

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Richtlinie  
DKD-R 3-1  
Blatt 3**


**Kalibrierung von  
Beschleunigungsmessgeräten  
nach dem Vergleichsverfahren –  
Sinus- und Multisinus-Anregung**

---

Ausgabe 05/2020

<https://doi.org/10.7795/550.20200527>



	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</p> <p style="text-align: center;"><a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a></p>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	2 / 31

## 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](http://www.dkd.eu)

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</p> <p style="text-align: center;"><a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a></p>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	3 / 31

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 3-1*

*Blatt 3 Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus-Anregung, Ausgabe 05/2020, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20200527*


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:

Dr. Thomas Bruns, Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin;  
 Dr. Heiko Müller, Volkswagen AG, Wolfsburg;  
 Philipp Begoff, SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH, Dresden;  
 Dr. Thomas Petzsche, Kistler Instrumente GmbH, Sindelfingen

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.

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</p> <p style="text-align: center;"><a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a></p>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	4 / 31

## 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. Außerdem kann durch die Umsetzung der Richtlinien der Stand der Technik auf dem jeweiligen Gebiet in die Laborpraxis Eingang finden.

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.


Kalibrierungen der akkreditierten Laboratorien geben dem Anwender Sicherheit für die Verlässlichkeit von Messergebnissen, erhöhen das Vertrauen der Kunden und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem nationalen und internationalen Markt und dienen als messtechnische Grundlage für die Mess- und Prüfmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Kraft und Beschleunigung* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2003 erstellt. Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält redaktionelle Änderungen und eine kürzere Darstellung des Messunsicherheitsabschnittes; außerdem wurde das Literaturverzeichnis komplett überarbeitet. Darüber hinaus ist sie inhaltsgleich mit der DKD-R 3-1, Blatt 3: 2018.

Ausgabe: 03/2003 veröffentlicht vom DKD


1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage
3. geänderte Neuauflage: 05/2020, durch den DKD

Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen des Fachausschusses *Kraft und Beschleunigung* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.


	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	5 / 31

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Anwendungsbereich .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Symbole .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Kalibrierverfahren .....</b>	<b>10</b>
3.1	<i>Grundlagen .....</i>	<i>10</i>
3.2	<i>Erregung mit Sinussignal .....</i>	<i>11</i>
3.3	<i>Erregung mit Multisinussignal.....</i>	<i>11</i>
3.4	<i>Einheitliche Betrachtung.....</i>	<i>12</i>
3.5	<i>Messwertverarbeitung.....</i>	<i>13</i>
3.5.1	<i>Kontinuierliche Ergebnisbildung .....</i>	<i>13</i>
3.5.2	<i>Ergebnisbildung durch Sinus-Approximation .....</i>	<i>13</i>
3.5.3	<i>Ergebnisbildung durch Sinus-Korrelation.....</i>	<i>14</i>
<b>4</b>	<b>Kalibriereinrichtungen .....</b>	<b>14</b>
4.1	<i>Schwingungserreger für die Kalibrierung.....</i>	<i>14</i>
4.1.1	<i>Aufstellung des Schwingungserregers .....</i>	<i>15</i>
4.1.2	<i>Quer-, Kipp- und Taumelschwingungen des Schwingteils.....</i>	<i>16</i>
4.2	<i>Beschleunigungsaufnehmer-Normale .....</i>	<i>16</i>
4.3	<i>Elektronik .....</i>	<i>17</i>
4.4	<i>Typische Kalibriereinrichtungen .....</i>	<i>18</i>
4.5	<i>Kalibrierablauf.....</i>	<i>18</i>
4.6	<i>Einflussfaktoren und praktische Hinweise .....</i>	<i>20</i>
<b>5</b>	<b>Vorbereitung und Durchführung der Kalibrierung.....</b>	<b>20</b>
5.1	<i>Vorbereitende Maßnahmen.....</i>	<i>20</i>
5.1.1	<i>Bestimmung der Kalibrierfähigkeit.....</i>	<i>20</i>
5.1.2	<i>Adaptierung der Aufnehmer .....</i>	<i>21</i>
5.2	<i>Spezielle Vorbereitungen .....</i>	<i>22</i>
5.3	<i>Durchführung der Kalibrierung .....</i>	<i>22</i>
5.3.1	<i>Globale Grundeinstellungen vornehmen .....</i>	<i>22</i>
5.3.2	<i>Spezielle Grundeinstellungen vornehmen .....</i>	<i>23</i>
5.3.3	<i>Testbeschreibung erstellen .....</i>	<i>23</i>
5.3.4	<i>Umgebungstemperatur.....</i>	<i>23</i>
5.3.5	<i>Messungen durchführen.....</i>	<i>23</i>
5.3.6	<i>Kalibrierung bewerten .....</i>	<i>24</i>
<b>6</b>	<b>Wartung und Kontrolle.....</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Aspekte bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern.....</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Messunsicherheit.....</b>	<b>25</b>
8.1	<i>Modellgleichung .....</i>	<i>26</i>

	<b>Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	6 / 31

<b>8.2</b>	<b><i>Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz</i></b> .....	<b>27</b>
8.2.1	<i>Spezifikation von BNME, BA-Normal und Kalibriergegenstand</i> .....	27
8.2.2	<i>Messunsicherheitsbilanz – Beispielwerte</i> .....	27
8.2.3	<i>Analyse der Messunsicherheitsbilanz</i> .....	29
<b>9</b>	<b>Angaben im Kalibrierschein</b> .....	<b>29</b>
<b>10</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>30</b>

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	7 / 31

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie bezieht sich auf Kalibrierverfahren, bei denen eine sinus- oder multi-sinusförmige 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  $\varphi_a$  der Beschleunigung  $a$  in die entsprechenden Kenngrößen der Schwinggeschwindigkeit  $v$  (Amplitude  $\hat{v}$ , Nullphasenwinkel  $\varphi_v$ ) und des Schwingweges (Amplitude  $\hat{s}$ , Nullphasenwinkel  $\varphi_s$ ) umrechnen:

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

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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	8 / 31

## 2 Symbole

Für die Anwendung dieser DKD-Richtlinie gelten die in folgender Tabelle genannten Symbole. Alle kinematischen Größen sowie die Übertragungskenngrößen gelten jeweils für die Messfrequenz  $f_{\text{mess}}$ . 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  $\varphi_x$  von Bedeutung sind.

Abkürzungen/ Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
$\tilde{a}_{z,S}$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigungseffektivwert <sup>1</sup> , der bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$ auf das BA-Normal wirkt
$\tilde{a}_{z,X}$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigungseffektivwert, der bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$ auf den Kalibriergegenstand wirkt
$C_{SM}$	mm	Schwerpunkt der seismischen Masse (Centre of seismic mass)
$f_{\text{res}}$	Hz	Resonanzfrequenz eines Beschleunigungsaufnehmers (im montierten Zustand)
$G_S$		Übertragungskoeffizient des Verstärkers (Normal) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$G_X$		Übertragungskoeffizient des Verstärkers (KG) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$H_{SH}$	(m/s <sup>2</sup> )/V	Übertragungsfunktion von Leistungsverstärker und Schwingungserreger bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$\tilde{q}_S$	pC	Ladungseffektivwert eines Beschleunigungsaufnehmers (Normal) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$\tilde{q}_X$	pC	Ladungseffektivwert eines Beschleunigungsaufnehmers (KG) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$S_{ua,X}$		Übertragungskoeffizient der Messkette (KG) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$S_S$		Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmers (Normal) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$S_X$		Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmers (KG) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$u_S(m)$	V	A/D-umgesetzter $m$ -ter Probenwert der Ausgangsspannung des Verstärkers (Normal) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$u_X(m)$	V	A/D-umgesetzter $m$ -ter Probenwert der Ausgangsspannung des Verstärkers (KG) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$\tilde{u}_S$	V	Spannungseffektivwert am Ausgang des Verstärkers (Normal) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$

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



	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>		DKD-R 3-1 Blatt 3	
			Ausgabe:	05/2020
			Revision:	0
			Seite:	9 / 31

$\tilde{u}_x$	V	Spannungseffektivwert am Ausgang des Verstärkers (KG) bei der Frequenz $f_{\text{mess}}$
$\varphi_{ua}$	1°	Phasenverschiebewinkel zwischen Ausgangssignal des BA und anregender Beschleunigung
BA		Beschleunigungsaufnehmer
BN		Bezugsnormal
BNME		Bezugsnormalmesseinrichtung
BtB		Back-to-Back (Rücken-an-Rücken-Ankopplung)
IEPE		Integrated Electronics Piezo Electric
CCLD		Constant Current Line Drive (Konstant-Gleichstrom-Speisung)
KG		Kalibriergegenstand
SE		Single Ended (einseitige Ankopplung)

### 3 Kalibrierverfahren

#### 3.1 Grundlagen

Wie in Abschnitt 1 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 3.2) oder Multisinus (Abschnitt 3.33.3)]
- in der Art der Messwertgewinnung und –verarbeitung
  - Frequenzselektive Verfahren wie z. B.
    - digitale Filterung und Effektivwertbildung (Abschnitt 3.5.1)
    - Sinus-Approximation (Abschnitt 3.5.2)
    - Sinus-Korrelation (Abschnitt 3.5.3)
    - 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 4.4)
- im Kalibrierablauf (Abschnitt 4.5)
- 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 (mit Ladungsausgang) unter Verwendung eines piezoelektrischen BA-Normals in Rücken-an-Rücken-Ankopplung zeigt Abbildung 1.

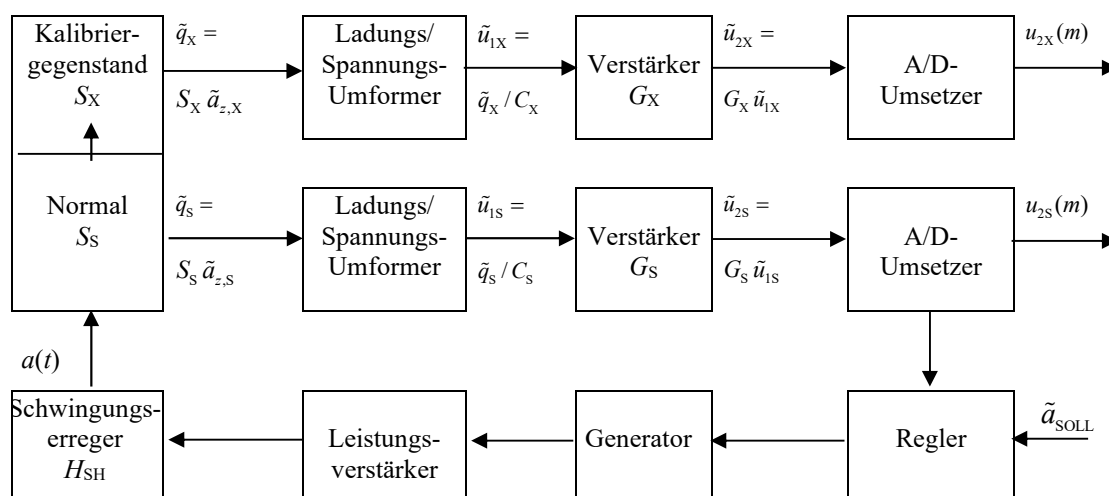



Abbildung 1: Blockschaltbild einer Kalibriereinrichtung

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	11 / 31

Sofern einer der beteiligten Beschleunigungsaufnehmer nach einem anderen Messprinzip arbeitet, muss in Abbildung 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.

### 3.2 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 3.5) der Effektivwert  $\tilde{a}_{z,S,\text{ist}}$  des Beschleunigungssignals  $a(t)$  errechnet und ggf. einem Regler zugeführt. Dieser vergleicht den Istwert (Reglereinganggröße) 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  $u_{2X}(mT_a) = u_{2X}(m)$  erfasst. Unter Einbeziehung der Übertragungskoeffizienten beider Verstärkerkanäle und des bekannten Übertragungskoeffizienten des BA-Normals (alle Werte für die Frequenz  $f_{\text{mess}}$ ) wird daraus in geeigneter Weise der Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes berechnet.

Handelt es sich beim Kalibriergegenstand um ein Schwingungsmessgerät (mit Anzeige), muss der angezeigte Messwert der Messgröße des Schwingungsmessgeräts (Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Schwingweg) mit der mittels Bezugnormal bestimmten Referenzgröße verglichen werden.


### 3.3 Erregung mit Multisinussignal

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

$$a(t) = \sum_{k=1}^M \hat{a}_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k) \quad (5)$$

Darin sind:

- $k$  ein Laufindex von 1 bis  $M$  über die angeregten Frequenzkomponenten
- $f_k$  die Reihe der (simultan) im Multisinussignal angeregten Frequenzen
- $\hat{a}_k$  die Beschleunigungsamplitude der  $k$ -ten Anregungsfrequenz

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	12 / 31

$\varphi_k$  der Phasenverschiebungswinkel der  $k$ -ten Anregungsfrequenz (typischerweise mittels Zufallsgenerator erzeugt)

Weiterhin wird mit  $N$  die Anzahl der von Null verschiedenen Beschleunigungsamplitudenwerte bezeichnet. Für die Gesamtheit aller Amplitudenwerte, normiert auf den größten vorkommenden Wert, ist die Bezeichnung *Beschleunigungsprofil* eingeführt.

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  $M$  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 Phasen 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  $M$  Effektivwerte errechnet. Damit steht am Ausgang jedes Kanals je ein Vektor mit  $M$  Effektivwerten zur Verfügung.

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

Grundsätzlich können anstelle von Effektivwerten auch Kenngrößen (Amplitude) aus den anderen Verfahren (siehe 3.5.2, 3.5.3) genutzt werden, falls das Kalibriersystem und die Datenauswertung darauf ausgelegt sind.

### 3.4 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	13 / 31

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.

### 3.5 Messwertverarbeitung

#### 3.5.1 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.

#### 3.5.2 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 Amplituden der beiden Signalspannungen bei der Frequenz  $f_{\text{mess}}$

$T_a$  die Abtastperiode (Probenabstand)

$\varphi_S, \varphi_X$  die Nullphasenwinkel beider Signale

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

$$\frac{\underline{u}_X}{\underline{u}_S} = \underline{R} = \frac{\hat{y}_X}{\hat{y}_S} e^{j(\varphi_X - \varphi_S)} \quad (10)$$

	<b>Kalibrierung von</b> <b>Beschleunigungsmessgeräten nach dem</b> <b>Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus-</b> <b>Anregung</b>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
	<a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	14 / 31

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, taktasynchrone 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  $f_{\text{mess}}$  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.

### 3.5.3 Ergebnisbildung durch Sinus-Korrelation

Bei der Sinus-Korrelation wird das klassische Fourier-Integral

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\omega}^{\omega} f(t)\cos(\omega t) dt - j \int_{-\omega}^{\omega} f(t)\sin(\omega t) dt \quad (11)$$

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  $f_{\text{mess}}$  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 Kalibriereinrichtungen

### 4.1 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.

**Tabelle 1:** Beispiele von Schwingungserregern für Kalibrierzwecke

Bezeichnung	Lagerung / Maximaler Hub & Kraftvektor <sup>*)</sup>	Frequenz- bereich <sup>**)</sup>	Kopfmateri- al	Maximale Last KG <sup>***)</sup>	Normal
Typ A: Mittelfrequenz- erregere	Membran- oder federgelagert 8 ... 13 mm 45 ... 120 N	2 Hz ... 10 kHz	Magnesium, Aluminium, Edelstahl	0,5 kg	Back-to-Back Normal, internes BA- Normal
Typ B: Hochfrequenz- erregere	Luftgelagert 6 ... 10 mm 50 ... 100 N	5 Hz ... 20 kHz (50 kHz)	Beryllium, Technische Keramik	0,5 kg	Back-to-Back Normal, internes BA- Normal
Typ C: Tief frequenz- erregere / Langhuberregere	Luftgelagert 25 ... 450 mm 100 ... 500 N	0,05 Hz ... 400 Hz	Aluminium	50 kg	Back-to-Back Normal, internes BA- Normal

\*) 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 3.2).

\*\*\*) bei Nutzung der Maximallast werden die oberen Frequenzgrenzen herabgesetzt

Bei Rücken-an-Rücken-Ankopplung wird die maximale Belastung durch den Kalibriergegenstand zusätzlich durch das verwendete BA-Normal begrenzt (siehe Tabelle 2).


#### 4.1.1 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 Schwingungserregere mit einem großen Masseblock fest verbindet (z. B. Beton).

Bei Verwendung eines Typ-C-Erregers, kann die Summe der bewegten Massen durchaus einige Kilogramm betragen. Da die Basismasse nicht weniger als das 2 000-fache der bewegten Masse betragen sollte, erhält man, bei einer bewegten Masse von z. B. 1 kg eine Mindestmasse des Fundaments von 2 000 kg. Benutzt man Beton mit einer Dichte von 2,6 t/m<sup>3</sup>, so ergibt das ein Mindestvolumen von etwa 0,8 m<sup>3</sup>. Der Betonblock sollte nach Möglichkeit im Erd- oder Kellergeschoß mit einer Dämmschicht auf gewachsenem Boden aufgebracht und gegen die Umgebung isoliert werden.

Bei Verwendung der Erregere des Typs A und B, mit deutlich geringeren bewegten Massen, kann auch ein massiver Stahltisch eingesetzt werden. Um Kippbewegungen und Resonanzen auszuschließen, haben sich dreibeinige Stahltische mit Höhenverstellung bewährt.



	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	16 / 31

Des Weiteren muss beachtet werden, dass alle Erreger auf einer möglichst ideal planen Oberfläche verschraubt werden. Bei balligen Oberflächen kann eine Verbiegung der Erregergrundplatte zu unerwünschten Querbeschleunigungen, sowie zu einer Fehlfunktion der Luftlager der Erreger führen.

#### 4.1.2 *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.

#### 4.2 **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.



**Tabelle 2:** Beispiele von Beschleunigungsaufnehmer-Normalen

Bezeichnung	Konstruktion	Frequenzbereich in Hz	Übertr.- Koeffizient in pC/(m/s <sup>2</sup> ) bzw. in mV/(m/s <sup>2</sup> )	Masse in g	Max. Last (KG) in g
Quarz Kompressionstyp, Ladungsausgang (Typ I)	BtB / SE	10 bis 5 000 **)	0,13	45 / 30	50 / -
Keramik Kompressionstyp Ladungsausgang (Typ II)	BtB / SE	10 bis 20 000	0,22	40 / 20	50 / -
Kristallbasierender Schertyp, IEPE-Ausgang (Typ III)	BtB	1 bis 5 000	10	180	250
Quarz Schertyp, IEPE-Ausgang (Typ IV)	SE *)	3 bis 20 000	1	80	-
Kristallbasierender Schertyp IEPE-Ausgang (Typ V)	SE *)	5 bis 20 000	20	200, inkl. Schwingteil	-
Variable Kapazität Spannungsausgang (Typ VI)	SE *)	0 bis 400	80 ... 100	10	-
Servo-BA (Typ VII)	SE	0 bis 200	skalierbar	50	-

\*) im Schwingteil des Schwingungserregers integriert

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

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

### 4.3 Elektronik

Jeder der beiden Messkanäle (s. Abbildung 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 Kalibrierungsaufgabe 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.

#### 4.4 Typische Kalibriereinrichtungen

Wie aus Tabelle 1 und Tabelle 2 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:

**Tabelle 3:** Beispiele für Bezugsnormal-Messeinrichtungen (BNME)

Bezeichnung	max. Masse des KG in g	Schwing- ungserreger gemäß Tabelle 1	BA-Normal gemäß Tabelle 2
Beschleunigungs-BNME 5 Hz bis 20 kHz	50	Typ B	Typ I, II, IV
Beschleunigungs-BNME 3 Hz bis 10 kHz	50	Typ A	Typ IV
Beschleunigungs-BNME 2 Hz bis 5 kHz	250	Typ A	Typ III
Beschleunigungs-BNME 0,05 Hz bis 400 Hz	50 000	Typ C	Typ VI, V


Zur Definition von Bezugs- und Gebrauchsnormalen s. DAkkS 71 SD 0 006 (ehemals DAkkS-DKD-4). Verbreitet werden – abgeleitet aus dem Arbeitsfrequenzbereich – auch folgende Bezeichnungen in der Schwingungsmess- und Kalibriertechnik verwendet:

- HF-Bereich: Kalibrierungen im Frequenzbereich oberhalb 10 kHz
- MF-Bereich: Kalibrierungen im Frequenzbereich 10 Hz bis 10 kHz
- TF-Bereich: Kalibrierungen im Frequenzbereich unterhalb 10 Hz

#### 4.5 Kalibrierablauf

Der typische Ablauf einer Kalibrierung besteht darin, zunächst den Übertragungskoeffizienten bei einer **Bezugsfrequenz** und anschließend bei  $(N-1)$  weiteren Frequenzen zu bestimmen. Dabei ist es üblich, die Frequenzen der Terzreihe gemäß DIN EN ISO 266 zu verwenden. Als Bezugsfrequenzen werden nach DIN ISO 16063-21, s. [1]  $f = 160$  Hz, 80 Hz, 40 Hz, 16 Hz und 8 Hz oder  $\omega = 1\,000$  s<sup>-1</sup>, 500 s<sup>-1</sup>, 250 s<sup>-1</sup>, 100 s<sup>-1</sup>, 50 s<sup>-1</sup> empfohlen. Die Bezugsfrequenz sollte in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet des Kalibriergegenstandes gewählt werden. 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 in Deutschland 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	19 / 31

ist von 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 DIN ISO 16063-21, s. [1] – 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)  $\text{m/s}^2$  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  $\text{V}/(\text{m/s}^2)$ ] die anregende Beschleunigung so zu wählen, dass keine Komponente der Messkette übersteuert wird.

Wird für die anregende Beschleunigung ein großer Wert gewählt (z. B. 100  $\text{m/s}^2$ ), so ist zu beachten, dass bei tiefen Frequenzen der maximal nutzbare Schwingweg des Schwingungserregers nicht überschritten wird (Beachtung der maximal zulässigen Wegamplitude des Erregers). 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,  $a$  ggf. zusätzlich 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)

Eine grafische Anzeige des zeitabhängigen Messsignals, der ermittelten Übertragungskoeffizienten sowie eine Anzeige der momentanen Standardabweichung der Messung während des Kalibriervorgangs ist sinnvoll, da sie wertvolle Aussagen zur Qualität des Systems und des Kalibriergegenstandes liefert.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	20 / 31

#### 4.6 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 oder Steckverbindungen sind elektrisch defekt.
- Keine Verwendung von rauscharmen Kabeln bei Aufnehmern mit Ladungsausgang (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.

## 5 Vorbereitung und Durchführung der Kalibrierung


### 5.1 Vorbereitende Maßnahmen

#### 5.1.1 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 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.)

	<b>Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	21 / 31

- 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

## 5.1.2 *Adaptierung der Aufnehmer*

### 5.1.2.1 *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, IEPE). 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 5.1.1 zu prüfen.
- Da die zulässige Gesamtmasse für BA-Normal und Schwingteil begrenzt sind, ist darauf zu achten, dass die Massebelastung in den spezifizierten Grenzen bleibt.
- Als Klebeverbindungen sind z. B. geeignet:
  - Klebewachs (bis maximal 5 kHz)
  - Cyanoacrylat (Sekundenkleber)
Die Schichtdicke ist so dünn wie möglich auszuführen.
- Sonderadaptierungen und -aufbauten sind zu dokumentieren (z. B. Foto).
- 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.
- Weitere Hinweise in DIN ISO 5348 [2] sind zu beachten.

	<b>Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</b>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
	<a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	22 / 31

### 5.1.2.2 *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 Schwingteils verhindern soll. Gebräuchlich sind jedoch geringere Drehmomente im Bereich 2 N·m bis 2,5 N·m.

Wird beispielsweise 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.

In jedem Fall sind bzgl. der Montagedrehmomente die Herstellerangaben zu berücksichtigen.

## 5.2 *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 C muss von horizontalem auf vertikalen Betrieb umgerüstet werden)
- Kalibriergegenstand erfordert den Bau eines speziellen mechanischen Adapters

## 5.3 *Durchführung der Kalibrierung*


Die Durchführung 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. Dies sind zum Beispiel folgende Schritte:

### 5.3.1 *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 <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	23 / 31

### 5.3.2 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)

### 5.3.3 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

### 5.3.4 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 in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Die Temperaturdaten sind manuell oder automatisch in den Kalibrierschein einzufügen.

### 5.3.5 Messungen 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.

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.

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

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.

	<b>Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</b>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
	<a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	24 / 31

### 5.3.6 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, stetigen Verlauf, gekennzeichnet durch für Querreresonanzen 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. Aus dem Messprotokoll kann anschließend unter Festlegung einer Kalibrierscheinnummer ein Kalibrierschein erzeugt werden. Bezüglich Kalibrierschein s. Abschnitt 9.

## 6 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

## 7 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 oder elektromagnetische Störquellen in der Nähe?
- Werden durch die Klimatisierung die geforderten Bereiche für Temperatur, relative Luftfeuchte eingehalten?
- Ist eine sinnvolle Konstruktion, Oberflächengüte und Materialwahl der Adaptionen gegeben?
- Liegen die Resonanzfrequenzen des Aufbaus außerhalb der Kalibrierfrequenzen?
- 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?




	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	25 / 31

- 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 gemeinsam mit dem  $C_{SM}$  des BA-Normals auf der Achse der mechanischen Anregung?
- 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?

## 8 Messunsicherheit

Die grundlegende Vorgehensweise zur Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz ist in Blatt 1 dieser Richtlinie erläutert. Im Folgenden sollen Aspekte beleuchtet werden, die für die Kalibrierung mit Sinusanregung nach dem Vergleichsverfahren relevant sind.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	26 / 31

## 8.1 Modellgleichung

Das Modell der Auswertung einer Vergleichskalibrierung zur Bestimmung des Übertragungskoeffizienten kann in Anlehnung an Blatt 1 dieser Richtlinie folgendermaßen formuliert werden:

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

Dabei sind folgende Größen des Messprozesses frequenzabhängig zu betrachten:

Ergebnisgröße:

$$Y = S_X \quad \begin{array}{l} \text{Ergebnis, Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes (KG)} \\ \text{Beschleunigungsaufnehmer **ohne** Verstärker} \end{array}$$

2

Eingangsgrößen:

$$X_1 = S_S \quad \text{Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmer (BA) – Normals}$$

$$X_2 = G \quad \text{Verhältnis der Verstärkerübertragungskoeffizienten } G = G_S / G_X$$

$$X_3 = R \quad \text{Verhältnis der Ausgangsspannungen } R = V_X / V_S$$

3

Einflussgrößen:

$$X_4 = K_f \quad \text{Korrektionsfaktor Frequenzgang}$$

$$X_5 = K_T \quad \text{Korrektionsfaktor Querbewegung}$$

$$X_6 = K_D \quad \text{Korrektionsfaktor Oberwellen}$$

$$X_7 = K_H \quad \text{Korrektionsfaktor Brummen}$$

$$X_8 = K_N \quad \text{Korrektionsfaktor Rauschen}$$

$$X_9 = K_B \quad \text{Korrektionsfaktor Basisdehnung}$$

$$X_{10} = K_{MT} \quad \text{Korrektionsfaktor Aufnehmermontage}$$

$$X_{11} = K_{MC} \quad \text{Korrektionsfaktor Kabelmontage}$$

$$X_{12} = K_{Rel} \quad \text{Korrektionsfaktor Relativbewegung}$$

$$X_{13} = K_{TK} \quad \text{Korrektionsfaktor Temperaturänderung}$$

$$X_{14} = K_L \quad \text{Korrektionsfaktor Nichtlinearität/Linearitätsabweichung}$$

$$X_{15} = K_I \quad \text{Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität des BA-Normals}$$

$$X_{16} = K_{Res} \quad \text{Korrektionsfaktor Residuale Einflüsse (z. B. Magnetfeldeinflüsse)}$$

$$X_5 = K_{I,G} \quad \text{Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität der Verstärkerübertragungs-} \\ \text{koeffizienten}$$


$$X_6 = K_{I,R} \quad \text{Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität des Analog-Digital-Umsetzers (ADU)}$$

4

<sup>2</sup> Ergebnisgröße

<sup>3</sup>  $N'$  Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ergebnisgröße  $N' < N$

<sup>4</sup>  $N$  Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit  $N' < N$

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
		Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	27 / 31

Je nach individuellem Aufbau und lokalen Gegebenheiten können einzelne Komponenten vernachlässigbar (klein) sein oder die Betrachtung weiterer, hier nicht aufgeführter Komponenten notwendig sein.

Für die Betrachtung der Messunsicherheit der Phasenverschiebung sind grundsätzlich die gleichen Effekte in Betracht zu ziehen, wie für den Betrag des Übertragungskoeffizienten. Zusätzlich können rein zeitliche Aspekte, wie ein Jitter der Datenerfassung oder die gewählte Abtastrate zusätzlichen Einfluss auf die Messunsicherheit haben. Für die Phasenverschiebung sind gemäß Gleichung (9) in Blatt 1 dieser Richtlinie Summanden an Stelle der oben genannten Faktoren zu betrachten.

Ist der Kalibrierggegenstand ein Schwingungsmessgerät mit Anzeige, so ist die Ergebnisgröße die Anzeigeabweichung. Als Messunsicherheitsmodell ergibt sich dann ein Summen -Modell. Prinzipiell wirken die gleichen Einflüsse, wie bei der Kalibrierung eines Aufnehmers. Insbesondere bei den Einflüssen, die von den Verstärkern und den AD-Umsetzern ausgehen, müssen die Wirkmechanismen überdacht werden.

## 8.2 *Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz*

### 8.2.1 *Spezifikation von BNME, BA-Normal und Kalibrierggegenstand*

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“ Kalibrierggegenstand ausgewählt.

*Kalibriereinrichtung:* Beschleunigungs-BNME 10 Hz bis 10 kHz  
*Normal:* Typ I gemäß Tabelle 2,

*bester (nahezu idealer) Kalibrierggegenstand:* Typ II gemäß Tabelle 2,

### 8.2.2 *Messunsicherheitsbilanz – Beispielwerte*

Im Folgenden sind relative Messunsicherheitskomponenten, wie sie gemäß Blatt 1 der Richtlinie für die Betrachtung des Betrags des Übertragungskoeffizienten verwendet werden, mit dem Buchstaben  $w$  bezeichnet.

Die in diesem Beispiel in Tabelle 4 verwendeten Zahlenwerte sind nicht allgemeingültig und müssen in den allermeisten Fällen für die jeweilige Bezugs-Normal-Messeinrichtung und ggf. auch für einzelne Arbeitspunkte der Einrichtung individuell bestimmt werden.

**Tabelle 4:** Messunsicherheitsbilanz, kleinste angebbare Messunsicherheit, enthalten in den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMC), für die Kalibrierung eines BA bei  $f = 160$  Hz,  $a_{z,S} = 100$  m/s<sup>2</sup>

lfd. Nr.	Größe	Schätzwert	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	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 <sup>2</sup> )	$1,4 \cdot 10^{-3}$	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 <sup>2</sup> )	$w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$		$3,1 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-6}$
	$S_S$		$W(S_X) = k \cdot w(S_X)$ $k = 2$		$6,2 \cdot 10^{-3}$	
Angabe des vollständigen Messergebnisses			$S_X = 0,206$ pC/(m/s <sup>2</sup> ) $\pm 0,62$ %			

### 8.2.3 Analyse der Messunsicherheitsbilanz

Im Sinne einer Optimierung des Kalibrierprozesses, der Bezugs-Normal-Messeinrichtung oder der Rückführungskette ist eine Analyse der Messunsicherheitsbilanz nach der Größe der Einflüsse sinnvoll. In Abbildung 2 sind die im Beispiel verwendeten Komponenten exemplarisch in Form eines Säulendiagrammes aufgetragen. Anhand der Darstellung wird schnell klar, dass sich nur bei wenigen Einflussgrößen aus einer Verringerung der Komponente auch eine signifikante Reduzierung der kombinierten Messunsicherheit ergibt.

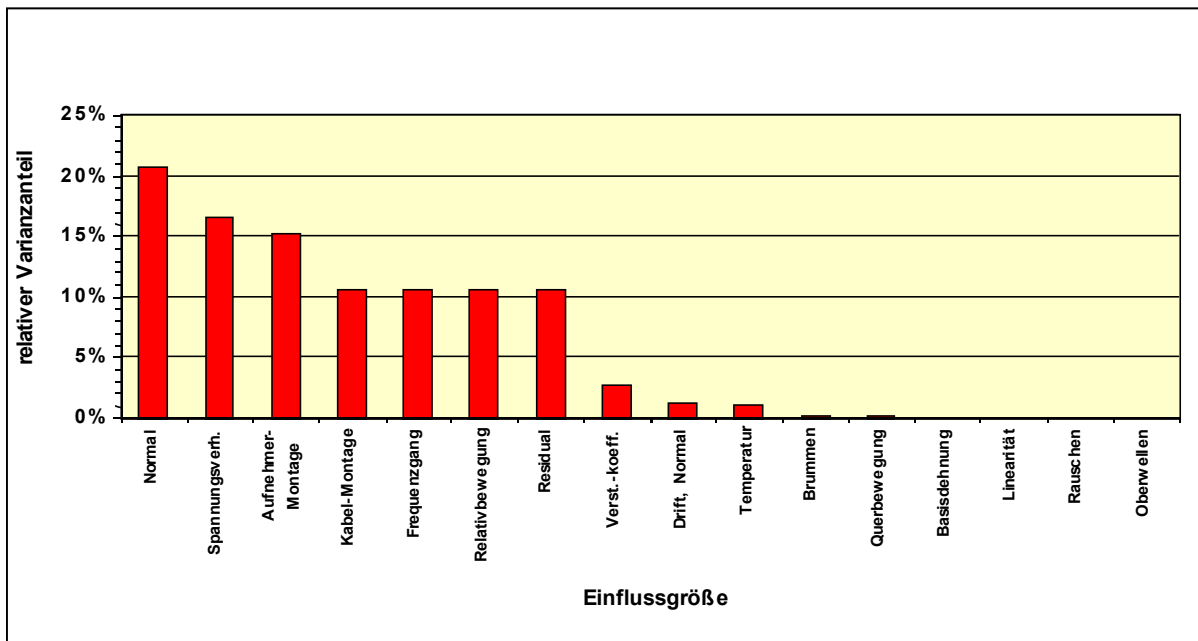



Abbildung 2: Varianzanteile der einzelnen Einflussgrößen an der Gesamt-Messunsicherheit

## 9 Angaben im Kalibrierschein

Die in DAkKS-DKD-5<sup>5</sup> aufgelisteten Angaben sind um folgende Punkte zu erweitern, sofern diese für die durchgeführte Kalibrierung relevant sind:

- Messbedingungen
  - Lage des Kalibriergegenstandes im Erdschwerefeld und Achsbezeichnung bei mehrachsigen Kalibriergegenstand
  - Befestigungsart, bei Verschraubung mit Angabe des Drehmoments
  - Anschlusskabel (Hersteller, Typ, Länge, Kapazität, Steckverbinder)
  - Anregungsdaten bei Bezugsfrequenz (Bezugsfrequenz, Amplitude oder Effektivwert der Beschleunigung)
  - Eckwerte für Frequenzgangermittlung (Frequenzbereich, 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.

<sup>5</sup> Wird ersetzt durch DAkKS 71 SD 0 025 in Verbindung mit DIN EN ISO/IEC 17025:2018.

	<b>Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinus- Anregung</b>	DKD-R 3-1 Blatt 3	
	<a href="https://doi.org/10.7795/550.20200527">https://doi.org/10.7795/550.20200527</a>	Ausgabe:	05/2020
		Revision:	0
		Seite:	30 / 31

Phasenverschiebungswinkel / Abweichung zur Bezugsfrequenz in %, ggf. in dB bzw. in °. Bei Linearitätsmessungen ist die Tabelle entsprechend abzuändern, ggf. ist eine Einwertangabe mit Gültigkeitsbereich zu bestimmen (vgl. DKD-R 3-1 Blatt 2). Voraussetzung dafür ist eine ausreichend große Anzahl von Messwerten bei verschiedenen Beschleunigungsamplituden.

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. Klirrfaktoren.

## 10 Literatur

Ergänzend zu den Literaturangaben in Blatt 1 dieser Richtlinie ist hier nur die für die Sinuskalibrierung spezifische Literatur aufgeführt:

- [1] **DIN ISO 16063-21:2016:** *Verfahren zur Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern – Teil 21: Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger*, DIN, Berlin, D
- [2] **DIN ISO 5348:1999:** *Mechanische Schwingungen und Stöße - Mechanische Ankopplung von Beschleunigungsaufnehmern*, DIN, Berlin, D
- [3] **Dubbel:** *Taschenbuch für den Maschinenbau*; Hrsg.: W. Beitz und K.-H. Grothe, Springer-Verlag, 20. Auflage, 2001, ISBN 3-540-67777-1
- [4] **P. Händel,** *Evaluation of a standardized sine wave fit algorithm*, 2000 IEEE Nordic Signal Processing Symposium, Kolmården, Sweden, 13-15 June 2000, pp. 453-456, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.35.3486>
- [5] **Müller, H.:** *Stoßförmige Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren*, Dissertation, TU Braunschweig und VOLKSWAGEN AG Wolfsburg, Mai 2001; veröffentlicht auch unter <http://opus.tu-bs.de/opus/volltexte/2001/227/>



Herausgeber:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Deutscher Kalibrierdienst  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

[www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)