

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**Richtlinie
DKD-R 3-1**

**Kalibrierung von
Beschleunigungsmessgeräten
nach dem Vergleichsverfahren**


Blatt 4

Primärkalibrierung von Schwingungs-
messgeräten mit sinusförmiger Anre-
gung und interferometrischer Mes-
sung der Schwingungsgröße

Ausgabe 09/2018

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



	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2 / 30


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 Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3 / 30

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 4, Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometrischer Messung der Schwingungsgröße, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.


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

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 2005 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.


	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	4 / 30

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORWORT	6
2	ANWENDUNGSBEREICH	6
3	SYMBOLS UND BENENNUNGEN	7
4	KALIBRIERVERFAHREN	9
4.1	Grundlagen	9
4.2	Erzeugung des Erregersignals	12
4.3	Interferometrische Messung der Anregungsgröße	12
4.4	Methoden der Messwertverarbeitung	13
4.4.1	Kontinuierliche Ergebnisbildung	13
4.4.2	Ergebnisbildung durch Sinus-Approximation	14
4.4.3	Bewertung der beiden Verfahren	14
5	KALIBRIEREINRICHTUNGEN	14
5.1	Schwingungserreger für die Kalibrierung	14
5.1.1	Auswahl des Schwingungserregers	14
5.1.2	Aufstellung des Schwingungserregers	16
5.1.3	Entkopplung von Schwingungserreger und Laseroptik	16
5.1.4	Quer-, Kipp- und Taumelschwingungen des Schwingteils	16
5.2	Referenz-Laservibrometer	16
5.3	Elektronik	17
5.4	Standard Kalibriereinrichtungen	18
5.5	Parameter eines typischen Kalibrierablaufs	18
6	VORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG DER KALIBRIERUNG	19
6.1	Bestimmung der Kalibrierfähigkeit	19
6.2	Adaptierung des (klassischen) Aufnehmers	19
6.2.1	Allgemeine Hinweise	19
6.2.2	Spezielle Hinweise	19
6.2.3	Adaptierung des Laserstrahls bei Kalibrierung von klassischen BA	19
6.3	Adaptierung beider Laserstrahlen bei der Kalibrierung von Laservibrometern	20
6.4	Spezielle Vorbereitungen	20
6.5	Ablauf der Kalibrierung	20
6.5.1	Globale Grundeinstellungen vornehmen	20
6.5.2	Spezielle Grundeinstellungen vornehmen	20
6.5.3	Testbeschreibung erstellen	21
6.5.4	Umgebungstemperatur	21
6.5.5	Kalibrierung durchführen	21
6.5.6	Kalibrierung bewerten	21
7	WARTUNG UND KONTROLLE	22
8	MESSUNSICHERHEITSBETRACHTUNGEN	22

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5 / 30

8.1	Darstellung der Einflussgrößen	22
8.2	Modell	22
8.3	Abweichungsspanne W'	24
8.4	Ermittlung der Messunsicherheit (KG ist BA)	24
8.4.1	Spezifikation von NME und Kalibriergegenstand	24
8.4.2	Messunsicherheitsanalyse (Budgettabelle / Betrag, allgemein)	25
8.4.3	Spezielles Messunsicherheitsbudget (Betrag)	26
8.5	Ermittlung der Messunsicherheit (KG ist ein Referenz-Laservibrometer)	27
9	ANGABEN IM KALIBRIERSCHEIN	28
10	AUFZEICHNUNGEN IM KALIBRIERLABORATORIUM	28
11	LITERATUR	29

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	6 / 30

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 Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Kraft und Beschleunigung* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2005 erstellt. Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum. Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 3-1, Blatt 4 (Ausgabe 2010).

Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 3-1, Blatt 4 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 02/2005 veröffentlicht vom DKD

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

Hinweis:


Diese Richtlinie stützt sich in vielen allgemeinen Ausführungen auf die Richtlinien DKD-R 3-1, Blatt 1 [2] und Blatt 3 [3]. Im Interesse einer Konzentration auf die für die Primärkalibrierung wichtigen Punkte wird deshalb bei untergeordneten Details auf diese beiden Richtlinien verwiesen.

2 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie bezieht sich auf **Primär-Kalibrierverfahren** nach ISO 16063-11 [1], bei denen eine sinusförmige Anregung mit einem vorzugsweise elektrodynamischen Schwingungserreger erzeugt und die Schwingungsgröße **interferometrisch** nach Verfahren 3 (Sinus-Approximation) gemessen wird. Sie gilt für die Kalibrierung von **Schwingungsaufnehmern**, **Schwingungsmessgeräten** und **Schwingungskalibratoren**.

Schwingungsaufnehmer im klassischen Sinne (elektromechanische Schwingungsaufnehmer) formen eine der kinematischen Größen *Schwingbeschleunigung*, *Schwinggeschwindigkeit* oder *Schwingweg* in ein elektrisches Signal um (Ladung, Spannung, Widerstandsänderung usw.). Laservibrometer werden bezüglich der analogen oder digitalen Ausgänge (sofern vorhanden und benutzt) im Rahmen dieser Richtlinie wie ein Schwingungsaufnehmer behandelt. Die handelsübliche Bezeichnung *Laservibrometer* ist für diesen Anwendungsfall aus metrologischer Sicht nicht korrekt, da keine eigene Anzeige vorhanden ist.

Ein **Schwingungsmessgerät** zeigt ein Messergebnis an. Dieses wird in Beziehung gesetzt zu der von der Normalmesseinrichtung bereitgestellten Schwingungsgröße. Laservibrometer mit eigener Anzeige werden wie ein Schwingungsmessgerät behandelt.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	7 / 30

Stellt ein **Schwingungskalibrator** eine der genannten kinematischen Größen bereit, dann wird diese Größe in Beziehung gesetzt zu der von der Normalmesseinrichtung gemessenen Schwingungsgröße.

Unabhängig davon, ob der Schwingungsaufnehmer oder das Schwingungsmessgerät ein der Schwingbeschleunigung, der Schwinggeschwindigkeit oder dem Schwingweg proportionales Signal liefert, wird in dieser Richtlinie stellvertretend für alle drei Schwingungsgrößen die physikalische Größe **Beschleunigung** als Messgröße behandelt.

Bei sinusförmiger Anregung lassen sich die Amplituden des Schwingweges \hat{s} , der Schwinggeschwindigkeit \hat{v} und der Beschleunigung \hat{a} ineinander umrechnen, gemäß

$$\hat{v} = \omega \hat{s} \quad \hat{a} = \omega \hat{v} = \omega^2 \hat{s} \quad (1)$$

Gleiches gilt für die zugehörigen Nullphasenwinkel φ_s , φ_v und φ_a mit

$$\varphi_v = \varphi_s + \frac{\pi}{2} \quad \varphi_a = \varphi_v + \frac{\pi}{2} = \varphi_s + \pi \quad (2)$$


Die Phasenkalibrierung eines Vibrometers mit digitalem Ausgang ist in Spezialfällen denkbar, sie wird jedoch im Rahmen dieser Richtlinie nicht betrachtet.

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_x , S_x usw. werden im Allgemeinen als komplexe Größen \underline{A} beschrieben. Die komplexe Schreibweise


$$\underline{A} = A e^{j\varphi_A} \quad (3)$$

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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8 / 30

Symbol	Benennung
BA	Beschleunigungsaufnehmer (stellvertretend für beliebige Schwingungsaufnehmer)
BG	Bezugsgröße (Wellenlänge des Helium-Neon Laserlichtes)
VN	Laservibrometer als Bezugs-Normal (Referenz-Laservibrometer)
VX	Laservibrometer als Kalibriergegenstand
KG	Kalibriergegenstand
BtB	Back-to-Back (KG mit zwei Koppelflächen bzw. Rücken-an-Rücken-Ausführung)
SE	Single Ended (KG mit nur einer Koppelfläche)
CCLD	Constant Current Line Drive (Konstant-Gleichstrom-Speisung)
BNME	Bezugsnormalmesseinrichtung
$\hat{a}_{z,S}$	bei klassischen Beschleunigungsaufnehmern: Beschleunigungsamplitude, die bei der Frequenz f_{mess} auf oder neben dem KG interferometrisch bestimmt wird bei Laservibrometern: Beschleunigungsamplitude, die bei der Frequenz f_{mess} mit Hilfe des Laservibrometers VN bestimmt wird
$\hat{a}_{z,X}$	bei klassischen Beschleunigungsaufnehmern: Beschleunigungsamplitude, die bei der Frequenz f_{mess} auf den Kalibriergegenstand wirkt bei Laservibrometern: Beschleunigungsamplitude, die bei der Frequenz f_{mess} mit Hilfe des Laservibrometers VX bestimmt wird
C_{SM}	Schwerpunkt der seismischen Masse (Centre of seismic mass)
f_{res}	Resonanzfrequenz eines klassischen Beschleunigungsaufnehmers (im montierten Zustand)
\underline{G}_X	Übertragungskoeffizient des dem KG zugeordneten Verstärkers bei der Frequenz f_{mess}
\underline{H}_{SH}	Übertragungskoeffizient von Leistungsverstärker und Schwingungserreger in $(\text{m/s}^2)/\text{V}$ bei der Frequenz f_{mess}
\underline{S}_N	Übertragungskoeffizient des Laservibrometers VN bei der Frequenz f_{mess} z.B. (2,38 nm/s)/LSB
\underline{S}_X	Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes (KG) bei der Frequenz f_{mess}
$v_S(m)$, $v_X(m)$	digitaler m -ter Probenwert der Ausgangsgröße eines Laservibrometers VN oder VX mit digitalem Ausgang (vorzugsweise Geschwindigkeit) 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}_X	Spannungseffektivwert am Ausgang des Verstärkers (KG) bei der Frequenz f_{mess}
φ_{ua}	Phasenverschiebungswinkel zwischen Ausgangssignal des KG und anregender Beschleunigung

Tabelle 1: Symbole und Benennungen

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9 / 30

4 Kalibrierverfahren

4.1 Grundlagen

Wie in Abschnitt 2 erläutert, bezieht sich diese Richtlinie auf Kalibrierverfahren, bei denen eine sinusförmige Anregung mit einem vorzugsweise elektrodynamischen Schwingungserreger erzeugt und interferometrisch gemessen wird.

Die Unterschiede der Verfahren liegen

- im Kalibriergegenstand (Schwingungsaufnehmer, Schwingungsmessgerät, Schwingungskalibrator, Laservibrometer)
- in der Art der Messwertgewinnung und -verarbeitung
 - frequenzselektive Verfahren
 - breitbandige Verfahren
- im geforderten Frequenzbereich in Kombination mit der Masse (Abschnitt 5.4)
- im Kalibrierablauf (Abschnitt 5.5)
- in der speziellen Art der Ankopplung des Laserstrahls auf oder neben dem KG bzw. in der speziellen Art der Ankopplung der Laserstrahlen von Bezugsnormale und KG
- in der Automatisierbarkeit bzw. dem benötigten Zeitaufwand für eine Kalibrierung

Das Blockschaltbild einer Kalibriereinrichtung zur Kalibrierung von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, wahlweise in Single-ended- oder Back-to-Back-Ausführung, unter Verwendung eines Laservibrometers mit Ausgabe des digitalen Geschwindigkeitssignals zeigt beispielhaft Bild 1.

Der Kalibriergegenstand (KG) wird mit einem sinusförmigen Beschleunigungssignal erregt und gibt eine elektrische Größe (Ladung oder Spannung) ab, die einen Anpasser, einen Verstärker und einen Analog-Digital-Umsetzer durchläuft. Das Laservibrometer misst die unmittelbar **neben** dem KG (als SE-Aufnehmer eingesetzt) oder die **auf** dem KG (als BtB-Aufnehmer eingesetzt) wirkende Schwinggeschwindigkeit und stellt an seinem Ausgang das Signal $v(mT_a)$ bereit, wobei das hochfrequente Signal mit der Periode $T_a = 1/f_a$ taktsynchron den Analog-Digital-Umsetzer ansteuert, so dass im Falle der Phasenmessung der exakte Zeitbezug gewährleistet ist.

Die anregende Beschleunigungsamplitude wird durch einen Regelkreis bis auf eine minimale Restabweichung Δa konstant gehalten, wobei die Messung der Beschleunigungsamplitude wahlweise durch das Laservibrometer, den KG oder einen ggf. vorhandenen internen Schwingungsaufnehmer erfolgt.

Das digitale Beschleunigungssignal (das Laservibrometer liefert Geschwindigkeit oder Weg) ist zum Beispiel bei einem marktüblichen Laservibrometer ein auf 24 Bit binär kodiertes Signal mit Messbereichsendwerten von 20 mm/s, 100 mm/s und 500 mm/s. Dies entspricht einer maximalen Auflösung von $(2,38 \text{ nm/s}) / \text{LSB}$, so dass der dadurch verursachte Quantisierungsfehler zu vernachlässigen ist. Der Zusammenhang zwischen dem binären Geschwindigkeitssignal v_{dig} und der physikalischen Größe *Geschwindigkeit* v_{phys} ist gegeben durch

$$v_{\text{dig}}(mT_a) = S_N v_{\text{phys}}(mT_a + \Delta T) = \underline{S}_N v_{\text{phys}}(mT_a) \quad (4)$$

Darin ist ΔT eine vom Typ und von den Einstellungen des Laservibrometers abhängige konstante Verzögerungszeit und \underline{S}_N der komplexe Übertragungskoeffizient des Laservibrometers.

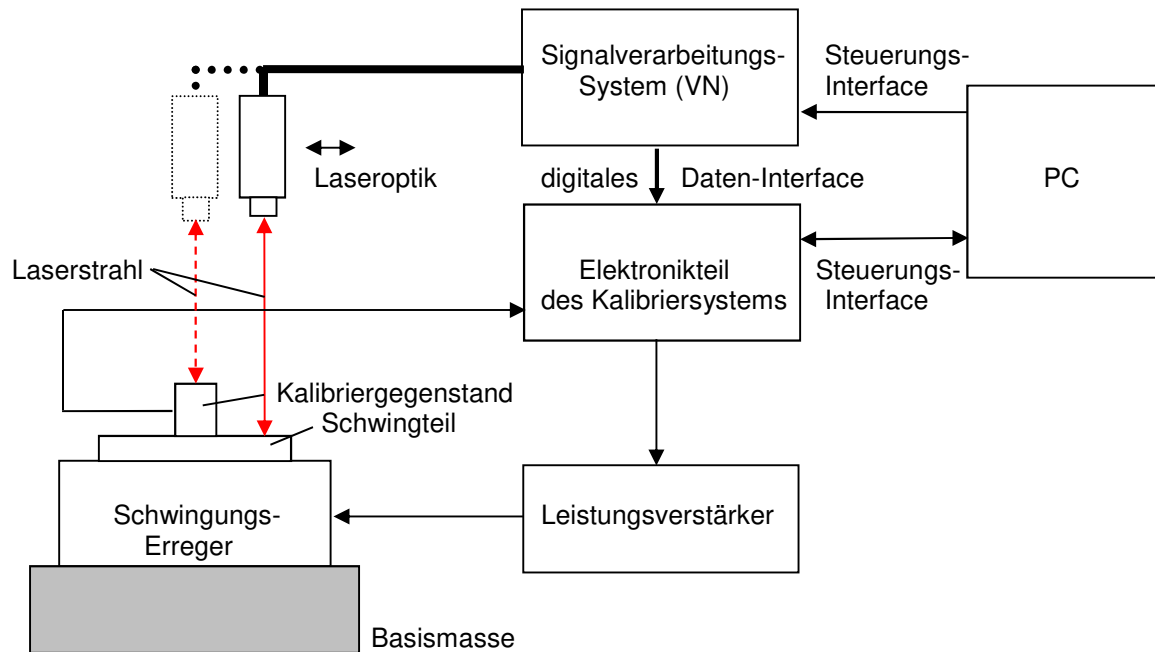



Bild 1: Blockschaltbild einer BNME zur Primärkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern (Beispiel)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11 / 30

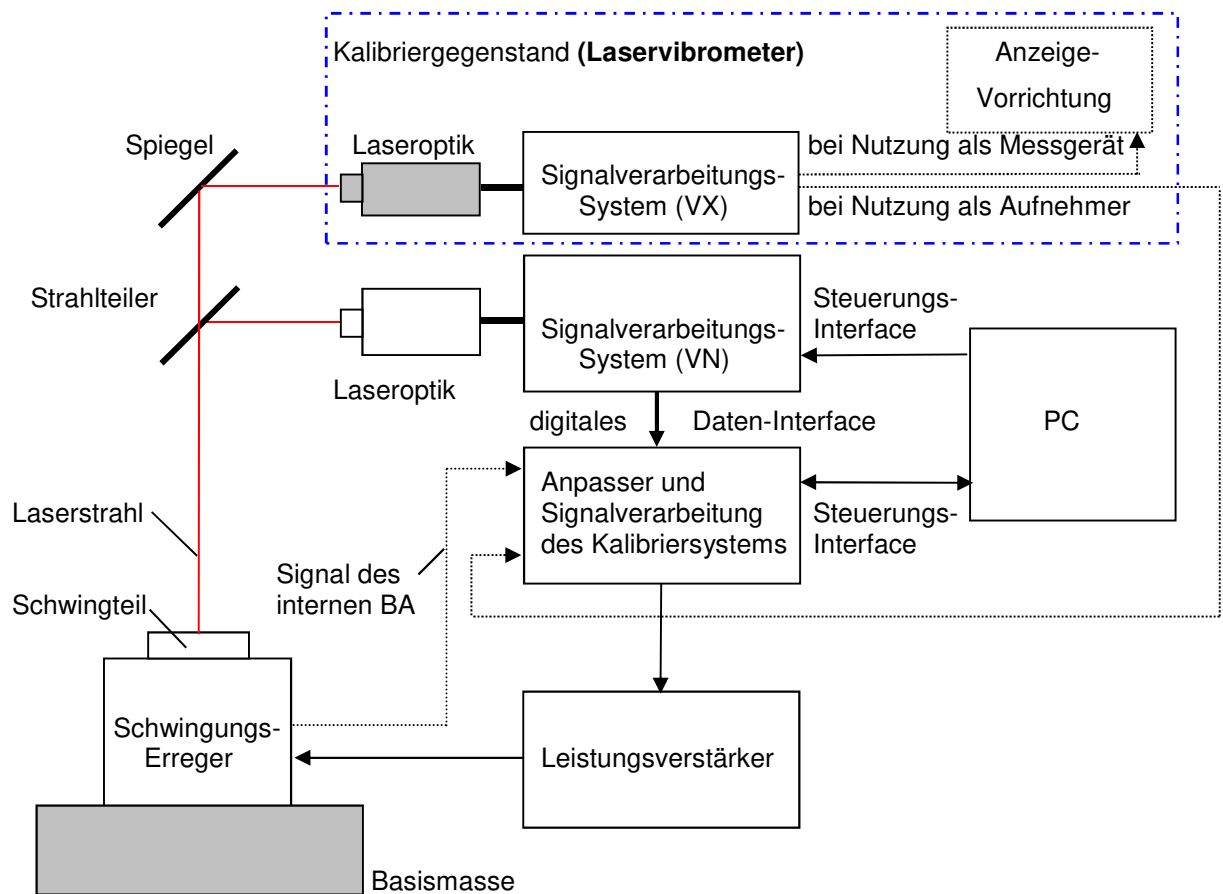


Bild 2: Blockschnittbild einer BNME zur Primärkalibrierung von Laservibrometern (Beispiel) Betrag S_X und Phasenverschiebungswinkel φ_X des komplexen Übertragungskoeffizienten \underline{S}_X des Kalibriergegenstandes ergeben sich zu (siehe auch [4]).


$$S_X = \frac{\hat{u}_X}{2\pi f \hat{v}_{\text{phys}} G_X} = \frac{S_N}{\omega G_X} \frac{\hat{u}_X}{\hat{v}_{\text{dig}}} \quad ; \quad \varphi_X = \varphi_U - \varphi_v - \varphi_{G_X} - 90^\circ \quad (5)$$

Bei der **Kalibrierung von Schwingungsmessgeräten** besteht die Aufgabe der BNME darin, ein konstantes Beschleunigungssignal bereitzustellen, dessen Größe bis auf eine Restabweichung Δa einer vorgegebenen Führungsgröße a_{ref} entspricht. Dies wird durch einen geeignet gestalteten Regelkreis erreicht.

Die Bestimmungsgleichung für den Betrag der Beschleunigung (Amplitude der Beschleunigung) lautet

$$\hat{a} = 2\pi f \hat{v}_{\text{phys}} = 2\pi f \frac{\hat{v}_{\text{dig}}}{S_N} \quad (6)$$

Bei der **Kalibrierung von Schwingungskalibratoren** besteht die Aufgabe der BNME darin, die vom Kalibriergegenstand (KG) bereitgestellte Schwingungsgröße interferometrisch zu messen. Ist die vom Kalibriergegenstand (KG) bereitgestellte Schwingungsgröße eine Beschleunigung, dann gilt Gl.(6), ansonsten ist eine entsprechende Umrechnung vorzunehmen.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	12 / 30

Ist der Kalibriergegenstand ein **Laservibrometer**, wie in Bild 2 beispielhaft dargestellt, so wird beim Kalibriervorgang eine vom Kalibriergegenstand (KG) angezeigte oder ausgegebene Größe in Beziehung gesetzt zu der von der Normalmesseinrichtung (BNME) ermittelten Beschleunigungsamplitude \hat{a}_N . Beide Werte und ein ggf. daraus berechneter Übertragungskoeffizient werden als Funktion der Frequenz und/oder der Anregungsamplitude gespeichert.

Wegen der ausgeprägten Richtungsselektivität des Laservibrometers und des nicht idealen Bewegungsverhaltens des Schwingungserregers ist es wichtig, dass beide Laserstrahlen koaxial bzw. in geringem Abstand parallel verlaufen und das Schwingteil praktisch im selben Punkt orthogonal treffen. Dies wird zweckmäßig mit Hilfe einer justierbaren Strahlumlenkeinrichtung, bestehend aus Spiegel und Strahlteilerwürfel, erreicht.

Die ordnungsgemäße optische Justierung des Kalibrieraufbaus lässt sich bei Vorhandensein von Indikatoren zur optischen Signalpegelanzeige an den Laservibrometern wie folgt kontrollieren:

- Beide Indikatoren erreichen die Maximalanzeige, wenn die Laserstrahlen die polierte Oberfläche des Schwingteils treffen.
- Beide Indikatoren zeigen kein Signal an, wenn die Oberfläche mit Licht schluckendem Material abgedeckt wird (z.B. Moosgummi unter 45° im Strahlengang).

Die Rückführung des Laservibrometers als Bezugsnormal auf das nationale Normal (NME) erfolgt in der PTB durch direkten Vergleich, indem die Laserstrahlen beider Vibrometer auf denselben Punkt des Schwingteils der NME fokussiert werden.

4.2 Erzeugung des Erregersignals

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

$$a(t) = \hat{a} \sin(2\pi f_{\text{mess}} t) \quad (7)$$

um, die auf den Kalibriergegenstand einwirkt. Bei tiefen Frequenzen weicht jedoch die Signalform je nach Typ des Schwingungserregers mehr oder weniger von der Sinusform ab. Durch Vorverzerrung des Treibersignals lässt sich eine Beschleunigung mit sinusförmiger Zeitabhängigkeit erreichen. Zu weiteren Details siehe Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

4.3 Interferometrische Messung der Anregungsgröße

Als Messsystem zur rückwirkungsfreien Erfassung des Absolutwertes der Anregungsgröße wird ein Laservibrometer eingesetzt, welches die Anforderungen an ein Referenzmessgerät nach ISO 16063-11 insbesondere zur digitalen Signalverarbeitung entsprechend Verfahren 3 (Sinus-Approximation) erfüllen muss [1]. Siehe dazu auch 5.2.

Laservibrometer ist eine gebräuchliche Bezeichnung für berührungslos arbeitende Schwingungsmessgeräte, die auf dem Prinzip der optischen Doppler-Interferometrie beruhen. Träger der Messinformation ist hier vom Messobjekt zurück gestreutes Licht. Hervorzuheben ist die Eigenschaft, nur die Bewegungskomponente zu erfassen, die mit der Einfallrichtung des scharf gebündelten Laserstrahls zusammenfällt. Es handelt sich somit um einen streng einachsigen, punktförmigen Aufnehmer (s. Bild 3).

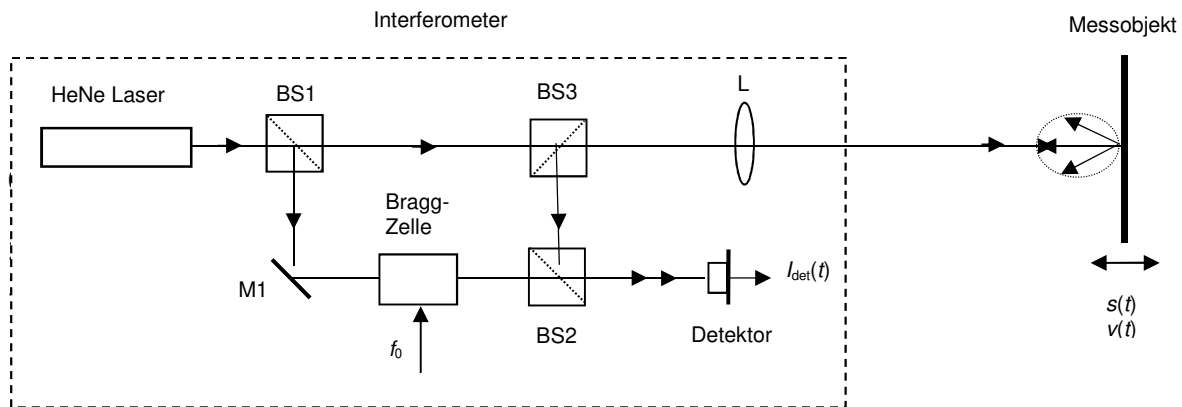


Bild 3: Schematischer Aufbau der interferometrischen Schwingungsmessung

Im Interferometer wird ein kohärenter Lichtstrahl in Referenz- und Messstrahl aufgespalten. Während der Referenzstrahl innerhalb des Interferometers bleibt, wird der Messstrahl auf die Oberfläche des schwingenden Messobjekts gerichtet. Dort erfährt die elektromagnetische Welle auf Grund des Doppler-Effekts eine Phasen- bzw. Frequenzverschiebung, die nach der Überlagerung mit der Referenzwelle am Photodetektor das elektrische Doppler-Signal erzeugt. Die zeitlichen Verläufe von momentaner Phase und Frequenz des Doppler-Signals sind mit den Zeitsignalen der Schwingungskenngrößen $s(t)$ und $v(t)$ über die einfachen Beziehungen

$$\Delta\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} s(t) \quad (8)$$

und

$$\Delta f(t) = \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (9)$$

verknüpft.


Mit Hilfe bekannter digitaler Demodulations-Verfahren nach ISO 16063-11 [1] kann aus der Modulation des Doppler-Signals das Schwingungssignal rekonstruiert werden. Da die exakt bekannte Laser-Wellenlänge λ als Maßverkörperung wirkt, können die Ergebnisse im Sinne einer Absolutmessung auf das internationale Einheitensystem (SI) zurückgeführt werden.

In Bild 3 ist beispielhaft ein Heterodyne-Interferometer in modifizierter Mach-Zehnder-Anordnung vereinfacht dargestellt, das in handelsüblichen Laservibrometern häufig verwendet wird. Mit Hilfe einer Bragg-Zelle wird hier ein Frequenz-Offset f_0 erzeugt, der im Signal des Fotodetektors als Trägerfrequenz für die Doppler-Modulation erscheint, aber nicht in das Messergebnis eingeht. Andere Interferometertypen können verwendet werden, sofern sie die störungsfreie Erfassung von Amplituden im nm-Bereich erlauben.

4.4 Methoden der Messwertverarbeitung

4.4.1 Kontinuierliche Ergebnisbildung

Für die Verarbeitung stehen das digitale Geschwindigkeitssignal $v(m)$ des Vibrometers und das am Ausgang des Analog-Digital-Umsetzers anstehende elektrische Signal $u(m)$ zur Verfügung. Diese Probenwerte werden in jedem der beiden Kanäle vorzugsweise zunächst einem Digitalfilter zugeführt, um das Signal von unerwünschten Störsignalen zu befreien. Auf das Filter kann verzichtet werden, wenn der Abstand von Nutz- zu Störsignal hinreichend groß ist.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	14 / 30

Die Folge der gefilterten Probenwerte wird, wie in [3] beschrieben, zum Effektivwert verarbeitet, der den zeitlich 1 bis 3 Messfrequenz-Perioden zurückliegenden Wert abbildet.

4.4.2 Ergebnisbildung durch Sinus-Approximation

Bei diesem Verfahren wird zunächst in beiden Kanälen taktsynchron je ein größerer Block von Probenwerten $v_N(mT_a)$ 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 $u(m)$ bzw. $v(m)$ 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

$$y_V(m) = y_{V0} + \hat{y}_V \sin(2\pi f_{\text{mess}} T_a m + \varphi_V) \quad (10)$$

$$y_U(m) = y_{U0} + \hat{y}_U \sin(2\pi f_{\text{mess}} T_a m + \varphi_U) \quad (11)$$

Darin sind

- y_{V0}, y_{U0} unvermeidbare, aber für das Ergebnis nicht relevante Offsetspannungen
- \hat{y}_V, \hat{y}_U die Amplituden beider Signale
- T_a die Abtastperiode (Probenabstand)
- φ_V, φ_U die Nullphasenwinkel beider Signale
- m m -ter Probenwert (Probenindex)

Führt man diese Größen in die Bestimmungsgleichung (5) ein, so folgt

$$S_x = \frac{S_N}{2\pi f G_x} \frac{\hat{y}_U}{\hat{y}_V} \quad \varphi_x = \varphi_U - \varphi_V + \varphi_{S_N} - \varphi_{G_x} - 90^\circ \quad (12)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Übertragungskoeffizienten des Verstärkerkanals und des Laservibrometers komplex zur Verfügung stehen, lässt sich mit Gl. (12) der komplexe Übertragungskoeffizient des zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmers ohne oder mit Signalkonditionierer bestimmen. Die Sinus-Approximation ist somit, taktsynchrone Abtastung vorausgesetzt, ein geeignetes Mittel zur Messung des komplexen Übertragungskoeffizienten. Auch hier wird ein maximal 1 bis 3 Perioden der Messfrequenz zurückliegender Messwert abgebildet [3].

4.4.3 Bewertung der beiden Verfahren

Die Sinus-Approximation liefert eine hohe Störgrößenunterdrückung (Oberwellen, höherfrequente Sinusstörungen, Rauschen) und ist unabdingbar, wenn der komplexe Übertragungskoeffizient zu bestimmen ist.


Wenn ein Störsignal in unmittelbarer Nähe der Messfrequenz liegt, liefert die digitale Filterung mit nachfolgender Effektivwertbildung (Abschnitt 4.4.1) eine bessere Störsignalunterdrückung.

5 Kalibriereinrichtungen

5.1 Schwingungserreger für die Kalibrierung

5.1.1 Auswahl des Schwingungserregers

Die bei einer Vergleichskalibrierung an die Schwingungserreger zu stellenden Forderungen sind in der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3] ausführlich beschrieben. Diese Forderungen gelten hier in verstärktem Maße, wobei zusätzlich eine möglichst geringe Ortsabhängigkeit der Schwingungsamplitude und -phase auf dem Schwingteil des Schwingungserregers im Bereich der Ankopplungsfläche zu fordern ist.


	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	15 / 30

Bezeichnung	Lagerung / max. Hub ^{*)} / max. Kraftvektor ^{*)}	Frequenz- bereich ^{**)} in Hz	Max. Last (KG) ^{***)} in g	Eignung
Elektro-dynamischer Erreger (Typ A)	Membran 12,7 mm 112 N	5 bis 5 000	500	bedingt
Elektro-dynamischer Erreger (Typ B)	Membran 8 mm 45 N	10 bis 10 000	50	bedingt
Elektro-dynamischer Erreger (Typ C)	Luft 10 mm 32 N	5 bis 20 000	200	geeignet
Langhuberreger ohne Gleittisch (Typ D)	Luft 155 mm 45 N	0,4 bis 160	800 / 1 000 (horizontal oder vertikal)	geeignet
Langhuberreger mit Gleittisch (Typ E)	Luft 155 mm 45 N	0,4 bis 160	2 000 (nur horizontal)	geeignet

Tabelle 2: Beispiele von Schwingungserregern und deren Eignung für Primärkalibrierungen

- *) 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.
- ***) bei Nutzung der Maximallast werden die oberen Frequenzgrenzen herabgesetzt

Die obenstehende Tabelle gibt beispielhaft eine Übersicht.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	16 / 30

5.1.2 Aufstellung des Schwingungserregers

Siehe dazu Abschnitt 5.1.1 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

5.1.3 Entkopplung von Schwingungserreger und Laseroptik

Durch die Bewegung des Schwingteiles entstehen Reaktionskräfte, die in die Basismasse des Systems eingeleitet werden. Diese können die Laseroptik oder einzelne Bauteile der Laseroptik zu Störbewegungen anregen, die zu erheblichen Messabweichungen führen können. Diesem Einfluss kann nur durch eine geeignete schwingungsisolierte Aufstellung der Laseroptik begegnet werden, eine Maßnahme, die auf den jeweiligen Frequenzbereich abzustimmen ist.

5.1.4 Quer-, Kipp- und Taumelschwingungen des Schwingteils

Siehe dazu Abschnitt 5.1.2 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].


5.2 Referenz-Laservibrometer

Das als Referenz-Messsystem eingesetzte Laser-Vibrometer besteht grundsätzlich aus Laseroptik und Signalverarbeitungssystem (vgl. Bilder 1 und 2). Die Laseroptik führt durch optische Interferometrie die mechanischen Schwingungskenngrößen entsprechend den Gleichungen (8) und (9) direkt auf die Wellenlänge des Laserlichtes zurück. Die elektrischen Größen $\Delta f(t)$ und $\Delta\varphi(t)$ am Ausgang des Fotodetektors der Laseroptik sind bezüglich der Amplitude der mechanischen Schwingung mit der sehr kleinen Unsicherheit der Laserwellenlänge λ behaftet. Vorteilhaft ist der Einsatz von Heterodyn-Interferometern (vgl. Bild 3), da hier die Größen $\Delta f(t)$ und $\Delta\varphi(t)$ als Modulation eines hochfrequenten Trägersignals auftreten. Nichtlinearitäten des Fotodetektors bei der Wandlung der Lichtintensität in ein elektrisches Signal haben bei diesem Verfahren keinen Einfluss auf die messtechnisch relevanten Parameter des Doppler-Signals.

Bei der Verwendung von Homodyn-Interferometern müssen Vorkehrungen getroffen werden, um auch im Falle wechselnder Reflexionseigenschaften des Messobjekts den linearen Betrieb der Fotodetektoren sicherzustellen. Signalformverzerrungen der Homodyn-Signale wirken sich insbesondere auf die Messunsicherheit bei kleinen Schwingamplituden aus.

Die Messunsicherheit des Referenz-Laservibrometers bei der Amplitudenmessung einer geradlinigen Schwingungsgröße (z.B. Schwingwegamplitude) wird fast ausschließlich durch das nachfolgende Signalverarbeitungssystem bestimmt, welches aus den Größen $\Delta f(t)$ oder $\Delta\varphi(t)$ den zeitlichen Verlauf von Schwinggeschwindigkeit bzw. Schwingweg rekonstruiert. Soll das Referenz-Laservibrometer zur Phasen-Kalibrierung (z. B. Messung des Phasenverschiebungswinkels eines Beschleunigungsaufnehmers) eingesetzt werden, sind darüber hinaus Phasenverschiebungen (z.B. Laufzeit von Filtern) im Laservibrometer von Einfluss. Herkömmliche Laservibrometer mit analoger Signalverarbeitung können prinzipbedingt mit Linearitäts- und Driftfehlern behaftet sein, die deren Eignung als Referenzmesssystem ausschließen. Mit aktuell verfügbaren Technologien der digitalen Signalverarbeitung ist es jedoch möglich, die Dekodierung von Doppler-Signalen mit höchster Präzision und frei von Drifteinflüssen analoger Baugruppen rein numerisch zu realisieren. Entsprechende mathematische Methoden werden in Normalmesseinrichtungen verwendet und sind in den Standards für Primärkalibrierverfahren beschrieben. In einem handelsüblichen Laservibrometer, dessen Eignung als Referenzsystem für Primärkalibrierungen bei Untersuchungen in der PTB nachgewiesen wurde, wird die numerische Dekodierung des Doppler-Signals entsprechend Verfahren 3 nach ISO 16063-11 durchgeführt.

Für die weitere Signalverarbeitung ist es zweckmäßig, die digital dekodierten Messsignale in einem Rechner weiterzuverarbeiten. Das Referenz-Laservibrometer sollte deshalb mit einem geeigneten Dateninterface zur Ausgabe des Schwingungssignals ausgestattet sein.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	17 / 30

Eine Messung des Phasenverschiebungswinkels setzt u. a. voraus, dass die zeitdiskreten Abtastwerte des Referenzsignals $v(mT_a)$ und des KG $u(mT_a)$ synchron erfasst werden. Diese schwer einhaltbare Voraussetzung wird bei einem als Beispiel betrachteten handelsüblichen Kalibriersystem dadurch erfüllt, dass der Abtasttakt für den A/D-Umsetzer des Analog-Kanals aus dem Datentakt des digitalen Interface des Referenz-Laservibrometers abgeleitet wird. Die Mindestanforderungen an das Referenz-Laservibrometer lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Laseroptischer Sensor nach dem Prinzip des Heterodyn- oder Homodyn-Interferometers mit ausreichender Detektionsbandbreite für die höchste auftretende Doppler-Frequenz.
- Verwendung eines Lasers mit hinreichend genauer und stabiler Wellenlänge als Maßverkörperung (vorzugsweise He-Ne-Laser oder anderer Typ mit durch ein physikalisches Prinzip festgelegter Wellenlänge).
- Digitale Signalverarbeitung zur Dekodierung der Schwingungssignale $s(t)$ oder $v(t)$ aus dem Doppler-Signal entsprechend einem von ISO 16063-11 vorgegebenen Verfahren mit nachgewiesenen Eigenschaften.
- Das Referenz-Laservibrometer muss so ausgeführt sein, dass es auf die entsprechende NME der PTB rückgeführt werden kann.


Durch Ausgabe des Messsignals über ein digitales Interface werden zusätzliche Messabweichungen vermieden, die sich sonst durch Rückwandlung in den Analogbereich und erneute Digitalisierung zwangsläufig ergeben.

Soll das Referenz-Laservibrometer zur Messung des Betrages und der Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten von Beschleunigungsaufnehmern verwendet werden, so besteht außerdem die Forderung, dass die durch interne und externe Baugruppen (z. B. Tiefpassfilter) hervorgerufene Laufzeit (Phasenverschiebung) von den Einstellbedingungen (z. B. Messbereich, Schwingungsfrequenz, Frequenz- bzw. Phasenhub des Heterodynsignals) nur gering abhängt, reproduzierbar ist und mit geringer Messunsicherheit bestimmt worden ist. Die durch das Referenz-Laservibrometer einschließlich Signalverarbeitungssystem hervorgerufene Phasenverschiebung muss zur Korrektur des Messergebnisses sowie bei der Ermittlung der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Abschnitt sind ausschließlich gerätetechnische Anforderungen an das Referenz-Laservibrometer spezifiziert worden, die für die Messung der Amplitude und ggf. des Nullphasenwinkels einer geradlinigen Sinusschwingung an einem definierten Messpunkt (Reflexionspunkt des Laserlichtstahls) Voraussetzung sind. Die erweiterte Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Laservibrometern oder Beschleunigungsaufnehmern hängt entscheidend ab von weiteren Quellen systematischer Messabweichungen (z.B. Relativbewegungen), deren unzureichende Beachtung zu relativen Messabweichungen weit über 10 % führen kann. Dies gilt besonders für unvollkommene Entkopplung von Schwingungserreger und Laseroptik (siehe 5.1.3) und für Relativbewegungen durch Quer-, Kipp- und Taumelschwingungen des Schwingteils des Erregers (siehe 5.1.4) sowie durch Kontinuumsschwingungen der Montagefläche bei hohen Frequenzen (kHz-Bereich). Die Messunsicherheitsbetrachtungen im Abschnitt 8 zeigen, welche Einflussgrößen in Betracht zu ziehen sind. In Abschnitt 6 ist die ordnungsgemäße Vorbereitung und Durchführung der Kalibrierungen mit dem Ziel geringer Messunsicherheit beschrieben.

5.3 Elektronik

Der im Elektronikteil enthaltene Messkanal (s. Bild 1) besteht aus einem dem Funktionsprinzip des KG 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 von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	18 / 30

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 Idealwerten ab. Sind diese Abweichungen zwischen den Soll- und Istwerten als Funktion der Frequenz bekannt, so kann das Messergebnis korrigiert werden. Andernfalls sind entsprechend höhere Beiträge im MUB zu berücksichtigen.

Ist der Kalibriergegenstand ein Laservibrometer mit Digitalausgang, dann ist der Messkanal ein Digitalkanal und die obigen Bemerkungen sind nicht relevant.

5.4 Standard Kalibriereinrichtungen

Wie aus Tabelle 2 zu ersehen ist, sind die verfügbaren Schwingungserreger 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	Schwingungserreger gemäß Tabelle 2
Beschleunigungs-BNME 5 Hz bis 20 kHz	200	Typ C
Beschleunigungs-BNME 5 Hz bis 5 kHz	500	Typ A
Beschleunigungs-BNME 0,4 Hz bis 160 Hz	800 / 1000	Typ D
Beschleunigungs-BNME 0,4 Hz bis 160 Hz	2000	Typ E


Tabelle 3: Beispiele für Bezugsnormal-Messeinrichtungen (BNME)

5.5 Parameter eines typischen Kalibrierablaufs

Der typische Ablauf einer Kalibrierung besteht darin, zunächst den Übertragungskoeffizienten bei einer **Bezugsfrequenz** und anschließend bei einer Anzahl geforderter weiterer Frequenzen zu bestimmen. Dabei ist es üblich, die Frequenzen der Terzreihe gemäß DIN EN ISO 266 zu verwenden. Nach ISO 16063-11 [1] sind als Bezugsfrequenzen $f = 160 \text{ Hz}$, 80 Hz , 40 Hz , 16 Hz , 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. Zu weiteren Details siehe Abschnitt 5.5 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

Die nacheinander 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 SI-Einheiten, a auch in g_n , wobei gilt $1 g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$)
- Betrag des Übertragungskoeffizienten, Einheiten abhängig vom KG
- bei eigener Anzeige des KG:
vom KG angezeigter Zahlenwert und/oder ein daraus errechneter Übertragungskoeffizient, Einheiten abhängig vom KG

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	19 / 30

Darüber hinaus können folgende Kenngrößen ermittelt und ausgegeben werden:

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

Bei der sich anschließenden oder bereits während der Messung aufbauenden grafischen Darstellung der Frequenzgänge werden in einer S - f -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.

6 Vorbereitung und Durchführung der Kalibrierung

6.1 Bestimmung der Kalibrierfähigkeit

Zur Kalibrierfähigkeit klassischer BA siehe Abschnitt 6.1.1 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3]. Ist der KG ein Laservibrometer, dann gilt zusätzlich:

- Überprüfung der Laser-Funktionen (Fokussierbarkeit im geforderten Arbeitsabstand, Richtungsstabilität des Laserstrahls, ausreichende Intensität des optischen Signals). Die optische Intensität kann i.d.R. anhand des eingebauten Signalstärke-Indikators beurteilt werden. Ist ein solcher nicht vorhanden, muss der Signal-Rausch-Abstand am Messsignalausgang beurteilt werden. Generell ist der Signal-Rausch-Abstand proportional zur optischen Intensität. Für die meisten Laservibrometer werden in den Handbüchern optimale Arbeitsabstände angegeben, sogenannte Kohärenz-Maxima, die sich periodisch im Abstand von ca. 200 mm wiederholen. In der Mitte zwischen zwei Maxima können relativ starke Schwankungen der Signalintensität auftreten. Kalibrierungen sollen deshalb grundsätzlich bei Arbeitsabständen durchgeführt werden, die mit einem Kohärenz-Maximum zusammenfallen.

6.2 Adaptierung des (klassischen) Aufnehmers

6.2.1 Allgemeine Hinweise


Siehe dazu Abschnitt 6.1.2 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

6.2.2 Spezielle Hinweise

Siehe dazu Abschnitt 6.1.2 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

6.2.3 Adaptierung des Laserstrahls bei Kalibrierung von klassischen BA

Die einzelnen Orte auf dem Schwingteil des Schwingungserregers schwingen nur bei tiefen Frequenzen mit gleicher Amplitude und Phase. Auf die Koppelfläche des KG wirkt deshalb bei mittleren und hohen Frequenzen ein vektorieller Summenwert. Das Ziel der Ankopplung des Laserstrahls besteht darin, durch mehrere Punktmessungen auf oder neben dem KG ein möglichst gutes Abbild dieses Summenwertes zu gewinnen.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	20 / 30

Wenn als KG ein BtB-Aufnehmer eingesetzt und als solcher genutzt wird, sollte die für die Messung relevante obere Koppelfläche direkt durch den Laserstrahl abgetastet werden. Wird die Kalibrierung mit Zusatzmassen durchgeführt, sind diese so zu fertigen, dass der Laserstrahl trotzdem an der Koppelfläche reflektiert wird (siehe ISO 16063-11 [1]).

Ist der KG ein SE-Aufnehmer, muss eine mögliche Relativbewegung zwischen der dem Laserstrahl nicht zugänglichen Referenzfläche und dem Antastpunkt des Laserstrahls am Schwingteil beachtet werden.

In beiden Fällen muss die Schwingungsgröße an mehreren Punkten mit dem Laservibrometer erfasst und die dabei gewonnenen Schwingungskomponenten der Gesamtbewegung müssen in geeigneter Weise verarbeitet werden. Ideal wäre es, wenn diese Messungen zeitlich parallel erfolgen könnten. Diese ebenfalls sehr teure Lösung bleibt Nationalen Metrologie-Instituten wie der PTB vorbehalten, kommt jedoch für DKD-Laboratorien kaum in Betracht. Deshalb bleibt nur die Möglichkeit, die Messungen zeitlich nacheinander durchzuführen. Die damit verknüpfte höhere Messunsicherheit ist durch einen entsprechenden Beitrag zu berücksichtigen.

Um eine gute Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen zu gewährleisten, muss die Laseroptik über eine Positioniereinrichtung mit der Halterung verbunden sein. Gut geeignet dafür ist eine in der verlängerten Z-Achse des Schwingungserregers angeordnete R - φ -Positioniereinrichtung, die eine Auflösung von $R < 0,1$ mm und $\varphi < 0,5^\circ$ ermöglicht.

Besitzt die zu adaptierende Oberfläche unzureichende Reflexionseigenschaften, so ist eine geeignete Reflexfolie aufzubringen. In jedem Falle ist auf eine präzise Ausrichtung des Laserstrahls in Hauptbewegungsrichtung des Schwingteils zu achten.

6.3 Adaptierung beider Laserstrahlen bei der Kalibrierung von Laservibrometern

Da das Referenz-Laservibrometer (VN) und der Kalibriergegenstand (VX) in den meisten Fällen mit der gleichen Laserwellenlänge arbeiten, kann es prinzipiell zu Interferenzeffekten zwischen beiden Lasern kommen, die zum Zusammenbrechen der Messsignale bzw. zu Instabilitäten führen. In der Regel verschwindet dieser Zustand nach kurzer Zeit wieder, da bereits kleinste thermisch bedingte Verschiebungen der Wellenlänge (Bereich 10^{-7}) die gegenseitige Beeinflussung beider Laservibrometer verhindern. In schwierigen Fällen kann durch seitliche Verschiebung eines der Laserstrahlen im Bereich 0,1 mm Abhilfe geschaffen werden. Es empfiehlt sich dann, zwei Messreihen mit jeweils vertauschten Reflexionsorten durchzuführen und den Mittelwert zu bilden.

6.4 Spezielle Vorbereitungen

Siehe dazu Abschnitt 6.2 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

6.5 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:

6.5.1 Globale Grundeinstellungen vornehmen


Globale Grundeinstellungen erfordern eine einmalige Eingabe. Nur bei Wechsel einer Komponente sind erneute Eingaben notwendig.

Zusätzlich zu den in der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3] aufgeführten Details ist aufzunehmen:

- Eigenschaften des eingebundenen Laservibrometers.

6.5.2 Spezielle Grundeinstellungen vornehmen

Eingabe oder Korrektur bei jedem neuen Kalibriergegenstand.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	21 / 30

Zusätzlich zu den in der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3] aufgeführten Details ist aufzunehmen:

- Globale Festlegungen zur Adaptierung des Laserstrahls.

6.5.3 Testbeschreibung erstellen

Eingabe oder Korrektur bei jedem neuen Kalibriergegenstand.

Zusätzlich zu den in der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3] aufgeführten Details ist aufzunehmen:

- Festlegung der Anzahl und der Orts-Koordinaten für die Adaptierung des Laserstrahls bzw. der Laserstrahlen.

6.5.4 Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur ist in unmittelbarer Nähe des Kalibriergegenstandes zu messen. Sofern vom Schwingungserreger eine Wärmeentwicklung ausgeht, muss bei einem klassischen BA die Körpertemperatur gemessen oder abgeschätzt werden. Die Temperaturdaten sind manuell oder automatisch in den Kalibrierschein einzufügen.

6.5.5 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 Laservibrometer und Kalibriergegenstand
- Standardabweichung der Einzelwerte einer Messreihe für die Amplitude bzw. den Effektivwert der Schwingungsgröße und für den Übertragungskoeffizienten

Zu weiteren Details siehe Abschnitt 6.3.5 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3]

Die für die verschiedenen Adaptierungen des Laserstrahls gewonnenen Frequenzgänge des Übertragungskoeffizienten des KG sind gesondert zu speichern und anschließend zu einem Mittelwert zu verknüpfen. Bei der abschließenden Ergebnisdarstellung sollte es möglich sein, die Teilergebnisse und das Endergebnis grafisch darzustellen.


6.5.6 Kalibrierung bewerten

Das Ergebnis ist für jede Messfrequenz hinsichtlich Standardabweichung, Monotonie und Ortsabhängigkeit der Laserstrahl-Adaptierung zu beurteilen. Übersteigt die Standardabweichung der Einzelmesswerte 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 Querreresonanzen typische Schwankungen („Zacken“), ist das Kalibrierergebnis zu verwerfen oder der Einfluss der Querschwingungen ist durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.

Zeigt der aus den einzelnen Messreihen gebildete Mittelwert ebenfalls Abweichungen vom erwarteten monotonen Verlauf, so ist die Messung mit anderen Ortskoordinaten für die Laserstrahl-Adaptierung zu wiederholen.

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 9.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	22 / 30

7 Wartung und Kontrolle

Siehe dazu Abschnitt 7 der Richtlinien DKD-R 3-1, Blatt 1 [2] und Blatt 3 [3].

8 Messunsicherheitsbetrachtungen

8.1 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. Ein Beispiel für den ähnlichen Fall der Vergleichskalibrierung ist in der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3] dargestellt.

8.2 Modell

Das Modell der Auswertung einer Primärkalibrierung zur Bestimmung des Betrages des komplexen Übertragungskoeffizienten eines Beschleunigungsaufnehmers kann in allgemeiner Darstellung folgendermaßen formuliert werden (Produktmodell):

$$\text{Größen:} \quad Y = q * \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}; \quad p_i = \pm 1 \quad (13)$$

$$\text{Schätzwerte:} \quad y = q * \prod_i x_i^{p_i}; \quad p_i = \pm 1 \quad (14)$$

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

$$S_X = \frac{U_X}{\omega * V * G} * K_f * K_T * K_D * K_H * K_N * K_{GMO} * K_{MT} * K_{MC} * K_{Re1} * K_{TK} * K_L * K_I * K_{RES} \quad (15)$$

Im Falle der Bestimmung der Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten ist ein Summenmodell aufzustellen.

Die vorderen Terme resultieren aus der Bestimmungsgleichung (5)


$$S_X = \frac{U_X}{2\pi f V G} \quad \varphi_X = \varphi_U - \varphi_V - \varphi_G - \varphi_\omega - \sum_{i=1}^N e_{\varphi,i} \quad (16)$$

wobei gilt:

$$U_X = |\hat{u}_X e^{j\varphi_u}| \quad V = |\hat{v} e^{j\varphi_v}| \quad G = |\hat{G}_X e^{j\varphi_g}| \quad \omega = 2\pi f \quad (17 \dots 20)$$

Zur Bildung der Korrekturfaktoren K_i und dem Zusammenhang mit den relativen Messunsicherheiten siehe [5] und [6].

Die Bezeichnung der einzelnen Glieder geht aus nachstehender Übersicht hervor.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	23 / 30

Bezeichnung der Produktterme (Beträge)

$Y = S_X$	Ergebnis, Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes (KG) Beschleunigungsaufnehmer ohne Verstärker	1	
$X_1 = V$	Amplitude der Schwinggeschwindigkeit $v(t)$	2	3
$X_2 = U_X$	Amplitude des elektrischen Signals $u_X(t)$		
$X_3 = G$	Betrag des Übertragungskoeffizienten des dem KG zugeordneten Verstärkers		
$X_4 = \omega$	Kreisfrequenz des Beschleunigungssignals		
$X_5 = K_f$	Korrektionsfaktor Frequenzgang		
$X_6 = K_T$	Korrektionsfaktor Querbewegung		
$X_7 = K_D$	Korrektionsfaktor Oberwellen		
$X_8 = K_H$	Korrektionsfaktor Brummen		
$X_9 = K_N$	Korrektionsfaktor Rauschen		
$X_{10} = K_{GMO}$	Korrektionsfaktor Geometrischer Messort		
$X_{11} = K_{MT}$	Korrektionsfaktor Aufnehmermontage		
$X_{12} = K_{MC}$	Korrektionsfaktor Kabelmontage		
$X_{13} = K_{Rel}$	Korrektionsfaktor Relativbewegung		
$X_{14} = K_{TK}$	Korrektionsfaktor Temperaturänderung		
$X_{15} = K_L$	Korrektionsfaktor Linearität		
$X_{16} = K_I$	Korrektionsfaktor Instabilität des Normals		
$X_{17} = K_{RES}$	Korrektionsfaktor residuale Einflüsse		

Tabelle 4: Festlegung der Ergebnisgröße und der Eingangsgrößen des mathematischen Modells der Auswertung ⁴

Besonderheiten bei der Kalibrierung von Schwingungsmessgeräten

Die detaillierte Darstellung – Bestimmungsgleichung mit *besten* Schätzwerten – lautet in diesem Fall

$$Y = V * \omega * K_D * K_N * K_{GMO} * K_{Rel} * K_{TK} * K_L * K_I * K_{RES} \quad (21)$$


mit den nachstehend aufgeführten Produkttermen.

¹ Ergebnisgröße

² N' Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ergebnisgröße

³ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit

⁴ Die Einteilung der Messunsicherheitsbeiträge ist im Vergleich zu ISO 16063-11 [1] modifiziert, berücksichtigt jedoch die Gesamtheit relevanter Einflussgrößen.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	24 / 30

Bezeichnung der Produkterme (Kalibrierung von Schwingungsmessgeräten)

$Y = a_S$	Ergebnis, bereitgestellte Beschleunigung	1	
$X_1 = V$	Spitzenwert (Amplitude) des Geschwindigkeitssignals $v(t)$	2	3
$X_2 = \omega$	Kreisfrequenz $\omega = 2 \pi f$ des Beschleunigungssignals		
$X_3 = K_D$	Korrektionsfaktor Oberwellen		
$X_4 = K_N$	Korrektionsfaktor Rauschen		
$X_5 = K_{GMO}$	Korrektionsfaktor Geometrischer Messort		
$X_6 = K_{Rel}$	Korrektionsfaktor Relativbewegung		
$X_7 = K_{TK}$	Korrektionsfaktor Temperaturänderung		
$X_8 = K_L$	Korrektionsfaktor Linearität		
$X_9 = K_I$	Korrektionsfaktor Instabilität des Normals		
$X_{10} = K_{RES}$	Korrektionsfaktor residuale Einflüsse		

Tabelle 5: Festlegung der Ergebnisgröße und der Eingangsgrößen des mathematischen Modells der Auswertung bei der Kalibrierung von Schwingungsmessern (Vibrometern)

Relative Messabweichungen: Siehe dazu Abschnitt 9.2 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

8.3 Abweichungsspanne W'

Siehe dazu Abschnitt 9.3 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

8.4 Ermittlung der Messunsicherheit (KG ist BA)

8.4.1 Spezifikation von NME 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.

Kalibriereinrichtung: BNME 5 Hz bis 20 kHz (Hersteller SPEKTRA)
Normal: Laservibrometer der Baureihe CLV (Hersteller Polytec)
Kalibriergegenstand: 2270 M8 (Hersteller Endevco)

Für die Bestimmung der relativen Messunsicherheit sind die folgenden in den Tabellen 7 und 8 aufgeführten Beiträge zu berücksichtigen.

Anmerkung: siehe Abschnitt 9.4.1 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3]

¹ Ergebnisgröße
² N' Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ergebnisgröße
³ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit


8.4.2 Messunsicherheitsanalyse (Budgettabelle / Betrag, allgemein)

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

Tabelle 6: Messunsicherheitsanalyse (Budgettabelle / Betrag, allgemein)

¹ $c_i^* = (x_i / y) c_i$

² enthält die Unsicherheit der Rückführung auf das nationale Normal

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	26 / 30


8.4.3 Spezielles Messunsicherheitsbudget (Betrag) ¹

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	V	9,947 cm/s	$10,0 \cdot 10^{-4}$ ²	1	$10,0 \cdot 10^{-4}$	$100,0 \cdot 10^{-8}$
2	U_X	5,266 V	$4,5 \cdot 10^{-4}$	1	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$20,25 \cdot 10^{-8}$
3	ω	1005,31 s ⁻¹	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
4	G	256,016	$2,0 \cdot 10^{-4}$	1	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-8}$
5	K_f	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
6	K_T	1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$
7	K_D	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
8	K_H	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
9	K_N	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
10	K_{GMO}	1	$15,0 \cdot 10^{-4}$	1	$15,0 \cdot 10^{-4}$	$225,0 \cdot 10^{-8}$
11	K_{MT}	1	$3,2 \cdot 10^{-4}$	1	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$10,24 \cdot 10^{-8}$
12	K_{MC}	1	$7,0 \cdot 10^{-4}$	1	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$49,0 \cdot 10^{-8}$
13	K_{Rel}	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
14	K_{TK}	1	$0,15 \cdot 10^{-4}$	1	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,023 \cdot 10^{-8}$
15	K_L	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
16	K_I	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
17	K_{RES}	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$25,0 \cdot 10^{-8}$
	S_X	0,2057 pC/(m/s ²)	$w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$		$2,09 \cdot 10^{-3}$	$4,36 \cdot 10^{-6}$
	S_X		$W(S_X) = k \cdot w(S_X)$ $k = 2$		$4,18 \cdot 10^{-3}$	
Angabe des vollständigen Messergebnisses			$S_X = 0,206 \text{ pC}/(\text{m}/\text{s}^2) \pm 0,5 \%$			

Tabelle 7: Messunsicherheitsbudget / Betrag, kleinste angebbare Messunsicherheit, BA ENDEVCO, Typ: 2270M8, $f = 160 \text{ Hz}$, $a_{z,S} = 100 \text{ m/s}^2$ (berechnet für einen Ladungs-Übertragungskoeffizienten von $1 \text{ mV} / \text{pC}$)

¹ kleinste angebbare Messunsicherheit beim fortgeschrittensten Stand der Technik

² enthält die Unsicherheit der Rückführung auf das nationale Normal

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	27 / 30

8.5 Ermittlung der Messunsicherheit (KG ist ein Referenz-Laservibrometer)¹

Um in diesem Abschnitt eine komplette Wiederholung des Abschnittes 8.4 zu vermeiden, wird hier nur das Endergebnis dargestellt.


Löscht man in Tabelle 6 unter Beachtung von Tabelle 5 die nicht relevanten Zeilen, dann erhält man bei der **Kalibrierung eines Laservibrometers** mit eigener Anzeige beispielhaft für die von der BNME bereitgestellte Beschleunigung a_S ein vollständiges Ergebnis gemäß Tabelle 8. Dieses Ergebnis ist in Beziehung zu setzen zu dem vom KG angezeigten Wert a_X .

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	V	9,947 cm/s	$10,0 \cdot 10^{-4} \text{ }^2$	1	$10,0 \cdot 10^{-4}$	$100,0 \cdot 10^{-8}$
2	ω	1005,31 s ⁻¹	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
3	K_D	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
4	K_N	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
5	K_{GMO}	1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$16,0 \cdot 10^{-8}$
6	K_{Rel}	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
7	K_{TK}	1	$0,15 \cdot 10^{-4}$	1	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,02 \cdot 10^{-8}$
8	K_L	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
9	K_I	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-8}$
10	K_{RES}	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$25,0 \cdot 10^{-8}$
	a_S	99,998 m/s ²	$w(a_S) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$		$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$
	a_S		$W(a_S) = k \cdot w(a_S)$ $k = 2$		$2,4 \cdot 10^{-3}$	
Angabe des vollständigen Messergebnisses			$a_S = 100,0 \text{ m/s}^2 \pm 0,25 \%$			

Tabelle 8: Messunsicherheitsbudget / Betrag, kleinste angebbare Messunsicherheit, KG Referenz-Laservibrometer der Baureihe CLV (Hersteller Polytec), $f = 160 \text{ Hz}$, $a_{z,S} = 100 \text{ m/s}^2$

¹ kleinste angebbare Messunsicherheit beim fortgeschrittensten Stand der Technik

² enthält die Unsicherheit der Rückführung auf das nationale Normal

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	28 / 30

9 Angaben im Kalibrierschein


Neben den in den Richtlinien DKD-R 3-1, Blatt 1 [2] und Blatt 3 [3] (Abschnitt 10) aufgeführten Details sind zu beachten:

- Messbedingungen
 - Geometrische Orte der Adaptierung des Laserstrahls
- Messergebnisse in Präzisierung von DAkkS-DKD-5:
 - Je interferometrischer Messort tabellierte Angaben von:
 Frequenz / Beschleunigungsamplitude oder -effektivwert / komplexer Übertragungs-
 koeffizient nach Betrag und ggf. Phasenverschiebungswinkel / Abweichung zur Be-
 zugsfrequenz in %, ggf. in dB bzw. in ° .
 Mittelwert aller Messorte
 Bei Linearitätsmessungen ist die Tabelle entsprechend abzuändern, ggf. ist eine
 Einwertangabe mit Gültigkeitsbereich zu bestimmen

Es wird empfohlen, die Kalibrierergebnisse zu visualisieren (z. B. durch Darstellung des komplexen Übertragungskoeffizienten nach Betrag und ggf. Phasenverschiebungswinkel über der Frequenz, getrennt für jeden interferometrischen Messort und den daraus gebildeten Mittelwert).

10 Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium

Siehe dazu Abschnitt 11 der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3].

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometri- scher Messung der Schwingungsgröße https://doi.org/10.7795/550.20180823E	DKD-R 3-1 Blatt 4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	29 / 30

11 Literatur

Das ausführliche Literaturverzeichnis befindet sich in der Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 3 [3]. Hier sind nur die in dieser Richtlinie zitierten Literaturstellen aufgeführt.

- [1] **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> |
| -15 ⁵¹ | <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 ¹ | <i>Shock calibration by comparison to a reference transducer</i> |
| -23 ² | <i>Angular vibration calibration by comparison to a reference transducer</i> |
| ISO 16063-3x ³ | <i>Calibration in severe environments</i> |
| -31 ¹ | <i>Testing of transverse vibration sensitivity (sinusoidal)</i> |
| -(ISO 5347-12) ³ | <i>Testing of transverse shock sensitivity</i> |
| -(ISO 5347-13) ³ | <i>Testing of base strain sensitivity</i> |
| -(ISO 5347-14) ³ | <i>Resonance frequency testing of undamped accelerometers on a steel block</i> |
| -(ISO 5347-15) ³ | <i>Testing of acoustic sensitivity</i> |
| -(ISO 5347-16) ³ | <i>Testing of mounting torque sensitivity</i> |
| -(ISO 5347-17) ³ | <i>Testing of fixed temperature sensitivity</i> |
| -(ISO 5347-18) ³ | <i>Testing of transient temperature sensitivity</i> |
| -(ISO 5347-19) ³ | <i>Testing of magnetic field sensitivity</i> |
- [2] **DKD-R 3-1, Blatt 1:** *Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren, Grundlagen*
PTB, Braunschweig, 2. Neuauflage 2018
- [3] **DKD-R 3-1, Blatt 3:** *Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren, Sinus- und Multisinus-Anregung*
PTB, Braunschweig, 2. Neuauflage 2018
- [4] **Bühn, U.; Nicklich, H.; von 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
- [5] **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
- [6] **Martens, H.-J. v.:** *Evaluation of uncertainty in measurements – problems and tools*
OPTICS and LASERS in ENGINEERING, Elsevier Science, 38, 2002, 185-206

¹ In Bearbeitung

² Bearbeitung geplant (zero stage project)

³ z. Z. noch ISO 5347-12 bis –19 (Ausgabe 1993), neue Nummerierung nach Überarbeitung (Überarbeitung bisher nicht geplant)



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de