

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**Richtlinie
DKD-R 3-1**

**Kalibrieren von
Beschleunigungsmessgeräten
nach dem Vergleichsverfahren**

Blatt 1

Grundlagen

Ausgabe 09/2018

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



	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2 / 25

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 Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3 / 25

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 1, Kalibrieren von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

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

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 2002 bis 2009.

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

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORWORT	5
2	ANWENDUNGSBEREICH.....	5
3	BESTANDTEILE DES BESCHLEUNIGUNGSMESSGERÄTES.....	5
4	VORBEREITUNG DER KALIBRIERUNG	6
4.1	KUNDENABSTIMMUNG	6
4.2	KALIBRIERFÄHIGKEIT	8
4.2.1	Beschaffenheits-/Funktionsprüfungen von Beschleunigungsaufnehmern	8
4.2.2	Beschaffenheits-/Funktionsprüfungen von Anpasser und Ausgeber	9
4.3	ANFORDERUNGEN AN DIE ADAPTIONEN.....	9
4.4	HANDHABUNG	10
5	ANSCHLUSS AN NATIONALE NORMALE, RÜCKFÜHRBARKEIT.....	10
6	AUSWERTUNG VON PTB-KALIBRIERSCHEINEN FÜR BESCHLEUNI- GUNGS-BEZUGSNORMALE (-BN)	11
7	BESCHLEUNIGUNGS-BEZUGSNORMALMESSEINRICHTUNG (-BNME)	11
8	UMGEBUNGSBEDINGUNGEN.....	13
9	MESSUNSICHERHEIT	13
10	AUSWERTUNG UND DOKUMENTATION.....	19
11	KALIBRIERMARKE.....	21
12	ABKÜRZUNGEN	22
13	LITERATUR.....	23

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5 / 25

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 2002 erstellt. Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum. Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 3-1, Blatt 1 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 3-1, Blatt 1 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 03/2002 veröffentlicht vom DKD

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

2 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für Beschleunigungsmessgeräte mit seismischen Aufnehmern. Sie gilt auch für Beschleunigungsaufnehmer allein sowie für seismische Aufnehmer und Messgeräte für die translatorischen Bewegungsgrößen Geschwindigkeit und Weg sowie die rotatorischen Bewegungsgrößen Winkelbeschleunigung, Winkelgeschwindigkeit und Drehwinkel. Die Richtlinie ergänzt die internationale Norm ISO 16063-1.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Messgröße Beschleunigung. Sie gelten sinngemäß auch für die abgeleiteten Bewegungsgrößen.

3 Bestandteile des Beschleunigungsmessgerätes

Das Beschleunigungsmessgerät besteht aus Beschleunigungsaufnehmer, Anpasser (z.B. Verstärker) und einem Ausgeber (z.B. Anzeigeeinrichtung). Bei Beschleunigungsmessgeräten mit digitalem Ausgang kann anstelle der Geräteanzeige der Messwert auch über eine genormte Schnittstelle auf ein Datenendgerät – Drucker, Aufzeichnungsgerät oder Rechner – übertragen werden. Eine Anzeige der Messwerte während der Kalibrierung wird empfohlen. Es ist sicherzustellen, dass die eingelesenen Daten eindeutig interpretiert und verarbeitet werden. Die notwendigen Befestigungsmittel und die zugehörigen Kabel sind Bestandteil des Beschleunigungsmessgerätes. Falls der Kalibriergegenstand nur aus dem Beschleunigungsaufnehmer besteht, muss mit Komponenten der Beschleunigungs-Bezugsnormalmesseinrichtung (Beschleunigungs-BNME) eine Messkette zusammengestellt werden. Es ergeben sich u.a. Unterschiede in der Messunsicherheitsbetrachtung.

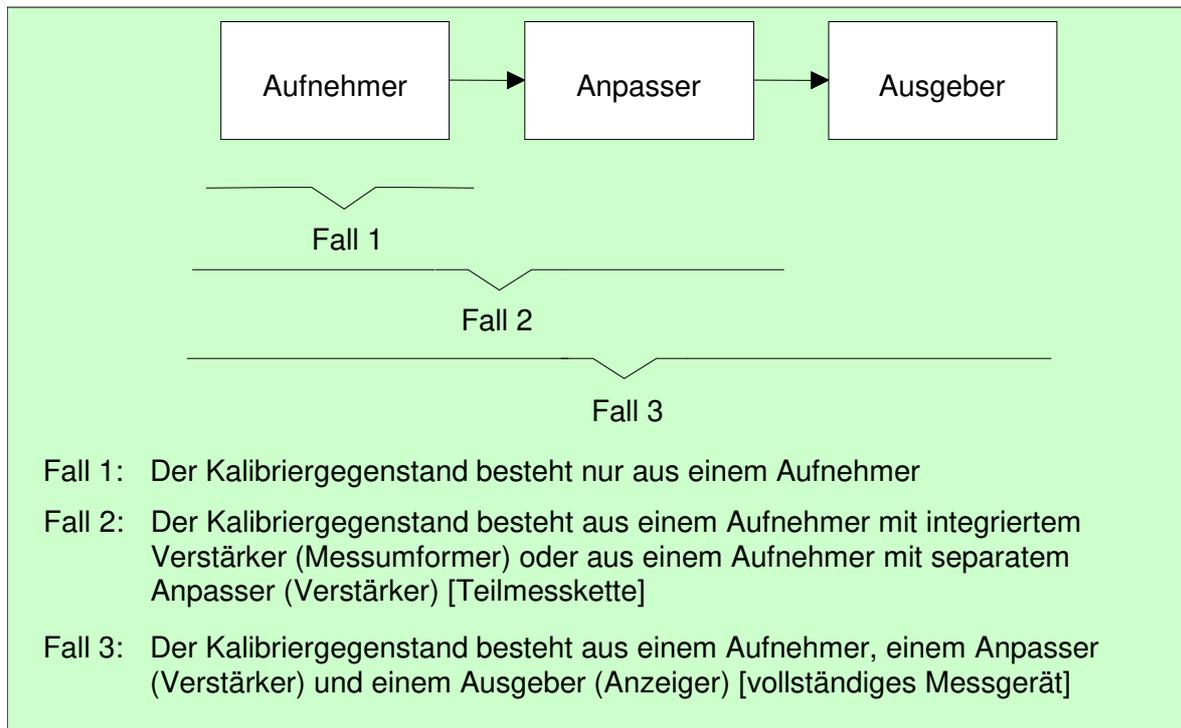


Bild 1: Fallunterscheidung Kalibriergegenstand

4 Vorbereitung der Kalibrierung

Es ist zweckmäßig, vor der Auftragsvergabe/-annahme der Kalibrierung eine Abstimmung zwischen den Anforderungen des Kunden und den technischen Möglichkeiten des akkreditierten Kalibrierlaboratoriums herbeizuführen, um die Abwicklung reibungslos und ohne unnötige Wartezeiten, Rücksprachen und vermeidbare Kosten durchführen zu können.

4.1 Kundenabstimmung

Wichtige Aspekte für den Kunden:

- Der Leistungsumfang des eigenen Kalibrierlaboratoriums ist darzulegen (ggf. mit Hinweisen auf andere akkreditierte Kalibrierlaboratorien, z.B. zwecks Unterauftragsvergabe).
- Die Kalibrierung ist eine Feststellung des „Ist-Zustandes“.
- Aussagen zur Langzeitinstabilität sind nicht Inhalt des Kalibrierscheines und können nur durch eine Serie von Kalibrierungen über einen entsprechenden Zeitraum getroffen werden.
- Wiederholprüffristen für die Kalibrierung muss der Kunde in eigener Verantwortung festlegen und in seinem QM-System dokumentieren. Von akkreditierten Kalibrierlaboratorien können Empfehlungen über Fristen ausgesprochen werden, ggf. unter Hinweis auf Normen oder die Prüfmittelüberwachung (PMÜ) des Kunden.
- Mit Kalibrierdokumenten ist der Nachweis der Rückführung stets und unmittelbar gegeben, Kalibrierdokumente sind QM-Dokumente im Sinne der ISO 9001:
 - Kalibrierschein; i.d.R. mehrseitig,
 - Konformitätsbescheinigung, ein Blatt.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	7 / 25

Im Einzelnen kann eine Abstimmung folgendes umfassen:

- Administrative Daten zur Auftragsabwicklung.
- Schlüsselbegriffe des Kalibriergegenstandes; die eindeutige Identifikation ist unerlässlich. Kalibriergegenstände ohne eindeutige Identifikation sind generell nicht kalibrierfähig. Falls Kalibriergegenstände ohne Identifikation angeliefert werden, muss vor der Durchführung der Kalibrierung in Abstimmung mit dem Kunden eine Identifikation vereinbart und unverlierbar am Kalibriergegenstand angebracht werden.
- Ist das erforderliche Zubehör (z.B. Kabel) vorhanden und befindet es sich in einwandfreiem Zustand?
- Liegen die zur Kalibrierung erforderlichen technischen Unterlagen vollständig vor? Beispiele:
 - Abmessungen und die Masse des Beschleunigungsaufnehmers,
 - Mechanische und elektrische Adaptierbarkeit an die Beschleunigungs-BNME,
 - Information über Lage des Schwerpunktes der seismischen Masse,
 - Resonanzfrequenz des Aufnehmers im montierten Zustand.
 Änderungen gegenüber dem Serienzustand müssen in der Dokumentation ausgewiesen sein.
- Kalibrierbereich; Anzahl der Messpunkte (z.B. Frequenzen, Beschleunigungsamplituden); ggf. Grenzwerte (höchstzulässige Beschleunigung).
- Kalibrierablauf; Bemerkung: Wünscht der Kunde einen von dieser Richtlinie abweichenden Kalibrierablauf, so liegt die Durchführung in der Verantwortung des Leiters des Kalibrierlaboratoriums. In diesem Fall ist eine Abstimmung mit der Akkreditierungsstelle und dem PTB-Fachlaboratorium erforderlich.
- Für das Ausstellen einer Konformitätsbescheinigung sind Angaben von Spezifikationsgrenzen als maximal zulässige Abweichungen (Herkunft: z.B. Gesetz, Norm, Datenblatt, werksinterne Vorgabe) nötig.

Achtung!

Das Ausstellen einer Konformitätsbescheinigung ist mit einer Entscheidung verbunden, ob ausgewählte Merkmale/Spezifikationsgrenzen eines Messgerätes unter Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Kalibrieren eingehalten werden oder nicht. Geeignete Merkmale/Kennwerte sind z.B. bei Messgrößenaufnehmern der Übertragungskoeffizient (Empfindlichkeit). Bei Messgeräten mit benannten Skalen wird z.B. die max. auftretende Differenz zwischen angezeigtem Wert und dem durch das Normal dargestellten (eingestellten) Wert zur Bewertung herangezogen.

Problematisch werden Konformitätsaussagen, wenn die zeitliche Zuordnung zwischen Datenblattausgabe und Herstellungsdatum des Messgerätes nicht aufeinander abgestimmt sind; für Produkte gleicher Bezeichnung können die technischen Daten im Laufe der Jahre verändert worden sein.

Ist der Kalibrierbereich kleiner als der nominelle Messbereich, ist bei Konformitätsaussagen, die sich auf Datenblattangaben beziehen, zu beachten, dass sich die Angaben von Spezifikationsgrenzen i.d.R. auf den nominellen Messbereich beziehen.

- Soll der Anlieferungszustand dokumentiert werden? Sind Justierungen erwünscht?
- Soll eine Versiegelung gegen unbefugtes Öffnen vorgenommen werden, z.B. mit dem Kalibrierzeichen?
- Soll im Falle schwerwiegender messtechnischer Mängel (z.B. Isolationswiderstand < Grenzwert) eine Benachrichtigung des Kunden erfolgen?
- Auswertung und Umfang der Dokumentation; vollständiger Kalibrierschein mit Messwerttabellen, Ausgleichsfunktionen, Konformitätsaussage.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8 / 25

- Welche Kalibrierergebnisse sollen ggf. im internen Speicher (EEPROM) abgelegt werden?

4.2 Kalibrierfähigkeit

Die Ausführung eines Kalibrierauftrages setzt die Kalibrierfähigkeit des Kalibriergegenstandes voraus, d.h. der momentane Zustand des Kalibriergegenstandes entspricht den allgemein anerkannten Regeln der Technik sowie den Vorgaben gemäß Herstellerdokumentation oder den speziellen Anforderungen des Kunden; ein ungestörter Kalibrierablauf ist zu erwarten.

Die Maßnahmen zur Feststellung der Kalibrierfähigkeit entsprechen im Allg. den Maßnahmen, die vor dem Messeinsatz durchgeführt werden müssen; die Stabilität eines Messgeräts ist dabei besonders hervorzuheben.

Falls der Kunde die Kalibrierfähigkeit nicht feststellen oder herstellen kann, wird vor der Annahme eines Kalibrierauftrages eine Übereinkunft über das Vorgehen bei nicht kalibrierfähigen Kalibriergegenständen empfohlen, so sollte z.B. bei technischen Mängeln am Kalibriergegenstand ein Bericht an den Kunden erstellt werden. Falls zur Herstellung der Kalibrierfähigkeit Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich sind, müssen die Arbeiten zwischen dem Kunden und dem Kalibrierlaboratorium abgesprochen werden.

4.2.1 Beschaffenheits-/Funktionsprüfungen von Beschleunigungsaufnehmern

Durch Beschaffenheits- und Funktionsprüfungen (visuell, mechanisch, elektrisch) ist die Kalibrierfähigkeit festzustellen. Dabei ist z.B. zu prüfen:

- Lesbarkeit von Beschriftungen, Sinnbildern und Symbolen,
- Sauberkeit des Kalibriergegenstandes,
- Zustand von Adaptionen; Maßhaltigkeit, Passungen, Planparallelität,
- Güte und Oberflächenbeschaffenheit von Flanschen und Ankoppelflächen (Rauigkeit und Ebenheit; ggf. Oberflächenbeschädigungen wie Verformungen, Dellen, Grat, Balligkeit, Verschmutzung, Rost u.a.),
- Gängigkeit von Gewinden,
- Beschaffenheit des Messkabels.

Elektrische Kenngrößen entsprechend dem Funktionsprinzip des Aufnehmers, z. B.

- Isolations-, Eingangs- und Ausgangswiderstand,
- Kapazität piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer und Messkabel,
- Bias-Spannungen (IEPE-Aufnehmer),
- Einhaltung von Einlaufzeiten,

Hinweis:

Einlaufzeiten von Beschleunigungsaufnehmern sollten nur mit angekoppelten Materialien, wie sie für die spätere Anwendung typisch sind, bestimmt werden (Erwärmung durch Verlustleistung bei passiven Aufnehmern).

- Nullsignal im unbelasteten Zustand, wichtiger Kennwert, denn bei signifikanten Veränderungen des Nullsignals besteht der Verdacht auf Überlastung während der vorherigen Nutzungsperiode,

Hinweis:

Das Nullsignal von Beschleunigungsaufnehmern mit der unteren Grenzfrequenz Null („zero response“) muss in definierter Lage zum Schwerfeld der Erde gemessen werden. Es wird empfohlen, den Kennwert "Nullsignal" über die Lebensdauer eines Messgrößenaufnehmers zu registrieren.

- Wert und Vorzeichen des Kalibriersignals bei der Shunt-Kalibrierung,
- Zusammenhang zwischen der Richtung der physikalischen Eingangsgröße und der Polarität des Ausgangssignals (Identifikation von Beschaltungsfehlern),

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9 / 25

Bemerkung:

Bei der Verwendung von ungeprüften Verlängerungskabeln können unbeabsichtigt Vorzeichenwechsel der Anzeige und/oder beim Kalibriersignal ("Dreher") auftreten.

- Funktion, Les- und Beschreibbarkeit interner Speicher, z.B. EEPROM.

4.2.2 Beschaffenheits-/Funktionsprüfungen von Anpasser und Ausgeber

Durch Beschaffenheits- und Funktionsprüfungen (visuell, mechanisch, elektrisch) ist die Kalibrierfähigkeit festzustellen. Dabei sind z.B. zu prüfen:

- Lesbarkeit von Beschriftungen, Sinnbildern und Symbolen,
- Ggf. Beschädigungen an Gehäusen, Kabeln, Steckverbindungen, Zubehör,
- Einwandfreie Funktion der Bedienelemente wie Schalter, Drucktasten, Anschlussklemmen (Sauberkeit, Kontaktgebung),
- Lesbarkeit von Skalen/Ableseeinrichtungen (Ziffernanzeigen lückenlos, kein Flackern),
- Stabilität der Anzeige bzw. des Messsignals (Schwankungen, Drift),
- Einstellelemente in definierter Stellung; Einstellbarkeit des Nullpunktes,
- Einwandfreie Masseverbindungen, Schirmungen, Vermeidung von Erdschleifen,
- Einhalten spezifizierter Einlaufzeiten, zulässiger Driften und Störabstände,
- Einfluss von Schwankungen der Versorgungsspannung auf die Anzeige.

4.3 Anforderungen an die Adaptionen

Mit dem Kunden ist abzustimmen, wer die Adaptionen beistellt bzw. zunächst anfertigt, ob sie mit dem Kalibriergegenstand oder im Kalibrierlaboratorium gelagert werden. Bei der Konstruktion und der Fertigung der Adaptionen sind zu beachten:

- Der Schwerpunkt der seismischen Masse (centre of seismic mass) des Bezugsnormals und der des Kalibriergegenstandes müssen auf einer Wirkachse im geringstmöglichen Abstand voneinander liegen.

Hinweis:

Um bestimmte parasitäre Einflüsse wie z.B. Querschleunigungen zu minimieren, ist es bei einigen Kalibriereinrichtungen zweckmäßig, durch die Adaptionen den „Gesamt“-Massenmittelpunkt des Kalibriergegenstandes (centre of gravity) in die Wirkachse zu legen.

- Möglichst wenig Einzelteile verwenden.
- Oberflächengüte entsprechend den Angaben des Herstellers der Beschleunigungsaufnehmer einhalten.
- Materialauswahl zum Erzielen einer möglichst hohen Resonanzfrequenz des Aufnehmers im montierten Zustand und einer leichten Adaption (vorzugsweise verwendete Adaptermaterialien siehe Tab. 1).

Material	E-Modul E in 10^3 N/mm ²	Dichte ρ in 10^3 kg/m ³	$\frac{E}{\rho}$ in 10^6 m ² /s ²
Beryllium	293	1,8	166,7
Stahllegierungen	195 - 220	7,0 - 7,9	26,1 – 26,5
Aluminium - legierungen	68 69 – 72	2,7 2,6 – 2,8	25,9 25,4 – 26,5
Titan	105	4,5	23,3
Messing	90	8,5	10,6

Tabelle 1: Adaptermaterialien

4.4 Handhabung

Beim Umgang mit Beschleunigungsaufnehmern ist äußerste Vorsicht geboten. Stöße an Gegenständen von Materialien mit harten Oberflächen erzeugen hohe Beschleunigungsspitzenwerte und eine Anregung von Eigenfrequenzen, die zu irreversiblen Änderungen des Übertragungskoeffizienten bzw. zur Zerstörung des Aufnehmers führen können.

Empfehlung:

Aufnehmertransportbehälter und Umgebung des Messplatzes mit weichen Unterlagen ausstatten.

5 Anschluss an nationale Normale, Rückführbarkeit

Der Anschluss an das nationale Normal wird von der PTB nach einem in ISO 16063-13 beschriebenen Verfahren vorgenommen. Im Antrag zur Primärkalibrierung eines Beschleunigungsaufnehmer-Normals der Bauart mit zwei gegenüberliegenden Ankopplungsflächen (Rücken-an-Rücken-Anordnung, „Back-to-Back“, „piggy back“) ist mitzuteilen, welche Ankopplungsfläche im Messeinsatz benutzt wird, damit die Kalibrierbedingungen den Anwendungsbedingungen entsprechen. Im Falle der Verwendung als Back-to-Back-Aufnehmer ist die für die Anwendung repräsentative Belastungsmasse (Masse des Kalibriergegenstandes) anzugeben.

In den Beschleunigungs-BNMEen werden i.d.R. Messketten aus einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer-Normal und einem Ladungsverstärker als Beschleunigungs-Bezugsnormal (Beschleunigungs-BN) verwendet. Grundsätzlich bestehen die Möglichkeiten, die Messkette insgesamt oder ihre Bestandteile (Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Ladungsverstärker) gesondert zu kalibrieren. Die Primärkalibrierung der Messkette oder des Beschleunigungsaufnehmer-Normals erfolgt in der PTB; Kalibrierergebnisse:

- Betrag S_{ua} in mV/(m/s²) und ggf. Phasenverschiebung $\Delta\varphi_{v\alpha}$ in Grad des komplexen Übertragungskoeffizienten der Messkette oder
- Betrag S_{qa} in pC/(m/s²) und ggf. Phasenverschiebung $\Delta\varphi_{v\alpha}$ in Grad des komplexen Übertragungskoeffizienten des Beschleunigungsaufnehmer-Normals und
- Betrag S_{uq} in V/pC und ggf. Phasenverschiebung $\Delta\varphi_{v\alpha}$ in Grad des komplexen Übertragungskoeffizienten des Ladungsverstärkers.

Die Kalibrierung des elektrischen Ladungsverstärkers kann in der PTB oder in einem

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11 / 25

akkreditierten Kalibrierlaboratorium durchgeführt werden, wenn dies entsprechend ausgerüstet ist. Die Rekalibrierfrist des Beschleunigungsaufnehmer-Normals ist durch die Akkreditierungsaufgaben festgelegt (vorzugsweise 2 Jahre). Im Hinblick auf die Langzeitinstabilität kann es zweckmäßig sein, den Ladungsverstärker in kürzeren Zeitintervallen zu kalibrieren. Die Langzeitinstabilität der Bestandteile der Messkette muss im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

6 Auswertung von PTB-Kalibrierscheinen für Beschleunigungs-Bezugsnormale (-BN)

Im Kalibrierschein der PTB werden Übertragungskoeffizienten für diskrete Anregungsbedingungen (z.B. bei Sinusanregung: Beschleunigungsamplituden und Frequenzen oder bei Stoßanregung: Beschleunigungsspitzenwert und Stoßdauer) angegeben. In der Anwendung wird aber an jeder Stelle im „angeschlossenen“ Messbereich des Beschleunigungs-BN kalibriert. Daraus resultieren Beiträge im Messunsicherheitsbudget, die von der Art und Weise des gewählten Algorithmus zur Bildung eines Übertragungskoeffizienten für einen Beschleunigungsbereich abhängen.

7 Beschleunigungs-Bezugsnormalmesseinrichtung (-BNME)

Diese Richtlinie geht davon aus, dass die Beschleunigungs-BNME nach dem Vergleichsverfahren (Bild 2) arbeitet. Dabei wirkt die von der Einrichtung erzeugte physikalische Größe Beschleunigung auf ein auf die SI-Einheiten rückführbar kalibriertes Beschleunigungs-BN und den Kalibriergegenstand ein.

In den akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden unterschiedliche Beschleunigungs-BNMEen eingesetzt, die teilweise Unikate darstellen. Grundsätzlich sind die signalführenden Komponenten der Einrichtung (Verstärker, ADU) und ggf. Hilfsgeräte (Spannungsversorgung für DMS-Aufnehmer) in das Prüfmittelüberwachungssystem des Kalibrierlaboratoriums einzubeziehen und rückführbar zu kalibrieren. Die Arbeitsfähigkeit muss in den Grenzen der Akkreditierungsaufgaben regelmäßig geprüft werden; der Nachweis ist zu führen. Mögliche Prüfungen sind:

- Regelmäßiges Kalibrieren eines Referenzaufnehmers,
- Bestimmen des Übertragungsverhaltens von Verstärkern, ADUs, usw.

Aus den Aufzeichnungen muss die zeitliche Instabilität der signalführenden Komponenten der Beschleunigungs-BNME abgeleitet werden können.

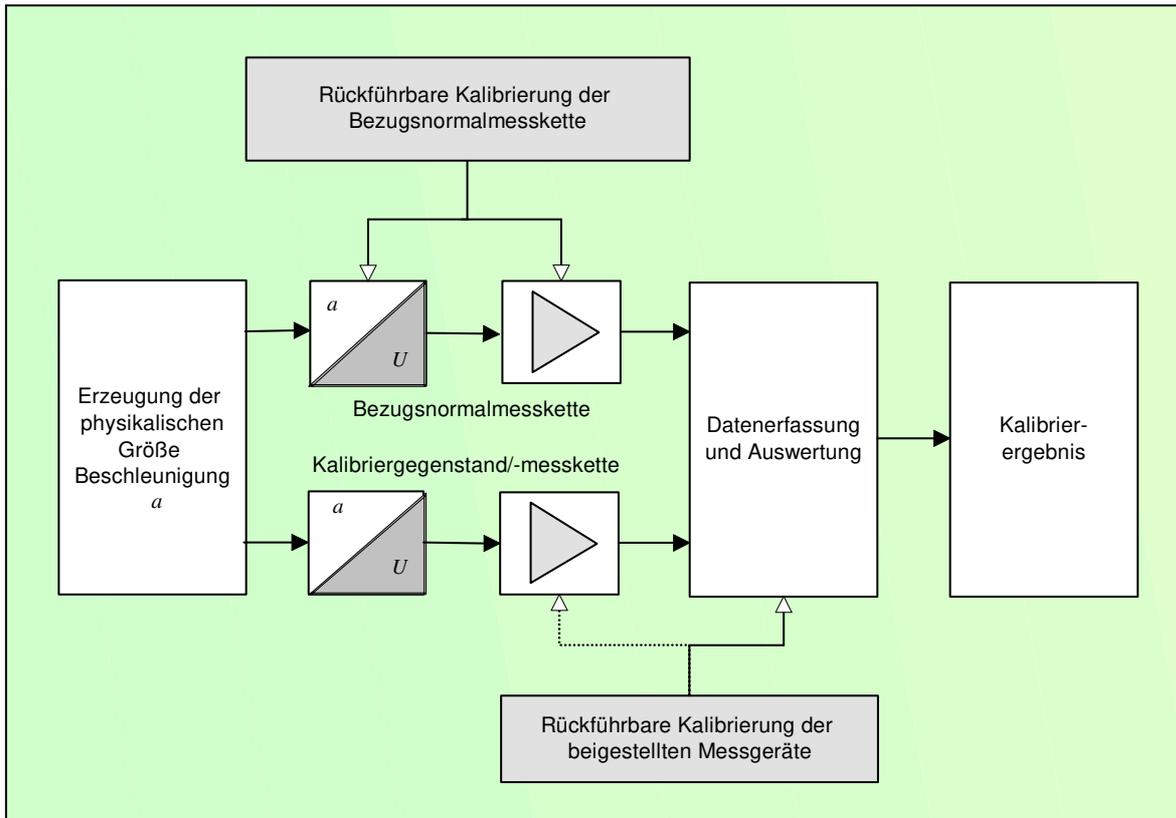


Bild 2: Prinzip der Vergleichskalibrierung

Software als Prüfmittel

Software, die Bestandteil der Beschleunigungs-BNME ist, muss als Prüfmittel betrachtet werden und sowohl die Anforderungen an ein Prüfmittel als auch die Anforderungen an Software erfüllen. Es muss der Nachweis erbracht werden, dass die Software korrekt arbeitet und die Kalibrierergebnisse korrekt angegeben werden. Die Software muss durch geeignete Methoden einer Validierung unterzogen werden (z.B. Bearbeitung eines Musterdatensatzes).

Hinweis:

Ein Problem besteht beim Wechsel der Hardware oder des Betriebssystems, da diese Fehler beinhalten können, welche die Funktion der Software beeinträchtigen.



Bild 3: Software als Prüfmittel (Quelle: PTB-Fachlaboratorium 8.31)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	13 / 25

8 Umgebungsbedingungen

Die relevanten Umgebungsbedingungen müssen der Kalibrierungsaufgabe angepasst sein, überwacht und dokumentiert werden. Gegebenenfalls sind begründete Korrekturen am Messergebnis vorzunehmen oder die Einflüsse der Umgebungsbedingungen im jeweiligen Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

Während der Kalibrierung muss sich der Messaufbau im thermischen Gleichgewicht befinden. Die von den Herstellern angegebenen Einlaufzeiten sind einzuhalten.

9 Messunsicherheit

Ausgehend von einem mathematischen Modell¹ der Auswertung einer Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern ist folgende Vorgehensweise nach ISO 16063-1, Annex A anzuwenden:

Die Unsicherheit der Messung, die zur Kalibrierung gehört, soll als „erweiterte Messunsicherheit U “ ausgedrückt und angegeben werden. Dabei ist dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) zu folgen, der die vom Internationalen Komitee für Maße und Gewicht (CIPM) empfohlene Vorgehensweise festlegt. Der Zweck von U ist die Festlegung eines Intervalls $y - U$ bis $y + U$, in dem der Wert der Messgröße Y , deren Schätzwert das Messergebnis y ist, mit großer Wahrscheinlichkeit liegt. Um annehmen zu können, dass $y - U \leq Y \leq y + U$ gilt, soll die erweiterte Messunsicherheit U wie folgt bestimmt werden:

1. Mit großer Sorgfalt sind alle Effekte, die das Messergebnis wesentlich beeinflussen, zu identifizieren und alle bekannten systematischen Messabweichungen durch Anwendung von Korrekturen oder Korrekturfaktoren auszugleichen.

Wenn ein Effekt, der das Messergebnis beeinflusst, durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (vorzugsweise Wahrscheinlichkeitsdichte, siehe Punkt 2) beschrieben wird, die einen signifikanten Erwartungswert hat (insbesondere bei einer asymmetrischen Verteilung), soll dieser als systematische Messabweichung behandelt und durch Korrektur ausgeglichen werden.

2. Jede Unsicherheitskomponente, die zur Unsicherheit der Messung beiträgt, soll durch eine Standardabweichung u_i ausgedrückt werden. Diese wird als *Standardmessunsicherheit* bezeichnet und ist gleich der positiven Quadratwurzel der Varianz u_i^2 .

Oft können einige Standardmessunsicherheiten als empirische, statistisch abgeschätzte Standardabweichungen durch statistische Analyse von Messreihen bestimmt werden (im GUM als Typ-A-Bewertung der Standardmessunsicherheit bezeichnet). Andere Standardmessunsicherheiten müssen als Standardabweichung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung abgeschätzt werden, die durch wissenschaftlich begründete Einschätzung der möglichen Werte der betrachteten Größe gefunden wird (Typ-B-Bewertung der Standardmessunsicherheit). Diese Einschätzung soll sich auf alle verfügbaren Informationen über die betreffende Größe gründen. Liegt keine spezifische Information über die möglichen Werte einer Größe, die systematische Effekte hervorruft, vor außer der begründeten Annahme, dass diese Werte innerhalb der Grenzen b_- und b_+ liegen, kann angenommen werden, dass die Größe im Intervall $[b_-; b_+]$ gleichverteilt ist. Daraus folgt eine Standardmessunsicherheit $b/\sqrt{3}$, wobei $b = (b_+ - b_-)/2$ gilt. Der Erwartungswert $(b_+ + b_-)/2$ ist in diesem Fall zur

¹ Beispiele für konkrete Modelle sind in den Folgeblättern dieser Richtlinie zu finden.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	14 / 25

Korrektion anzuwenden.

Wenn eine Einflussgröße als gleichverteilt betrachtet werden kann (rechteckförmige Wahrscheinlichkeitsdichte) und es ist bekannt, dass sie mit einer speziellen nichtlinearen Funktion (z. B. sinusförmig; Polynom 2. oder 3. Ordnung) in das Messergebnis transformiert wird, soll diese Information durch Wahl des zugehörigen Verteilungsmodells berücksichtigt werden.

Beispiel

Der Übertragungskoeffizient S eines Beschleunigungsaufnehmers für sinusförmige Beschleunigungen in der vorgeschriebenen Messrichtung wird nach der Formel $S = \hat{u} / \hat{a}$ aus der Amplitude \hat{u} der Ausgangsspannung berechnet, die durch Schwingungsanregung mit der Beschleunigungsamplitude \hat{a} hervorgerufen wird. Zu den verschiedenen verfälschenden Effekten, die das Messergebnis bei der Kalibrierung beeinflussen, möge eine signifikante Querschwingungskomponente des Schwingungserregers mit der Beschleunigungsamplitude \hat{a}_T gehören, die mit der Querempfindlichkeit S_T des Beschleunigungsaufnehmers in eine Messabweichungskomponente $e_{\hat{u}}$ transformiert wird. Für dieses Beispiel ist vorausgesetzt, dass die zu messende Beschleunigung und die Querbeschleunigung gleiche Frequenz haben und keine Phasenwinkeldifferenz zwischen ihnen vorliegt. Da die Querempfindlichkeit gewöhnlich eine sinusförmige Abhängigkeit vom Winkel β zwischen der Richtung der maximalen Querempfindlichkeit ($S_{T,\max}$) und der Richtung einer Queranregung aufweist, kann die Messabweichungskomponente durch $e_{\hat{u}} = S_T \hat{a}_T = S_{T,\max} \hat{a}_{T,\max} \cos \beta$ beschrieben werden. Wenn die Werte der maximalen Querempfindlichkeit ($S_{T,\max}$) und der maximalen Querbeschleunigungsamplitude ($\hat{a}_{T,\max}$) bekannt sind, aber der Winkel β unbekannt ist, kann eine Gleichverteilung von β im Intervall $[-\pi; \pi]$ angenommen werden. Damit führt die Einflussgröße, d. h. Querbeschleunigung mit gleichverteiltem Phasenwinkel β , zu einer Messabweichungskomponente $e_{\hat{u}}$, deren Wahrscheinlichkeitsdichte durch

$$w(e_{\hat{u}}) = \frac{1}{b\pi \sqrt{1 - \left(\frac{e_{\hat{u}}}{b}\right)^2}}, \quad -b \leq e_{\hat{u}} \leq b, \quad b = S_{T,\max} \hat{a}_{T,\max}$$

beschrieben ist (oft als arcsin-Verteilung bzw. U-Verteilung bezeichnet). Die zugehörige Standardmessunsicherheit ist

$$u(e_{\hat{u}}) = b/\sqrt{2}.$$

Der Erwartungswert $E\{e_{\hat{u}}\}$ ist in diesem Fall Null. Dies ist der beste Schätzwert für die Messabweichung $e_{\hat{u}}$.

3. Die *kombinierte Standardmessunsicherheit* u_c - als Standardmessunsicherheit der Messung von Y - soll durch Kombination der individuellen Standardunsicherheiten (und ggf. Kovarianzen) nach dem Gesetz der Fortpflanzung von Unsicherheiten bestimmt werden. Demnach wird die kombinierte Standardmessunsicherheit über die Beziehung

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}. \quad (\text{A1})$$

erhalten.

Sie basiert auf einer näherungsweisen Taylor-Reihenentwicklung von

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (\text{A2})$$

mit Abbruch nach dem linearen Glied, wobei Y die Messgröße ist, die aus N Eingangsgrößen X_1, X_2, \dots, X_N über eine funktionale Beziehung f bestimmt wird. Der Schätzwert y für die Messgröße Y wird über Gleichung (A1) aus den Schätzwerten x_1, x_2, \dots, x_N für die Werte der Eingangsgrößen erhalten. Damit lässt sich das Messergebnis - als Schätzwert der Ausgangsgröße - durch die Beziehung

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (\text{A3})$$

ausdrücken. Die Symbole $\partial f / \partial x_i$ in (A1) werden oft als Empfindlichkeitskoeffizienten c_i bezeichnet. Sie sind gleich den partiellen Abweichungen $\partial f / \partial X_i$ bei $X_i = x_i$. Das Symbol $u(x_i, x_j)$ bezeichnet die zu x_i und x_j gehörenden Schätzwerte der Kovarianzen.

Wenn keine signifikanten Korrelationen vorliegen, verkürzt sich (A1) zu

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}. \quad (\text{A4})$$

Anmerkung

Die näherungsweise Taylor-Reihenentwicklung von (A2), aus der (A1) hervorgeht, setzt hinreichende Linearität der Modellfunktion f voraus in Bezug auf die Änderung der Eingangsschätzwerte x_i innerhalb der Bereiche, die durch die Messunsicherheiten $u(x_i)$ charakterisiert werden. Dies trifft nicht zu für das in Abschnitt 2 gegebene Beispiel, wenn der Winkel β als Eingangsgröße X_i betrachtet wird. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für andere Einflussgrößen, die bei der Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern wirksam sind. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, wurde ein geeignetes Modell eingeführt. Dieses Modell sei am betrachteten Beispiel charakterisiert: In die funktionelle Beziehung für die Berechnung der Messgröße wird ein Faktor $(1 - e_{\hat{u}} / \hat{u})$ mit $e_{\hat{u}} / \hat{u} \ll 1$ als Eingangsgröße X_i eingeführt. Gl. (A2), auf dieses Beispiel zugeschnitten, reduziert sich auf 3 Eingangsgrößen,

$$Y = f(X_1, X_2, X_3),$$

wobei Y die Messgröße (Übertragungskoeffizient S), X_1 den Beschleunigungsaufnehmer-Ausgang (Spannungsamplitude \hat{u}), X_2 die Beschleunigungsamplitude \hat{a} und $X_3 = (1 - e_{\hat{u}} / \hat{u})$ bedeuten. Daraus folgt die Beziehung

$$Y = \frac{X_1}{X_2} X_3.$$

Die näherungsweise Taylor-Reihenentwicklung ist nun anwendbar und führt zur Beziehung

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\left(\frac{u(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{u(x_3)}{x_3} \right)^2},$$

für die relative kombinierte Standardmessunsicherheit, wenn keine signifikanten Korrelationen vorliegen. Bei Anwendung der im Beispiel verwendeten Symbole erhält die obige

Beziehung die Form

$$\frac{u_c(S)}{S} = \sqrt{\left(\frac{u(\hat{u})}{\hat{u}}\right)^2 + \left(\frac{u(\hat{a})}{\hat{a}}\right)^2 + \left(\frac{u(e_{\hat{u}}/\hat{u})}{1}\right)^2},$$

wobei $u(\hat{u})/\hat{u}$ die relative Messunsicherheit der Messung der Ausgangsspannungsamplitude, $u(\hat{a})/\hat{a}$ die relative Messunsicherheit der Messung der Beschleunigungsamplitude und $u(e_{\hat{u}}/\hat{u}) = u(e_{\hat{u}})/\hat{u}$ mit $u(e_{\hat{u}}) = b/\sqrt{2}$ (Erklärung siehe Beispiel) bedeuten.

Entsprechend lassen sich weitere Faktoren als Eingangsgrößen (X_4, X_5, \dots) einführen, deren Abweichungen vom Wert 1 in gleicher Weise als relative Messabweichungskomponenten der betreffenden Größe (z.B. Spannung, Beschleunigung oder Übertragungskoeffizient insgesamt) ausgedrückt werden. Damit kann die Vielfalt von Messunsicherheitsquellen gesondert berücksichtigt werden.

4. Die *erweiterte Messunsicherheit* U erhält man durch Multiplikation von u_c mit einem Erweiterungsfaktor k (k -Faktor):

$$U = k u_c,$$

wobei vorzugsweise $k = 2$ anzuwenden ist. Wenn vorausgesetzt werden kann, dass die möglichen Werte des Messergebnisses bei der Kalibrierung näherungsweise normalverteilt sind (mit näherungsweise Standardabweichung u_c), kann angenommen werden, dass der unbekannte Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von näherungsweise 95 % in dem durch U definierten Intervall liegt.

5. Die Angabe des Messergebnisses y soll in Verbindung mit der erweiterten Messunsicherheit erfolgen, siehe [18] und [5].

Darstellung der Einflussgrößen

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

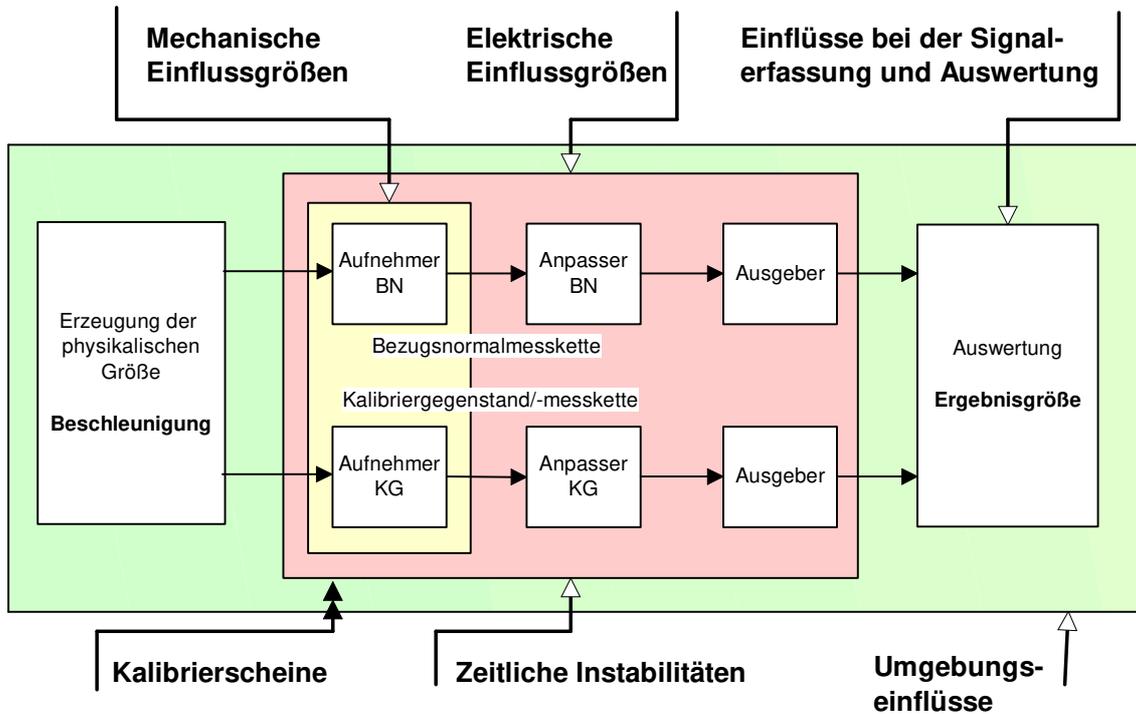


Bild 4: Darstellung von Einflussgrößen

Die Ermittlung der Messunsicherheit ersetzt nicht die Qualifikation und Erfahrung des Messtechnikers, z.B. bei der

- Auswahl des geeigneten Messverfahrens,
- Gestaltung des Messaufbaus,
- Durchführung der Messungen,
- Auswertung der Messungen.

Weitere Quellen von Messabweichungen sind in Tabelle 2 beschrieben.

Quelle	Ursache
Messgeräte	Kalibrierintervall abgelaufen, interne und externe Abgleiche, Auflösung, Rauschen, Driften, Schutzschirmtechnik
Umgebungsbedingungen	Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Vibration, Stöße, umgebendes Medium
Schaltungs-/Versuchsaufbau	Impedanzen, Leitungen, Thermospannungen, Versorgungsspannungen, mechanische Adaptionen, Einbauorte, -lagen, Massen, Fallbeschleunigung
Beobachter	Schreib-, Ablesefehler, Anwesenheit des Beobachters
Programmierung	fehlerhafte Dateizugriffe, falsche Konstanten, falsche Parameterübergabe

Tabelle 2: Quellen von Messabweichungen und Messunsicherheiten

Grundsätzlich ist zuerst sicherzustellen, dass alle systematischen Abweichungen erkannt und hierfür die Korrekturen angebracht werden. Die verbleibenden unbekanntes Messabweichungen sind in Form von abgeschätzten Messunsicherheitsbeiträgen im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

Zum Abschätzen der Messunsicherheit müssen von jeder Beschleunigungs-BNME Daten vorliegen, welche die Einflüsse auf das BN und den Kalibriergegenstand beim Kalibriervorgang beschreiben. Einflüsse können z.B. herrühren von:

- Kalibrierscheinen der beigestellten Messgeräte,
- Lage der seismischen Masse in Bezug zur Anregungsrichtung,
- Querbeschleunigungen,
- Basisdehnung der Aufspannflächen von BN und Kalibriergegenstand,
- Temperaturdifferenz des Normals und des Kalibriergegenstandes zur Referenztemperatur,
- Drehmoment bei der Montage,
- Adaptionen (Material, Oberflächengüte, usw.),
- Resonanzen im Kalibrierbauaufbau,
- Kabelführungen,
- Signalrauschen,
- Nullpunkt (Lage und Stabilität),
- Filterparameter (Filtertyp, -ordnung, -grenzfrequenzen),
- Kabel (Material, Schirmung, Kapazität),
- Erdschleifen,
- Magnetfelder.

Problematisch sind Messunsicherheitsabschätzungen bei unbekanntes oder vom Kunden veränderten Kalibriergegenständen, über die keine Informationen vorliegen. Die durch die

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	19 / 25

Beschleunigungs-BNME auf den Kalibriergegenstand einwirkenden Einflüsse können für die Berücksichtigung im Messunsicherheitsbudget nicht quantifiziert werden. Als Ausweg kann ein Hinweis an den Kunden auf dem Kalibrierschein angesehen werden, z.B. mit folgendem Inhalt:

Es liegen keine Spezifikationen/Datenblätter des Herstellers/Anwenders vor. Der Kalibriergegenstand ist somit bezüglich seiner Kennwerte als „unbekannt“ anzusehen. Die angegebene Messunsicherheit berücksichtigt deshalb nur Einflussgrößen, die aus der Kalibrierung selbst gewonnen wurden (z.B. zeitliche Instabilitäten des Beschleunigungsaufnehmer-Normals, der Verstärkerübertragungskoeffizienten und der ADUs, Stoßspitzenwertbestimmung) sowie die Messunsicherheit, die den Werten des Normals beigeordnet ist. Die Wirkung weiterer Einflussgrößen (z.B. Temperatur-, Querbeschleunigungs- und Basisdehnungsempfindlichkeit) konnte nicht berücksichtigt werden.

10 Auswertung und Dokumentation

Die Auswertung wird von der Art der Anregung bestimmt. Bei Stoßanregung werden zunächst „diskrete“ Übertragungskoeffizienten in Abhängigkeit von den Impulsspitzenwerten berechnet. In einem weitergehenden Auswertungsschritt kann ein Übertragungskoeffizient bestimmt werden, der für einen definierten Beschleunigungsbereich gilt. Diese sogenannte Einwertangabe ist die übliche Information, die auf Datenblättern oder Prüfscheinen der Hersteller steht.

Z. Zt. sind unterschiedliche Methoden verbreitet, das Übertragungsverhalten des kalibrierten Aufnehmers, charakterisiert durch eine Anzahl von ermittelten Übertragungskoeffizienten, durch einen einzigen Wert zu beschreiben:

1. Die Berechnung und Verwendung des Mittelwertes der ermittelten Übertragungskoeffizienten als Einwertangabe.
2. Die Bestimmung einer Ausgleichsgeraden aus den ermittelten Messwertpaaren (Anzeige des Kalibriergegenstandes und eingestellter Wert der Messgröße) mit Verwendung des Anstieges der Geraden als Einwertangabe. Die Ausgleichsrechnung kann dabei unterschiedlichen Kriterien unterliegen (vgl. [12], [13] und Bild 5):
 - a. Die Ausgleichsgerade wird so gewählt, dass der Anfangs- und der Endpunkt der gemessenen Kennlinie mit der Ausgleichsgeraden übereinstimmt (in der Literatur als **Festpunktmethode** oder Grenzpunkteinstellung bezeichnet).
 - b. Die Ausgleichsgerade wird so gewählt, dass der Anfangspunkt der gemessenen Kennlinie mit dem Anfangspunkt der Ausgleichsgeraden übereinstimmt. Die Steigung der Geraden wird anschließend so gewählt, dass die Abweichungen zur gemessenen Kennlinie ein bestimmtes Minimalprinzip erfüllen. Als Minimalprinzip kann z.B. die Bedingung eingesetzt werden, dass
 - der maximale Abweichungsbetrag minimal wird oder
 - die Summe der Abweichungsquadrate minimal wird (in der Literatur als **Minimummethode** oder Anfangspunkteinstellung bezeichnet).
 - c. Die Ausgleichsgerade wird insgesamt so gewählt, dass die Abweichungen zur gemessenen Kennlinie ein Minimalprinzip erfüllen. (Bei Einsatz des Prinzips der kleinsten Abweichungsquadrat-Summe wird diese Methode in der Literatur auch als **Toleranzbandmethode** bezeichnet.)

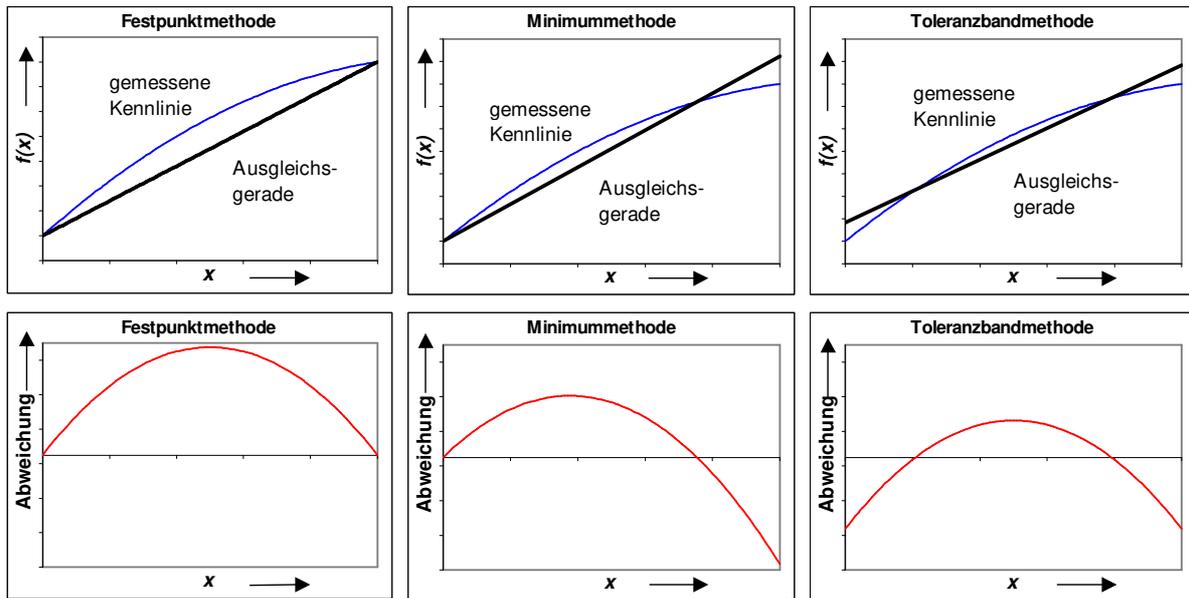


Bild 5: Verschiedene Methoden zur Gewinnung einer Einwertangabe und ein Vergleich der dabei entstehenden Abweichungen zwischen der gemessenen Kennlinie und der Ausgleichsgeraden

Die unterschiedlichen Methoden führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Daher wird empfohlen, die Einwertangabe als Steigung einer Geraden anzugeben, deren Koeffizienten durch den linearen Ausgleich nach der (Gaußschen) Methode der kleinsten Abweichungsquadrat-Summe berechnet werden (Toleranzbandmethode). In diesem Fall treten, insbesondere bei einem nichtlinearen Zusammenhang des Übertragungsverhaltens im Kalibrierbereich, in der Regel die geringsten Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem durch die Einwertangabe beschriebenen Übertragungsverhalten auf. Um eine Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse sicherzustellen, muss die Methode, nach der die Einwertangabe bestimmt wird, im Kalibrierschein angegeben werden. Bei sinusförmiger Anregung werden der Betrag und ggf. die Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz bestimmt und üblicherweise in Diagrammen dargestellt.

Zur Dokumentation sind die Anforderungen der Schrift DAkkS-DKD-5 zu beachten. Anregungsspezifische Besonderheiten bei der Dokumentation der Kalibrierergebnisse sind in den Folgeblättern DKD-R 3-1, Bl.2 ff. enthalten.

Ergänzend zur tabellarischen Darstellung kann zur Veranschaulichung eine weitergehende Visualisierung der Kalibrierergebnisse unter Einschluss von Spezifikationsgrenzen erfolgen.

Beispiel Abweichungsdiagramm mit erweiterter Messunsicherheit:

Die Angabe von Messwerten wird durch ein Abweichungsdiagramm mit auf den Messwert bezogenen Daten (v. M.) ergänzt. Sofern Spezifikationsgrenzen bekannt sind, gestattet das Diagramm mit einem Blick die Entscheidung, ob der Kalibriergegenstand i.O. ist. Dargestellt werden: Kalibrierbereich, Grenzen der Gültigkeit, Spezifikationsgrenzen, Abweichungen v. M., Messunsicherheit an jeder Stützstelle innerhalb des Kalibrierbereiches. Außerdem werden die „maximale relative Abweichung v. M.“ und für Vergleichszwecke mit Datenblattangaben, die sich i.d.R. auf den Endwert beziehen, auch die „maximale relative Abweichung bezogen auf den Endwert (v. E.)“ (häufig unpräzise als Linearität bezeichnet) angegeben. Die Angaben sind notwendig, um dem Anwender des Kalibriergegenstandes die Berechnung seiner Messunsicherheit bei der Anwendung zu ermöglichen. Das Abweichungsdiagramm ist in seinem Inhalt und Aufbau unabhängig von der Kalibrierung eines anzeigenden Kalibriergegenstandes oder eines Kalibriergegenstandes mit unbenannter Skala.

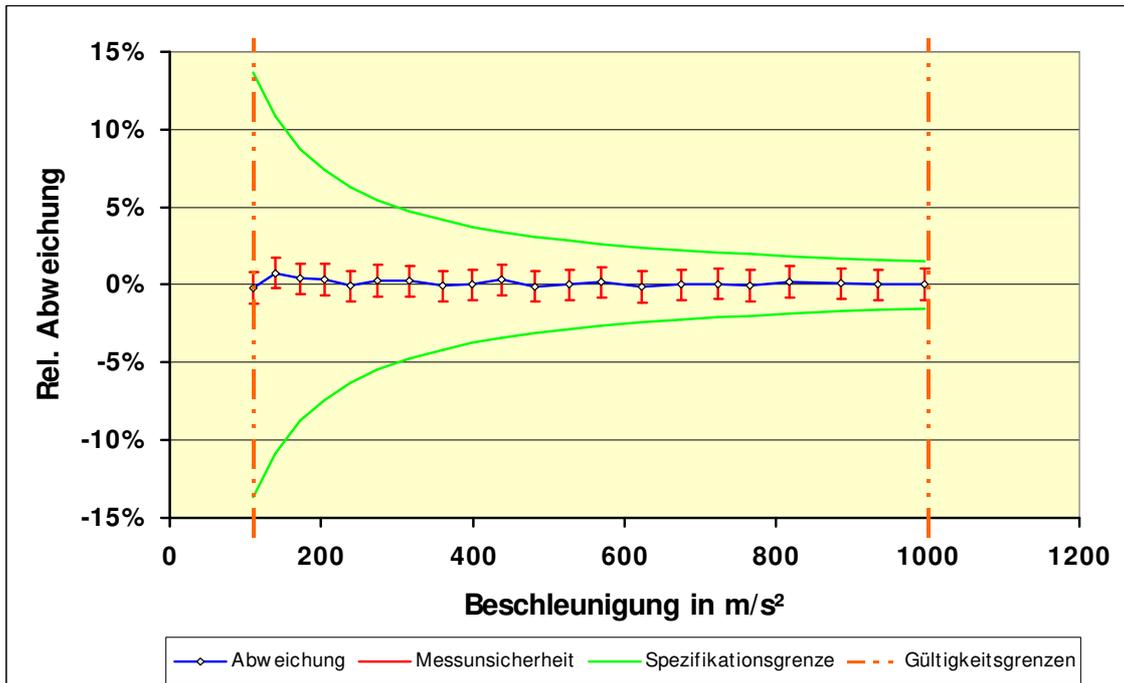


Bild 6: Abweichungsdiagramm, bezogen auf den Messwert

Anmerkung: Die untere Grenze des Gültigkeitsbereiches ist in diesem Beispiel willkürlich auf 10 % des Kalibrierbereiches gesetzt worden.

11 Kalibriermarke

Der Kalibriergegenstand erhält eine Kalibriermarke. Bei Kalibriergegenständen, die aus mehreren trennbaren Komponenten bestehen, erhält jede Komponente eine gleichlautende Marke. Falls der Kalibriergegenstand zum Schutz in einem Behältnis gelagert wird, muss die Zuordnung zum leichteren Auffinden ebenfalls durch eine gleichlautende Marke hergestellt werden.

Falls die Abmessungen des Kalibriergegenstandes das Anbringen einer Kalibriermarke nicht zulassen, ist ein entsprechender Hinweis im Kalibrierschein aufzunehmen.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	22 / 25

12 Abkürzungen

ADU	Analog-/Digital-Umsetzer
BN	Bezugsnormal
BNME	Bezugsnormalmesseinrichtung
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
DAkKS	Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH, Rechtsnachfolgerin des DKD
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, D
DKD	Deutscher Kalibrierdienst, Braunschweig
DKD-R	Richtlinie des Deutschen Kalibrierdienstes
EA	European co-operation for Accreditation
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IEC	International Electrotechnical Commission, Geneva, CH
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA
IEPE	Piezoelektrischer Aufnehmer mit integrierter Elektronik
ISO	International Organization for Standardization, Geneva, CH
KG	Kalibriergegenstand
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
PMÜ	Prüfmittelüberwachung
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, D
QM	Qualitätsmanagement
v. E.	vom Endwert
v. M.	vom Messwert

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	23 / 25

13 Literatur

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

ISO 16063-1	<i>Basic concepts</i>
ISO 16063-1x	<i>Primary calibrations</i>
-11	<i>Interferometrische Sinuskalibrierung (translatorisch)</i>
-12	<i>Reziprozitäts-Kalibrierung</i>
-13	<i>Interferometrische Stoß-Kalibrierung</i>
-14	<i>Hochintensitäts-Stoß-Kalibrierung²</i>
-15	<i>Interferometrische Sinuskalibrierung (rotatorisch)²</i>
ISO 16063-2x	<i>Secondary calibrations</i>
-21	<i>Sinus-Kalibrierung, Vergleichsverfahren (translatorisch)</i>
-22	<i>Stoß-Kalibrierung, Vergleichsverfahren²</i>
-23	<i>Sinus-Kalibrierung, Vergleichsverfahren (rotatorisch)²</i>
ISO 16063-3x	<i>Calibration in severe environments³</i>
-31	<i>Testing of transverse sensitivity (sinusoidal)</i>
-32	<i>Testing of transverse shock sensitivity</i>
-33	<i>Testing of base strain sensitivity</i>
-35	<i>Testing of acoustic sensitivity</i>
-36	<i>Testing of mounting torque sensitivity</i>
-37	<i>Testing of fixed temperature sensitivity</i>
-38	<i>Testing of transient temperature sensitivity</i>
-39	<i>Testing of magnetic field sensitivity</i>

- [4] **IEEE Std 1057-1994:** *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders*
IEEE, New York, USA, 1994
- [5] **DKD-5:** *Anleitung zum Erstellen eines DKD-Kalibrierscheines*
Hrsg.: PTB Braunschweig, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1999
incl. *Änderungsblatt zu DKD-5*; Januar 2000
- [6] **Tichý, J.; Gautschi G.:** *Piezoelektrische Meßtechnik*
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980, ISBN 3-540-09448-2
- [7] **Harris, Cyril M.; Crede, Charles E.:** *Shock And Vibration Handbook*
4th Edition, McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-026920-3
- [8] **Brüel & Kjær (Serridge, M.; Licht, T. R.):** *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers, Theorie and Application Handbook*, Brüel & Kjær, Nærum, DK, 1986
- [9] **ENDEVCO:** *Handbuch der Schock- und Vibrationsmeßtechnik*
ENDEVCO Deutschland, Heidelberg 1992
- [10] **Sill, R.D.:** *Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers*, ENDEVCO Technical Paper TP 299, p 32
- [11] **Sill, R.D.:** *Mass Loading in Back-To-Back Reference Accelerometers*
ENDEVCO Technical Paper TP 310, p 8

² z. Z. im Entwurfsstadium

³ z. Z. noch ISO 5347-11 bis –19 (Ausgabe 1993)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20180823B	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	24 / 25

[12] **VDI/VDE 2600, Blatt 4:** *Begriffe zur Beschreibung der Eigenschaften von Meßeinrichtungen*, Beuth Verlag Berlin 1973

[13] **Dubbel:** *Taschenbuch für den Maschinenbau*

Hrsg.: W. Beitz und K.-H. Grothe, Springer-Verlag, 20. Auflage, 2001, ISBN 3-540-67777-1

Grundlage für Messunsicherheitsbetrachtungen sind folgende Dokumente und Veröffentlichungen:

[14] **ISO:** *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
1st Edition 1993, ISO, Geneva, CH, ISBN 92-67-10188-9

[15] **DIN V EN V 13005:** *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*
Beuth Verlag Berlin, 1995, ISBN 3-410-13405-0

(Deutsche Übersetzung des „*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*“)

[16] **EA-4/02 (früher EAL-R2):** *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*
Edition 1, April 1997, <http://www.european-accreditation.org>

[17] **EA-4/02-S1:** Supplement 1 to EA-4/02 (früher EA-R2-S1) : *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, Examples, Edition 1, November 1997, <http://www.european-accreditation.org>

[18] **DKD-3:** *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen*

Hrsg.: PTB Braunschweig, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1998

(Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02: „*Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*“). DAkS-DKD-3 (2010) ist inhaltsgleich mit DKD-3.

[19] **DKD-3-E1:** *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen*, Ergänzung 1 -Beispiele-
Hrsg.: PTB Braunschweig, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1998

(Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S1: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, Examples). DAkS-DKD-3-E1 (2010) ist inhaltsgleich mit DKD-3-E1.

[20] **DIN 1319-3:** *Grundlagen der Meßtechnik*, Teil 3: *Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin 1996

[21] **DIN 1319-4:** *Grundlagen der Meßtechnik*, Teil 4: *Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin 1999

[22] **VDI/VDE 2620:** *Unsichere Messungen und ihre Wirkung auf das Messergebnis*
Beuth Verlag Berlin, Entwurf Dezember 1998

[23] **Martens, H.-J. v.; Rogazewski, P.:** *Representation and Transfer of the Units of Vibration Quantities in the GDR*, Bulletin OIML No. 108, 1987

[24] **Martens, H.-J. v.; Pippig, E.-E.:** *Über Möglichkeiten zur Beschreibung des Fehlers korrigierter Meßergebnisse auf der Grundlage der internationalen Empfehlung INC-1*
(1980), Metrologische Abhandlungen, Berlin 10 (1990) 1, S. 1 – 44

[25] **ISO 16063-1:** *Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic concepts*, 1st Edition, 1998-10-15, **Annex A:** *Expression of uncertainty of measurement in calibration*

[26] **Martens, H.-J. v.:** *Beispiel zur Ermittlung und Angabe der Meßunsicherheit: Kalibrierung eines Beschleunigungsaufnehmer-Normals mit sinusförmiger Anregungsbeschleunigung der Frequenz 800 Hz und Beschleunigungsamplitude 50 m/s²*
Manuskript, Januar 1999

[27] **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

[28] **Martens, H.-J. v.:** *Evaluation of uncertainty in measurements – problems and tools*
OPTICS and LASERS in ENGINEERING, Elsevier Science, Vol. 37, 2002



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de