werden diese N Zeilen zeitlich aufeinanderfolgend erzeugt. Bei Multisinus-Anregung erfolgt der Vorgang zeitlich parallel, das Ergebnis ist das gleiche.

Die sich daran anschließende oder bereits während der Messung aufbauende grafische Darstellung der Frequenzgänge ist in beiden Fällen identisch. Wahlweise werden in einer S - f -

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	19 / 36

Ebene die Punkte $S(f)/S(f_{\text{BEZUG}})$ durch Geraden miteinander verbunden oder es erfolgt nach Abschluss der Kalibrierung eine Polynom-Approximation.

Zweckmäßig ist die zeitlich schritthaltende Anzeige der Standardabweichungen für anregende Beschleunigung und Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes, da sie wertvolle Aussagen zur Qualität des Systems und des Kalibriergegenstandes liefert.

5.6 Einflussfaktoren und praktische Hinweise

Auch wenn man davon ausgehen kann, dass das benutzte Kalibriersystem bei seiner Fertigstellung ausgiebig getestet worden ist und ein (vermeintlich) kalibrierfähiger Kalibriergegenstand vorliegt, treten bei der praktischen Arbeit immer wieder Effekte auf, die auf eine oder mehrere der folgenden Ursachen zurückzuführen sind:

- Der Aufstellungsort des Schwingungserregers ist nicht ideal gewählt (kein fester Untergrund, Erschütterungen durch Fahrzeuge, benachbarte Maschinen usw.)
- Kabel sind ungünstig geführt bzw. befestigt
- Kabel sind elektrisch defekt (z.B. triboelektrischer Effekt)
- Die Koppelflächen von BA-Normal und Kalibriergegenstand weisen unzulässige Unebenheiten oder Verschmutzungen auf
- Durch rasche Temperaturänderungen (z.B. Konvektion) treten bei piezoelektrischen Aufnehmern pyroelektrische Effekte auf
- Es wurden Erdschleifen gebildet oder Masseverbindungen fehlen (z.B. bei Aufnehmern, bei denen das Gehäuse nicht mit dem Schirm des Steckverbinders verbunden ist)
- Es wurden falsche Einstellungen vorgenommen

Um diese Einflussfaktoren bereits während der Kalibrierung beurteilen zu können, sind die grafische Anzeige der Signale beider Messkanäle oder zumindest der Klirrfaktoren und die mehrfach erwähnte Anzeige der beiden Standardabweichungen von großer Bedeutung. Beispielsweise kann nach der Signalisierung einer Übersteuerung, einer schlechten Kabelführung oder einer falschen Montage die Wirkung von Gegenmaßnahmen sofort beobachtet werden. Auch starke Unterschiede zwischen den beiden Standardabweichungen sind ein Indiz für bestimmte Mängel. So ist ein hoher Wert im Kanal des Kalibriergegenstandes bei niedrigem Wert für den Kanal des BA-Normals ein Hinweis auf Mängel im Kanal des Kalibriergegenstandes oder gar auf einen minderwertigen Kalibriergegenstand.

6 Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung

6.1 Vorbereitende Maßnahmen

6.1.1 Bestimmung der Kalibrierfähigkeit

Obwohl die wesentlichen Maßnahmen in DKD-R 3-1, Blatt 1, Abschnitt 4.2 ausführlich dargestellt sind, sollen einige Punkte nochmals hervorgehoben werden:

Vor der eigentlichen Kalibrierung ist durch bestimmte Maßnahmen festzustellen, ob der Kalibriergegenstand kalibrierfähig ist. Dies kann durch seine äußere mechanische Beschaffenheit und innere mechanische und/oder elektrische Defekte eingeschränkt sein. Im ungünstigsten Fall stellt sich erst bei der Beurteilung des Kalibrierergebnisses heraus, dass

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	20 / 36

der Kalibriergegenstand nicht kalibrierfähig war. Um dies zu vermeiden, sind die nachfolgend beschriebenen vorgelagerten Prüfungen gewissenhaft durchzuführen.

- Visuelle Prüfung (Zustand des Kalibriergegenstandes einschließlich der Koppelfläche, Lesbarkeit von Beschriftungen usw.)
- Prüfung individueller elektrischer Parameter des Kalibriergegenstandes in Abhängigkeit von der Bauart des Aufnehmers (z.B. BIAS-Spannung, Eingangs- und Ausgangswiderstand, Isolationswiderstand, Nullsignal, Kapazität)
- Bei piezoresistiven Aufnehmern sind die Qualität (Absolutwert, Stabilität, Rauschen) der Brückenspeisung, das Einlaufverhalten und die zeitliche Stabilität des Nullsignals zu beurteilen
- Der Kalibriergegenstand wird im Nennfrequenzbereich mit einem Gleitsinus (Sweep) bei konstanter Beschleunigungsamplitude angeregt und das Ausgangssignal wird optisch angezeigt. Dabei können Messunsicherheiten von beispielsweise 10 % toleriert werden. Ein nicht kalibrierfähiger Kalibriergegenstand zeigt bei diesem Test ausgeprägte Abweichungen des Frequenzganges von einem monotonen Verlauf, z.B. schmale Zacken. Der Sweep kann auch durch eine ausreichende Anzahl diskreter Frequenzen nachgebildet werden.

Daneben sind zu beachten:

- Warmlaufzeiten der Kalibrierhardware (standardmäßig ständig eingeschaltet)
- Angemessene Zeit zur Temperierung des Kalibriergegenstandes (Empfehlung: > 6 h)
- Nullsignal und die definierte Lage zum Schwerfeld der Erde
- Zusammenhang zwischen Richtung der physikalischen Belastung und dem Vorzeichen des Ausgangssignals, „Dreher“ bei Verlängerungskabeln
- Korrekte Verkabelung

6.1.2 Adaptierung der Aufnehmer

6.1.2.1 Allgemeine Hinweise

- In allen Fällen sind die zugehörigen Aufnehmerkabel mit den Eingängen der Verstärker von Normal und Kalibriergegenstand zu verbinden, die dem jeweiligen Typ des Aufnehmers entsprechen (z.B. Ladung, CCLD). Die Aufnehmerkabel sind möglichst rückwirkungsfrei und weit entfernt vom Magnetfeld des Schwingungserregers zu verlegen und zu fixieren
- Die Ankoppelungsflächen (Schwingungserreger und Aufnehmer), Adapterstiftschraube und ggf. Opferring sind mit Spiritus zu reinigen und mit einem geeigneten Kontaktmittel (z.B. technische Vaseline, Silikonfett, Hochvakuumfett) leicht einzufetten
- Vom Kunden mitgelieferte Koppeladapter sind auf Kalibrierfähigkeit analog zum Abschnitt 6.1.1 zu prüfen
- Da die zulässige Gesamtmasse für BA-Normal und Schwingteil begrenzt sind, ist darauf zu achten, dass die Massenbelastung in den spezifizierten Grenzen bleibt.
- Als Klebeverbindungen sind z.B. geeignet:
 - Klebewachs (bis maximal 5 kHz)
 - Cyanoacrylat (Sekundenkleber), z.B. Loctite 454, HBM Z70
 Die Schichtdicke ist so dünn wie möglich auszuführen. Weitere Hinweise in ISO 5348 sind zu beachten.
- Sonderadaptierungen und -aufbauten sind zu dokumentieren (z.B. Foto)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	21 / 36

- Generell ist dafür zu sorgen, dass das Zentrum der seismischen Masse des BA-Normals und das des Kalibriergegenstandes auf einer Achse mit geringstmöglichem Abstand voneinander liegen.

6.1.2.2 Spezielle Hinweise

Einige Schwingungserreger sind im Zentrum des Schwingteils mit einem sogenannten Opferring ausgestattet. Dies ist eine Sollbruchstelle, die eine Überschreitung des maximalen Drehmoments von zum Beispiel 3,5 N m und dadurch eine Beschädigung des Schwingteil verhindern soll. Gebräuchlich sind jedoch geringere Drehmomente im Bereich 2 N m bis 2,5 N m.

Wird auf dem Schwingungserreger ein Beschleunigungsaufnehmer-Paar, bestehend aus einem Rücken-an-Rücken-Typ und einem Single-ended-Typ befestigt, dann empfiehlt sich für die Schraubverbindung zwischen dem Schwingungserreger und dem Beschleunigungsaufnehmer vom Rücken-an-Rücken-Typ ein Drehmoment von 2,5 N m und für die verbleibende zweite Schraubverbindung ein Drehmoment von 2 N m, andernfalls muss beim Lösen der zweiten Schraubverbindung mit einem Gabelschlüssel feinfühlig gegengehalten werden.

6.2 Spezielle Vorbereitungen

Hierzu zählen alle Arbeiten, die von einem speziellen Prüfaufbau, von speziellen Eigenschaften des Kalibriergegenstandes und von Sonderforderungen des Kunden abhängen. Als Beispiele seien genannt:

- Druckluftbereitstellung bei luftgelagerten Schwingungserregern (Kontrolle der vom Hersteller geforderten Werte für Druck und Reinheit)
- Schwingrichtung weicht von der Standardrichtung ab (Beispiel: luftgelagerter Langhub-Schwingungserreger Typ D muss von horizontalem auf vertikalen Betrieb umgerüstet werden)
- Kalibriergegenstand erfordert den Bau eines speziellen mechanischen Adapters

6.3 Ablauf der Kalibrierung

Der Ablauf der Kalibrierung hängt vom verwendeten Kalibriersystem ab. Beim heutigen Stand der Technik erfolgt dies von einem PC-gesteuerten Arbeitsplatz aus, wobei der Bediener über weite Strecken vom System geführt und zu bestimmten Handlungen aufgefordert wird. Bei einem handelsüblichen System sind dies zum Beispiel folgende Schritte:

6.3.1 Globale Grundeinstellungen vornehmen

Einmalige Eingabe, erneute Eingabe nur bei Wechsel einer Komponente oder Erwerb einer neuen Komponente.

- Verwendete Hardware spezifizieren
- Schnittstelle festlegen
- Relevante technische Daten der verwendeten Schwingungserreger eingeben (Hersteller, Typ, max. Schwingweg, max. Strom, max. Drehmoment, Übertragungsfunktion, Grenzfrequenzen, max. Masse des Kalibriergegenstandes usw.)
- Technische Daten der verwendeten BA-Normale eingeben (Hersteller, Typ, Seriennummer, max. Masse des Kalibriergegenstandes, Übertragungsfunktion als Funktion der Frequenz, Masse usw.)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	22 / 36

6.3.2 Spezielle Grundeinstellungen vornehmen

Eingabe oder Korrektur bei jedem neuen Kalibriergegenstand

- Kalibriergegenstand definieren (Hersteller, Typ, Masse, Herstellerangaben übernehmen usw.)
- Festlegung der zu messenden Größen (z.B. Beschleunigung, Übertragungskoeffizient, Phasenverschiebungswinkel, Klirrfaktor usw.)
- Festlegung der anzuzeigenden Größen und/oder Einheiten (m/s^2 oder g_n , Effektivwerte oder Amplituden, Anzeige linear oder logarithmisch, Darstellung der Abweichung vom Bezugswert in einer für den Kalibriergegenstand geeigneten Weise: vorzugsweise in %, ggf. in dB)

6.3.3 Testbeschreibung erstellen

Eingabe oder Korrektur bei jedem neuen Kalibriergegenstand

- Auswahl der zu nutzenden Komponenten (Schwingungserreger, Normal)
- Kanalzuordnung festlegen
- Auswahl oder Neueingabe der Frequenzen und Amplituden bzw. Effektivwerte der anzuregenden Schwingungsgröße (z.B. durch Eingabe in eine Steuertabelle)
- Bezugsfrequenz festlegen

6.3.4 Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur ist in unmittelbarer Nähe von BA-Normal und Kalibriergegenstand zu messen. Sofern vom Schwingungserreger eine Wärmeentwicklung ausgeht, müssen die Körpertemperaturen von BA-Normal und Kalibriergegenstand gemessen oder abgeschätzt werden. Falls sich bei der Temperatur des BA-Normals dabei signifikante Unterschiede zur Referenztemperatur des BA-Normals ergeben, sind Anteile im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Die Temperaturdaten sind manuell oder automatisch in den Kalibrierschein einzufügen.

6.3.5 Kalibrierung durchführen

Der Kalibriervorgang wird gestartet und kann manuell, halbautomatisch oder vollautomatisch ablaufen.

Abhängig von der gewählten Kalibriereinrichtung sind geeignete Kriterien zur Beurteilung der Qualität des Kalibriervorgangs festzulegen und zu überwachen z.B.:

- Signalform und Klirrfaktor der Messsignale von BA-Normal und Kalibriergegenstand
- Standardabweichung der Einzelwerte einer Messreihe für die Amplitude bzw. den Effektivwert der Schwingungsgröße und für den Übertragungskoeffizienten

Die Erfüllung dieser Anforderungen wird vereinfacht bei Verwendung moderner Kalibriereinrichtungen, welche die Standardabweichung, die Signalform und den Klirrfaktor der Messsignale anzeigen. Damit lässt sich i. Allg. erkennen, ob der Schwingungserreger ordnungsgemäß befestigt ist ob BA-Normal und Kalibriergegenstand richtig montiert sind, ob unzulässige Resonanzen auftreten und ein Erfolg versprechender Kalibrierablauf zu erwarten ist. Diese Aussagen können auch nach Abschluss des Kalibriervorgangs dem Messprotokoll entnommen werden.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	23 / 36

Die Anzeige von Signalform und Klirrfaktor gibt Auskunft, ob vom System die richtige Treiberfunktion (bei tiefen Frequenzen) und die richtige Verstärkungseinstellung gewählt wurde.

Hat der Kalibriergegenstand eine eigene Anzeige, dann sollte die Kalibriereinrichtung den Bediener nach Bereitstellung der Anregungsparameter auffordern, den Messwert am Kalibriergegenstand abzulesen und über Tastatur einzugeben. Der abgelesene Wert wird dadurch später Bestandteil des Kalibrierscheins.

6.3.6 Kalibrierung bewerten

Das Ergebnis ist für jede Messfrequenz hinsichtlich Standardabweichung und Monotonie zu beurteilen. Übersteigt die Standardabweichung einen festgelegten Grenzwert (z.B. 0,5 %), so sind Kabelführung, Montage des Kalibriergegenstandes und Aufstellung des Schwingungserregers zu kontrollieren und die Kalibrierung ist zu wiederholen.

Bei unzulässigen Abweichungen des Frequenzganges vom erwarteten monotonen Verlauf, gekennzeichnet durch für Querresonanzen typische Schwankungen („Zacken“), ist das Kalibrierergebnis zu verwerfen oder der Einfluss der Querschwingungen ist durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.

Nach Abschluss des Kalibriervorgangs erfolgt eine Bewertung der Messergebnisse. Vom Bediener können optional weitere Messbedingungen und Kommentare (z.B. Konformitätsaussagen) eingefügt werden. Dieses Messprotokoll kann gespeichert, gedruckt oder verworfen werden. Aus dem Messprotokoll kann anschließend unter Festlegung einer Kalibrierscheinnummer ein Kalibrierschein erzeugt werden. Bezüglich Kalibrierschein s. Abschnitt 10.

7 Wartung und Kontrolle

Beispiele für präventive Wartungsmaßnahmen (planmäßig):

- Kabel und Kabelhalterungen prüfen
- Güte der Aufspannflächen prüfen und Flächen ggf. läppen

Beispiele für Kontrollen, mit denen u.a. die Langzeitstabilität nachgewiesen werden kann:

- Durchführung interner und externer Audits nach DIN EN ISO/IEC 17025 einschließlich Vergleichsmessungen
- Regelmäßige laborinterne Überprüfung der Kalibriereinrichtung durch Kalibrierung eines geeigneten Referenzempfängers
- Test der signalführenden Komponenten mit determinierten Testsignalen

8 Aspekte bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern

Folgende Punkte sind zu beachten:

- Werden Umgebungseinflüsse, die ein Ausgangssignal der Aufnehmer erzeugen, ausreichend entkoppelt? Steht die Kalibriereinrichtung an einem Ort, an dem starke Zugluft, Sonneneinstrahlung oder Umgebungsbewegungen vorhanden sind?
- Sind starke akustische, magnetische oder radioaktive Felder in der Nähe?
- Werden durch die Klimatisierung die geforderten Bereiche für Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck eingehalten?
- Ist eine sinnvolle Konstruktion, Oberflächengüte und Materialwahl der Adaptionen gegeben?

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	24 / 36

- Liegen die Resonanzfrequenzen des Aufbaus genügend hoch?
- Wird das Drehmoment bei der Montage eingehalten?
- Besitzt der Kalibriergegenstand eine Ansatzfläche für Drehmomentschlüssel?
- Erzeugen die Kabelabgänge des Kalibriergegenstandes störende Einflüsse?
- Sind die verwendeten Kabel ausreichend flexibel und sinnvoll verlegt?
- Kann die Befestigung des Kalibriergegenstandes mit möglichst wenigen Adaptern realisiert werden?
- Stehen die Aufspannflächen des Kalibriergegenstandes und der Kalibriereinrichtung in einem angemessenen Verhältnis?
- Liegt der Schwerpunkt der seismischen Masse (C_{SM}) des Kalibriergegenstandes möglichst nahe am C_{SM} des BA-Normals?
- Ist der Abstand von Nutz- zu Störsignalen ausreichend hoch?
- Liegt eine Drift des Ausgangssignals vor? Ist sie hinreichend klein?
- Sind das Material, die Schirmung und die Kapazität der Kabel richtig gewählt?

9 Messunsicherheitsbetrachtungen

9.1 Darstellung der Einflussgrößen

Für die Aufstellung des Modells der Auswertung ist es empfehlenswert, ein Blockschaltbild zu erstellen, aus dem die Einflussgrößen ersichtlich werden. Es visualisiert den Zusammenhang zwischen der Ursache (Anregungsbeschleunigung) und der Wirkung (Ergebnisgröße, Messergebnis) unter dem Einfluss von Störgrößen.

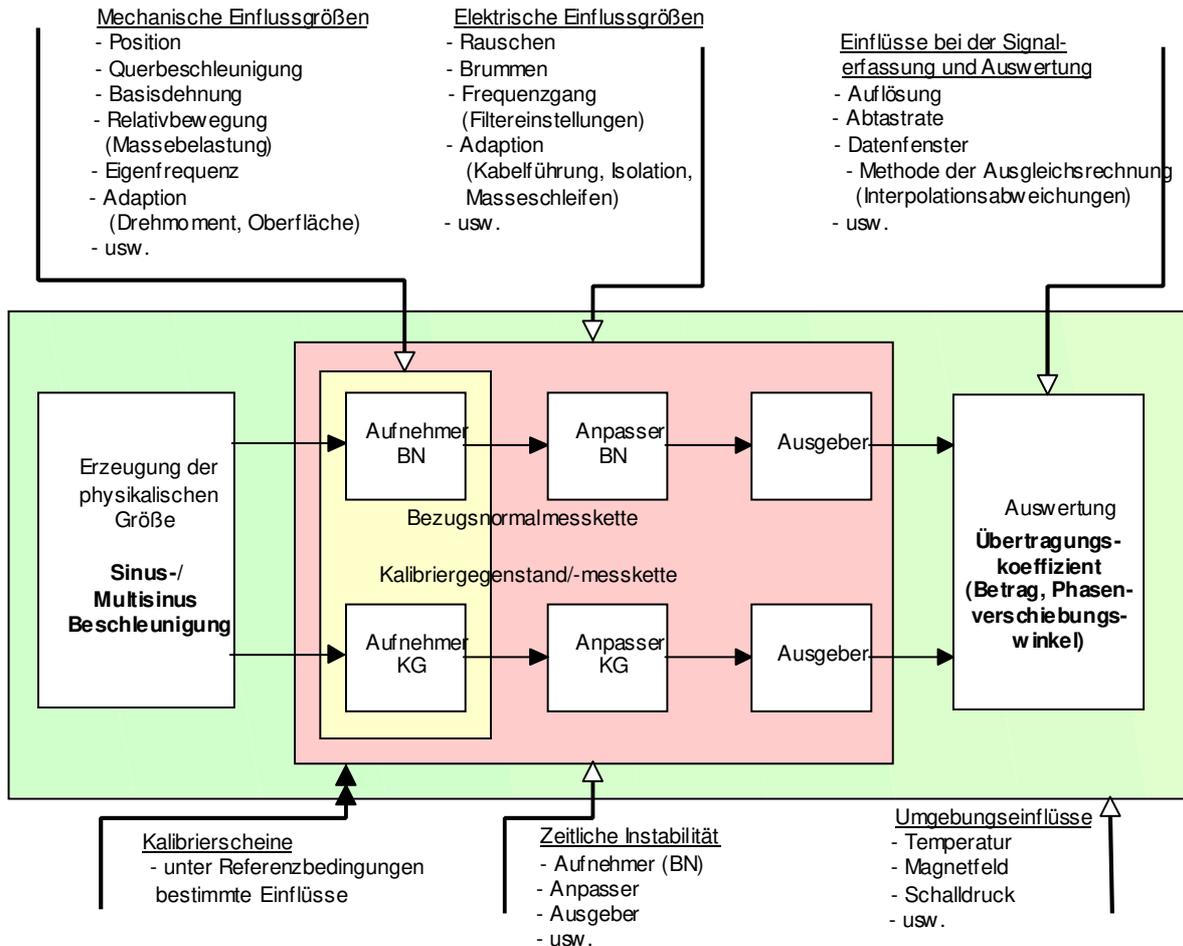


Bild 2: Darstellung der Einflussgrößen

9.2 Modell

Das Modell der Auswertung einer Vergleichskalibrierung zur Bestimmung des Übertragungskoeffizienten kann in allgemeiner Darstellung gemäß [24] folgendermaßen formuliert werden:

Größen:
$$Y = q * \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}; \quad p_i = \pm 1$$

Schätzwerte:
$$y = q * \prod_{i=1}^N x_i^{p_i}; \quad p_i = \pm 1$$

Darin bedeutet q eine Konstante, die im vorliegenden Fall gleich 1 ist (s. S. 25).

In der detaillierten Darstellung – Bestimmungsgleichung mit „besten“ Schätzwerten – lässt sich daraus der Ausdruck ableiten:

$$S_X = S_S * R * G * K_f * K_T * K_D * K_H * K_N * K_B * K_{MT} * K_{MC} * K_{Rel} * K_{TK} * K_L * K_I * K_{Res}$$

$Y = S_X$	Ergebnis, Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes (KG) Beschleunigungsaufnehmer <u>ohne</u> Verstärker	1
$X_1 = S_S$	Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmer (BA) – Normals	2
$X_2 = R$	Verhältnis der Ausgangsspannungen $R = V_X / V_S$	3
$X_3 = G$	Verhältnis der Verstärkerübertragungskoeffizienten $G = G_S / G_X$	
$X_4 = K_f$	Korrektionsfaktor Frequenzgang	
$X_5 = K_T$	Korrektionsfaktor Querbewegung	
$X_6 = K_D$	Korrektionsfaktor Oberwellen	
$X_7 = K_H$	Korrektionsfaktor Brummen	
$X_8 = K_N$	Korrektionsfaktor Rauschen	
$X_9 = K_B$	Korrektionsfaktor Basisdehnung	
$X_{10} = K_{MT}$	Korrektionsfaktor Aufnehmersmontage	
$X_{11} = K_{MC}$	Korrektionsfaktor Kabelmontage	
$X_{12} = K_{Rel}$	Korrektionsfaktor Relativbewegung	
$X_{13} = K_{TK}$	Korrektionsfaktor Temperaturänderung	
$X_{14} = K_L$	Korrektionsfaktor Nichtlinearität / Linearitätsabweichung	
$X_{15} = K_I$	Korrektionsfaktor zeitliche Instabilität des BA-Normals	
$X_{16} = K_{Res}$	Korrektionsfaktor Residuale Einflüsse (z.B. Magnetfeldeinflüsse)	

Tabelle 6: Festlegung der Ergebnisgröße und der Eingangsgrößen des mathematischen Modells der Auswertung

- | | | | |
|---|---------------|--|----------|
| 1 | Ergebnisgröße | | |
| 2 | N' | Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ergebnisgröße | $N' < N$ |
| 3 | N | Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit | $N' < N$ |

Korrektionsfaktoren:

für das Normal:	$K_i = (1 + e_{s,i}^*)$	für X_{14}, X_{15}
für den Kalibriergegenstand:	$K_i = (1 - e_{x,i}^*)$	
für das Normal und den KG:	$K_i = (1 - e_{x,i}^* + e_{s,i}^*)$	für alle weiteren X_i

Relative Messabweichungen:

Die relative Messabweichung des Kalibrierergebnisses setzt sich zusammen aus Messunsicherheitsbeiträgen e_i^* , die sich jeweils als Transformation einer mehrdimensionalen Einflussgröße beschreiben lässt. Jeder Messunsicherheitsbeitrag kann im Allgemeinfall aus den multiplikativ verknüpften Zufallsvariablen dargestellt werden [30], [35] wobei die resultierende Zufallsvariable symmetrisch um den Erwartungswert Null verteilt ist:

$$e_i^* = S_{z_i} * z_i * g(\alpha_i) * g(\Delta t_i)$$

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	27 / 36

Darin bedeuten:

S_{z_i}	Empfindlichkeit bezüglich der Einflussgröße
z_i	Intensitätsparameter (Amplitude) der Einflussgröße
$g(\alpha_i)$	Richtungsfaktor ($\cos \beta_i$ mit β_i Winkel)
$g(\Delta t_i)$	Zeiteinflussfaktor (z.B. $\cos \varphi_i$ mit φ_i Phase)

Die Varianz des Produktes aus Zufallsgrößen (mit dem Erwartungswert Null) ist gleich dem Produkt der Varianzen der Verteilungen der einzelnen Zufallsgrößen bzw. ihrer Funktionen.

9.3 Abweichungsspanne W'

Die relative Abweichungsspanne setzt sich additiv aus der relativen erweiterten Messunsicherheit ($k = 2$) und dem Betrag der systematischen Abweichung zusammen. Aufgrund des systematischen Anteils wird der Abweichungsspanne als Verteilungsform die Rechteckverteilung zugewiesen.

$$W' = W + |\Delta a|$$

9.4 Ermittlung der Messunsicherheit ²

9.4.1 Spezifikation von BNME, BA-Normal und Kalibriergegenstand

Die Ermittlung der Messunsicherheit wird an folgenden konkreten Komponenten beispielhaft vorgenommen. Um die kleinste angebbare Messunsicherheit von Kalibriereinrichtungen zu demonstrieren, wird ein nach dem gegenwärtigen Stand der Technik „bester“ Kalibriergegenstand ausgewählt. Alternativ können BA-Normale vergleichbarer Qualität anderer Hersteller eingesetzt werden.

<i>Kalibriereinrichtung:</i>	Beschleunigungs-BNME 10 Hz bis 10 kHz
<i>BA-Normal:</i>	Typ I gemäß Tabelle 4, z.B. 8305 (Hersteller Brüel & Kjær)
<i>Kalibriergegenstand:</i>	Typ IV gemäß Tabelle 4, z.B. 2270 M8 (Hersteller Endevco)

Für die Bestimmung der relativen Messunsicherheit sind die folgenden in der Tabelle 7 aufgeführten Beiträge zu berücksichtigen.

Anmerkung:

- Es wird vorausgesetzt, dass die Eingangswerte in dem Sinne beste Schätzwerte sind, dass sie bezüglich der für das Modell bedeutsamen Einflüsse und Effekte geeignet korrigiert wurden. Ist das nicht der Fall, müssen die erforderlichen Korrekturen als getrennte Eingangsgrößen in das Modell der Auswertung eingeführt werden.
- Evtl. vorhandene Korrelationen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen X_i werden bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren (gleiches i bei Wirkung auf Normal und Kalibriergegenstand) berücksichtigt.
- Aufgrund des gewählten (linearen) Produkt-Modells und der Betrachtung von rela-

² Nach [21], [22], [24], [25]

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	28 / 36

tiven Messunsicherheiten sind die Sensitivitätskoeffizienten stets gleich 1 ($c_i = 1$), d.h. es gilt:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u^2(x_i)$$

- Die Schätzwerte der Korrekturfaktoren K_i sind gleich 1, da per Ansatz die Erwartungswerte der unbekanntenen Messabweichungen gleich Null sind ($E[e_i^*] = 0$).

9.4.2 Messunsicherheitsanalyse (Budgettabelle, allgemein)

lfd. Nr.	Größe X_i	Schätzwert x_i	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient ³ c_i^*	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$	Varianz $w_i^2(y)$
1	S_S	S_S	$w(S_S)$	1	$w_{S_S}(S_X)$	$w_{S_S}^2(S_X)$
2	R	R	$w(R)$	1	$w_R(S_X)$	$w_R^2(S_X)$
5	G	G	$w(G)$	1	$w_G(S_X)$	$w_G^2(S_X)$
4	K_f	1	$w(K_f)$	1	$w_f(S_X)$	$w_f^2(S_X)$
5	K_T	1	$w(K_T)$	1	$w_T(S_X)$	$w_T^2(S_X)$
6	K_D	1	$w(K_D)$	1	$w_D(S_X)$	$w_D^2(S_X)$
7	K_H	1	$w(K_H)$	1	$w_H(S_X)$	$w_H^2(S_X)$
8	K_N	1	$w(K_N)$	1	$w_N(S_X)$	$w_N^2(S_X)$
9	K_B	1	$w(K_B)$	1	$w_B(S_X)$	$w_B^2(S_X)$
10	K_{MT}	1	$w(K_{MT})$	1	$w_{MT}(S_X)$	$w_{MT}^2(S_X)$
11	K_{MC}	1	$w(K_{MC})$	1	$w_{MC}(S_X)$	$w_{MC}^2(S_X)$
12	K_{Rel}	1	$w(K_{REL})$	1	$w_{Rel}(S_X)$	$w_{Rel}^2(S_X)$
13	K_{TK}	1	$w(K_{TK})$	1	$w_{TK}(S_X)$	$w_{TK}^2(S_X)$
14	K_L	1	$w(K_L)$	1	$w_L(S_X)$	$w_L^2(S_X)$
15	K_I	1	$w(K_I)$	1	$w_I(S_X)$	$w_I^2(S_X)$
16	K_{Res}	1	$w(K_{Res})$	1	$w_{Res}(S_X)$	$w_{Res}^2(S_X)$
	S_X	S_X			$w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$	
	S_X	S_X			$W(S_X) = k * w(S_X)$	

Tabelle 7: Messunsicherheitsanalyse (Budgettabelle, allgemein)

³ Der Sensitivitätskoeffizient c_i^* ist der Faktor, mit dem die relative Unsicherheit $w(x_i)$ in den relativen Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$ umgerechnet wird. Er hängt mit dem Sensitivitätskoeffizienten c_i (siehe Gl. (4.3) in DAkKS-DKD-3) folgendermaßen zusammen: $c_i^* = \frac{x_i}{y} \cdot c_i$.

9.4.3 Messunsicherheitsbudget

lfd. Nr.	Größe	Schätzwert	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient ³	Unsicherheitsbeitrag	Varianz
	X_i	x_i	$w(x_i)$	c_i^*	$w_i(y)$	$w_i^2(y)$
1	S_S	0,131 pC/(m/s ²)	$1,4 \cdot 10^{-3}$	1	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$
2	R	0,7847	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-7}$
5	G	2,001	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-6}$
4	K_f	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
5	K_T	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
6	K_D	1	0,0	1	0,0	0,00
7	K_H	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
8	K_N	1	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$
9	K_B	1	$5,8 \cdot 10^{-5}$	1	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-9}$
10	K_{MT}	1	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$
11	K_{MC}	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
12	K_{Rel}	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
13	K_{TK}	1	$3,0 \cdot 10^{-4}$	1	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$9,00 \cdot 10^{-8}$
14	K_L	1	$2,9 \cdot 10^{-5}$	1	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$8,41 \cdot 10^{-10}$
15	K_I	1	$3,5 \cdot 10^{-4}$	1	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$
16	K_{Res}	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
	S_S	0,2057 pC/(m/s ²)	$w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$		$3,1 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-6}$
	S_S		$W(S_X) = k \cdot w(S_X)$ $k = 2$		$6,2 \cdot 10^{-3}$	
Angabe des vollständigen Messergebnisses			$S_X = 0,206 \text{ pC/(m/s}^2\text{)} \pm 0,62 \%$			

Tabelle 8: Messunsicherheitsbudget, kleinste angebbare Messunsicherheit, BA ENDEVCO, Typ: 2270M8, $f = 160 \text{ Hz}$, $a_{z,S} = 100 \text{ m/s}^2$

9.4.4 Säulendiagramm der Einflussgrößen

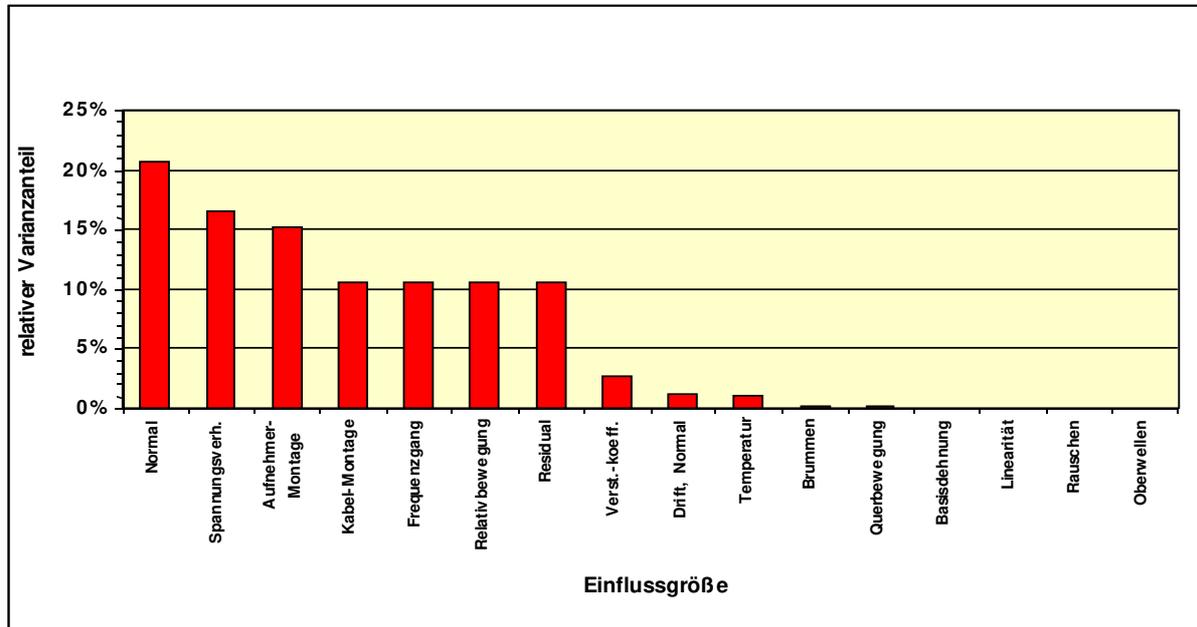


Bild 3: Darstellung der Varianzanteile (Quadrat der Unsicherheitsbeiträge) an der Gesamtvarianz (Quadrat der Standardmessunsicherheit) in absteigender Sortierung (Messunsicherheitsbudget nach Tabelle 8)

10 Angaben im Kalibrierschein

Die in DAkkS-DKD-5 aufgelisteten Angaben sind um folgende Punkte zu erweitern, sofern diese für die durchgeführte Kalibrierung relevant sind:

➤ Messbedingungen

- Lage des Kalibriergegenstandes im Erdfeld und Achsbezeichnung bei mehrachsigen Kalibriergegenstand
- Befestigung (wenn Verschraubung, dann Angabe des Drehmoments)
- Anschlusskabel (Hersteller, Typ, Länge, Kapazität, Steckverbinder)
- Anregungsdaten bei Bezugsfrequenz (Bezugsfrequenz, Effektivwert der Beschleunigung in m/s^2 oder g_n)
- Eckwerte für Frequenzgangermittlung (Frequenzbereich von bis, Zahl der Frequenzpunkte und Staffelung, Beschleunigung)
- Temperatur des Kalibriergegenstandes während der Kalibrierung (wenn sie gemessen wurde) oder deren Abschätzung

➤ Messergebnisse in Präzisierung von DAkkS-DKD-5:

- Übertragungskoeffizient und Standardabweichung bei Bezugsfrequenz
- Tabellierte Angaben von:
Frequenz / Beschleunigungsamplitude oder -effektivwert / komplexer Übertragungskoeffizient nach Betrag und ggf. Phasenverschiebungswinkel / Abweichung zur Bezugsfrequenz in %, ggf. in dB bzw. in $^\circ$.

Bei Linearitätsmessungen ist die Tabelle entsprechend abzuändern, ggf. ist eine Einwertangabe mit Gültigkeitsbereich zu bestimmen.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	32 / 36

Es wird empfohlen, die Kalibrierergebnisse zu visualisieren (z.B. durch Darstellung des komplexen Übertragungskoeffizienten nach Betrag und ggf. Phasenverschiebungswinkel über der Frequenz).

Daneben können optional Fakten und Begleitumstände eingetragen werden, falls diese einen Bezug zum Kalibriervorgang haben, z. B. „dritte Wiederholung“, „turnusmäßige Rekalibrierung“, „Überprüfung nach Stoßbeanspruchung“ usw.

Auch können zusätzliche Ergebnisse in die Ergebnis-Tabelle eingefügt werden, wie z. B. Standardabweichungen und Klirrfaktoren.

11 Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium

Im Kalibrierlaboratorium sind Aufzeichnungen zum Kalibrieraufbau mit Zuordnung zum Auftrag zu führen und aufzubewahren, z.B.:

- Zusätzliche für die Rückführung relevanten Informationen, z.B. verwendete BNME und verwendetes BA-Normal
- Softwareversion bei rechnergestütztem Betrieb
- Art und Anzahl der verwendeten elektrischen und mechanischen Adapter, ggf. die Gesamtmasse unter Einbeziehung von mechanischen Adaptern, Stiftschrauben, Aufnehmern, Kabelanteil
- Richtung des Kabelabgangs (ggf. Zusammenhang mit der Richtung der minimalen Querschleunigungsempfindlichkeit)
- Lage des Kalibriergegenstandes bei der Kalibrierung (Zentrum der seismischen Masse)
- Angaben zum Bediener
- Art bzw. Wirkprinzip des Kalibriergegenstandes
- Verweis zu begleitenden Dokumenten (z.B. primäres Messprotokoll, Testbeschreibung)
- Steckplätze der Messverstärker bei Mehrkanalsystemen

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	33 / 36

12 Literatur

- [1] **ISO 2041: *Vibration and shock – Vocabulary***
2nd Edition, ISO, Geneva, CH, 1990-08-01
- [2] **ISO 5348: *Mechanical vibration and shock – Mechanical mounting of accelerometers***
2nd Edition, ISO, Geneva, CH, 1998-05-14
- [3] **ISO 16063: *Methods for the calibration of vibration and shock transducers***
ISO, Geneva, CH

ISO 16063-1	<i>Basic concepts</i>
ISO 16063-1x	<i>Primary calibrations</i>
-11	<i>Primary vibration calibration by laser interferometry</i>
-12	<i>Primary vibration calibration by the reciprocity method</i>
-13	<i>Primary shock calibration using laser interferometry</i>
-14 ⁴	<i>Primary calibration by high impact shocks</i>
-15 ⁵	<i>Primary angular calibration by laser interferometry</i>
ISO 16063-2x	<i>Secondary calibrations</i>
-21	<i>Vibration calibration by comparison to a reference transducer</i>
-22 ⁵	<i>Shock calibration by comparison to a reference transducer</i>
-23 ⁴	<i>Angular vibration calibration by comparison to a reference transducer</i>
ISO 16063-3x ⁶	<i>Calibration in severe environments</i>
-31 ⁴	<i>Testing of transverse vibration sensitivity (sinusoidal)</i>
-(ISO 5347-12) ⁷	<i>Testing of transverse shock sensitivity</i>
-(ISO 5347-13) ⁷	<i>Testing of base strain sensitivity</i>
-(ISO 5347-14) ⁷	<i>Resonance frequency testing of undamped accelerometers on a steel block</i>
-(ISO 5347-15) ⁷	<i>Testing of acoustic sensitivity</i>
-(ISO 5347-16) ⁷	<i>Testing of mounting torque sensitivity</i>
-(ISO 5347-17) ⁷	<i>Testing of fixed temperature sensitivity</i>
-(ISO 5347-18) ⁷	<i>Testing of transient temperature sensitivity</i>
-(ISO 5347-19) ⁷	<i>Testing of magnetic field sensitivity</i>

- [4] **IEEE Std 1057-1994: *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders***
IEEE, New York, USA, 1994
- [5] **DAkKS-DKD-4: *Rückführung von Mess- und Prüfmitteln auf nationale Normale***
Deutsche Akkreditierungsstelle DAkKS, Braunschweig, Neuauflage 2010
- [6] **DAkKS-DKD-5: *Anleitung zum Erstellen eines DAkKS-Kalibrierscheines***
Deutsche Akkreditierungsstelle DAkKS, Braunschweig, Neuauflage 2010
- [7] **DKD-R 3-1, Blatt 1: *Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren, Grundlagen***
PTB, Braunschweig, 2. Neuauflage 2018
- [8] **DKD-R 3-1, Blatt 2: *Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren, Stoßanregung***
PTB, Braunschweig, 2. Neuauflage 2018
- [9] **Tichý, J.; Gautschi G.: *Piezoelektrische Meßtechnik***
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980, ISBN 3-540-09448-2

⁴ Bearbeitung geplant (zero stage project)

⁵ In Bearbeitung

⁶ z. Z. noch ISO 5347-11 bis –19 (Ausgabe 1993), neue Nummerierung nach Überarbeitung

⁷ Überarbeitung bisher nicht geplant

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	34 / 36

- [10] **Harris, Cyril M.; Crede, Charles E.:** *Shock And Vibration Handbook*
4th Edition, McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-026920-3
- [11] **Brüel & Kjær** (Serridge, M.; Licht, T. R.): *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers, Theorie and Application Handbook*, Brüel & Kjær, Nærum, DK, 1986
- [12] **ENDEVCO:** *Handbuch der Schock- und Vibrationsmeßtechnik*
ENDEVCO Deutschland, Heidelberg 1992
- [13] **Sill, R.D.:** *Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers*, ENDEVCO Technical Paper TP 299, pp 32,
http://www.endevco.com/test/test_main.htm
- [14] **Sill, R.D.:** *Mass Loading in Back-To-Back Reference Accelerometers*
ENDEVCO Technical Paper TP 310, pp 8, http://www.endevco.com/test/test_main.htm
- [15] **Bühn, U.; Nicklich, H.:** *Kalibriersysteme für die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg*, Teil 1: *Grundlagen*, VFI 4/2000, S. 28 – 37
- [16] **Bühn, U.; Nicklich, H.:** *Kalibriersysteme für die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg*, Teil 2: *Spezielle Optionen*, VFI 1/2001, S. 30 - 35
- [17] **Bühn, U.; Nicklich, H., Siegmund, G.:** *Kalibriersysteme für die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg*, Teil 3: *Primärkalibriersysteme*, VFI 3/2001, S. 28 - 39
- [18] **Bühn, U.; Nicklich, H., Martens, H.-J.:** *Kalibriersysteme für die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg*, Teil 4(A): *Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern*, VFI 1/2002, S. 36 - 41
- [19] **Bühn, U.; Nicklich, H., Martens, H.-J.:** *Kalibriersysteme für die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg*, Teil 4(B): *Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern*, VFI 2/2002, S. 48 - 50
- [20] **N.N.:** *Frequency Response Analysis*
Technical Report 10, Solartron, May 1999

Grundlage für Messunsicherheitsbetrachtungen sind folgende Dokumente und Veröffentlichungen:

- [21] **ISO:** *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
1st Edition 1993, ISO, Geneva, CH, ISBN 92-67-10188-9
- [22] **DIN V ENV 13005:** *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*
Beuth Verlag Berlin, 1995, ISBN 3-410-13405-0
(Deutsche Übersetzung des „*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*“)
- [23] **EA-4/02 (früher EAL-R2):** *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*
(– including supplement 1 and 2), *European co-operation for Accreditation*, December 1999, pp 79
- [24] **DAkKS-DKD-3:** *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen*
(Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02: „*Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*“), Deutsche Akkreditierungsstelle DAkKS, Braunschweig, Neuauflage 2010.
- [25] **DAkKS-DKD-3-E1:** *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen Ergänzung 1- Beispiele-*
(Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S1: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Supplement 1 -Examples*), Deutsche Akkreditierungsstelle DAkKS, Braunschweig, Neuauflage 2010.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Sinus- und Multisinus-Anregung https://doi.org/10.7795/550.20180823D	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	35 / 36

- [26] **DAkKS-DKD-3-E2:** Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Ergänzung 2 – Zusätzliche Beispiele- (Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S2: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Supplement 2 -Examples*), Deutsche Akkreditierungsstelle DAkKS, Braunschweig, Neuauflage 2010.
- [27] **DIN 1319-3:** *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin 1996
- [28] **DIN 1319-4:** *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 4: Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin 1999
- [29] **VDI/VDE 2620:** *Unsichere Messungen und ihre Wirkung auf das Messergebnis* Beuth Verlag Berlin, Entwurf Dezember 1998
- [30] **Martens, H.-J. v.; Rogazewski, P.:** *Representation and Transfer of the Units of Vibration Quantities in the GDR*, Bulletin OIML No. 108, 1987
- [31] **Martens, H.-J. v.; Pippig, E.-E.:** *Über Möglichkeiten zur Beschreibung des Fehlers korrigierter Meßergebnisse auf der Grundlage der internationalen Empfehlung INC-1* (1980), Metrologische Abhandlungen, Berlin 10 (1990) 1, S. 1 – 44
- [32] **ISO 16063-1:** *Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic concepts*, 1st Edition, 1998-10-15, **Annex A:** *Expression of uncertainty of measurement in calibration*
- [33] **Martens, H.-J. v.:** *Beispiel zur Ermittlung und Angabe der Meßunsicherheit: Kalibrierung eines Beschleunigungsaufnehmer-Normals mit sinusförmiger Anregungsbeschleunigung der Frequenz 800 Hz und Beschleunigungsamplitude 50 m/s²* Manuskript, Januar 1999
- [34] **Martens, H.-J. v.:** *Evaluation of Uncertainty in Interferometric Vibration Measurements* SPIE, Proceedings 4th International Conference „Vibration Measurements by Laser Techniques“, Ancona (Italy), June 2000
- [35] **Martens, H.-J. v.:** *Evaluation of uncertainty in measurements – problems and tools* OPTICS and LASERS in ENGINEERING, Elsevier Science, 38, 2002, 185-206



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Deutscher Kalibrierdienst

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

www.dkd.eu

www.ptb.de