

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Richtlinie
DKD-R 3-1**

Blatt 1

**Kalibrierung von
Beschleunigungsmessgeräten
nach dem Vergleichsverfahren
Grundlagen**

Ausgabe 04/2019

<https://doi.org/10.7795/550.20190502A>



	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	2 / 22

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

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A</p>	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	3 / 22

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-1 Blatt 1 Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen, Ausgabe 04/2019, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20190502A

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



Autoren:

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

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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	4 / 22

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.

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

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Kraft und Beschleunigung* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2002 erstellt. Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält etliche redaktionelle Änderungen und eine kürzere Darstellung des Messunsicherheitsabschnittes; das Literaturverzeichnis wurde komplett überarbeitet. Darüber hinaus ist sie inhaltsgleich mit der DKD-R 3-1, Blatt 1: 2018.

Ausgabe: 03/2002 veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage
3. Neuauflage: 2019, durch den DKD

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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	5 / 22

Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich.....	6
2	Symbole.....	6
3	Bestandteile des Beschleunigungsmessgerätes.....	8
4	Vorbereitung der Kalibrierung.....	8
4.1	<i>Kundenabstimmung</i>	8
4.2	<i>Kalibrierfähigkeit</i>	10
4.2.1	<i>Beschaffenheits-/Funktionsprüfungen von Beschleunigungsaufnehmern</i>	10
4.2.2	<i>Beschaffenheits-/ Funktionsprüfungen von Anpasser und Ausgeber</i>	11
4.3	<i>Anforderungen an die Adaptionen</i>	11
4.4	<i>Handhabung</i>	12
5	Anschluss an nationale Normale, Rückführbarkeit.....	12
6	Auswertung von PTB-Kalibrierscheinen für Beschleunigungs-Bezugsnormale.....	13
7	Beschleunigungs-Bezugsnormalmesseinrichtung.....	13
8	Umgebungsbedingungen.....	15
9	Messunsicherheit.....	15
9.1	<i>Modellgleichung und Berechnung</i>	15
9.2	<i>Darstellung der Einflussgrößen</i>	17
10	Auswertung und Dokumentation.....	19
11	Literatur.....	20

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	6 / 22

1 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.

2 Symbole

Für die Anwendung dieser DKD-Richtlinie gelten die in folgender Tabelle genannten Symbole. Die in Abschnitt 9 „Messunsicherheit“ verwendeten Symbole werden dort extra aufgeführt.

Abkürzungen/ Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
a	m/s ²	Beschleunigung
f	Hz	Frequenz
S_{ua}	mV/(m/s ²)	Betrag des komplexen Spannungsübertragungskoeffizienten einer Messkette
$\Delta\varphi_{ua}$	1°	Phasenverschiebung des komplexen Spannungsübertragungskoeffizienten einer Messkette
S_{qa}	pC/(m/s ²)	Betrag des komplexen Ladungsübertragungskoeffizienten eines Beschleunigungsaufnehmers
$\Delta\varphi_{qa}$	1°	Phasenverschiebung des komplexen Ladungsübertragungskoeffizienten eines Beschleunigungsaufnehmers
S_{uq}	mV/pC	Betrag des komplexen Übertragungskoeffizienten eines Ladungsverstärkers
$\Delta\varphi_{uq}$	1°	Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten eines Ladungsverstärkers
U	V	Elektr. Spannung
ADU		Analog-Digital-Umsetzer
BN		Bezugsnormal
BNME		Bezugsnormalmesseinrichtung
CIPM		Comité International des Poids et Mesures
DIN		Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, D
DKD		Deutscher Kalibrierdienst, Braunschweig, D
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
QMH		Qualitätsmanagementhandbuch
v. E.		vom Endwert
v. M.		vom Messwert

3 Bestandteile des Beschleunigungsmessgerätes

Das Beschleunigungsmessgerät besteht aus Beschleunigungsaufnehmer, Anpasser (z. B. Verstärker) und einem Anzeiger. 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. 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.

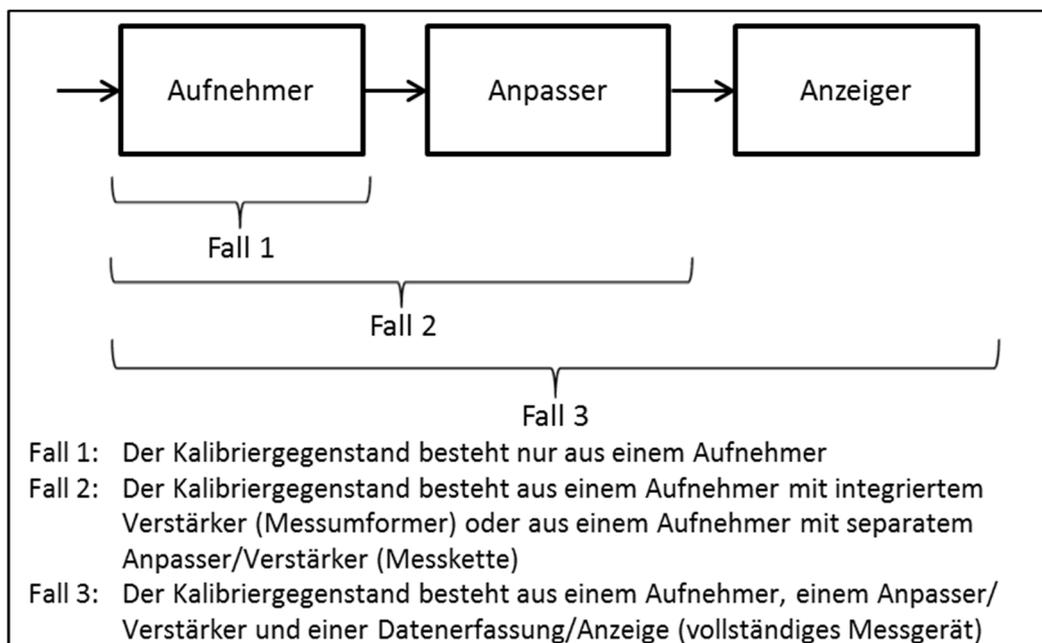


Abbildung 1: Fallunterscheidung Kalibriergegenstand

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 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“.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	9 / 22

- Aussagen zur Langzeinstabilität 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 Kalibrierlaboratorien können Empfehlungen über Fristen ausgesprochen werden, ggf. unter Hinweis auf Normen oder die Prüfmittelüberwachung (PMÜ) des Kunden.
- Mit Kalibrierscheinen, die im Rahmen einer gültigen Akkreditierung (z. B. durch die DAkkS) ausgestellt wurden, ist der Nachweis der Rückführung stets und unmittelbar gegeben, Kalibrierscheine sind dokumentierte Informationen im Sinne der ISO 9001.

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 Informationen 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 erforderlich. Kalibrierverfahren, die von den einschlägigen Richtlinien und Normen abweichen, müssen vor der Anwendung validiert werden. Die Validierung ist entsprechend als Ergänzung zum QMH zu dokumentieren
- Für die Angabe einer Konformitätsaussage sind Angaben von Spezifikationsgrenzen als maximal zulässige Abweichungen (Herkunft: z. B. Gesetz, Norm, Datenblatt, werksinterne Vorgabe) nötig.

Achtung!

Die Angabe einer Konformitätsaussage 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 Herstelldatum des Messgerätes nicht aufeinander abgestimmt sind; für Produkte gleicher Bezeichnung können die technischen Daten im Laufe der Jahre verändert worden sein.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	10 / 22

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?
- Wie soll im Falle schwerwiegender messtechnischer Mängel (z. B. Isolationswiderstand < Grenzwert) vorgegangen werden?
- Auswertung und Umfang der Dokumentation; vollständiger Kalibrierschein mit Messwerttabellen, Ausgleichsfunktionen, Konformitätsaussage
- Welche Kalibrierergebnisse sollen ggf. im internen Speicher (z. B. TEDS) 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 Ausgangssignalstabilität 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	11 / 22

Materialien, wie sie für die spätere Anwendung typisch sind, bestimmt werden (Erwärmung durch Verlustleistung bei passiven Aufnehmern).

- Nullsignal im unbelasteten Zustand
Dies ist eine wichtige Kenngröße, 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, die Kenngröße „Nullsignal“ über die Lebensdauer eines Messgrößenaufnehmers zu dokumentieren.

- Wert und Vorzeichen des Kalibriersignals bei Zuschalten eines Shunts (Nebenschlusswiderstand) parallel zu einem Brückenweig
- Zusammenhang zwischen der Richtung der physikalischen Eingangsgröße und der Polarität des Ausgangssignals (Identifikation von Beschaltungsfehlern)

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. TEDS.

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

4.3 Anforderungen an die Adaptionen

Mit dem Kunden ist abzustimmen, wer die Adaptionen beistellt bzw. zunächst anfertigt und 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 (center 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. Querbeschleunigungen zu minimieren, ist es bei einigen Kalibriereinrichtungen zweckmäßig, durch die Adaptionen den „Gesamt“-Massenmittelpunkt des Kalibriergegenstandes (center of gravity) in die Wirkachse zu legen.

- Möglichst wenige 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)

Tabelle 1: Adaptermaterialien

Material	E-Modul E in 10^3 N/mm ²	Dichte ρ in 10^3 kg/m ³	E/ρ in 10^6 m ² /s ²
Beryllium	293	1,8	166,7
Technische Keramik z. B. Siliciumcarbid	385	3,2	120
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

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 der Reihe ISO 16063-1x beschriebenen primären 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	13 / 22

Beschleunigungsaufnehmer-Normals erfolgt i. d. R. in der PTB; mögliche Kalibrierergebnisse sind (hier für eine Messkette mit einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer):

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

Die elektrische Kalibrierung des Ladungsverstärkers kann in der PTB oder in einem dafür akkreditierten Kalibrierlaboratorium durchgeführt werden. Die Rekalibrierfrist des Beschleunigungsaufnehmer-Normals ist durch die Akkreditierungsaufgaben festgelegt (typischerweise 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 in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Entsprechende Daten aus den Rückführungsnachweisen müssen nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 Abschn. 5.9 oder DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Abschn. 7.7 (spätestens ab November 2020) vom Laboratorium ausgewertet und dokumentiert werden.

6 Auswertung von PTB-Kalibrierscheinen für Beschleunigungs-Bezugsnormale

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 in der Messunsicherheitsbilanz, die von der Art und Weise des gewählten Algorithmus zur Bildung eines Übertragungskoeffizienten für einen Beschleunigungsbereich abhängen.

7 Beschleunigungs-Bezugsnormalmesseinrichtung

Dieser Abschnitt der Richtlinie geht davon aus, dass die Beschleunigungs-BNME nach dem Vergleichsverfahren arbeitet (Abbildung 2). Dabei wirkt die von der Einrichtung erzeugte physikalische Größe Beschleunigung auf ein auf die SI-Einheiten rückführbar kalibriertes Beschleunigungs-BN und den Kalibriergegenstand ein. Diese Form der Realisierung wird von den in Blatt 2 und 3 der Richtlinie beschriebenen Verfahren genutzt. Primäre Verfahren zur laserinterferometrischen Rückführung der realisierten Beschleunigung werden gesondert in Blatt 4 behandelt.

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 Referenzempfängers
- Bestimmen des Übertragungsverhaltens von Verstärkern, ADUn, usw.

Aus den Aufzeichnungen muss die zeitliche (In-) Stabilität der signalführenden Komponenten der Beschleunigungs-BNME abgeleitet werden können.

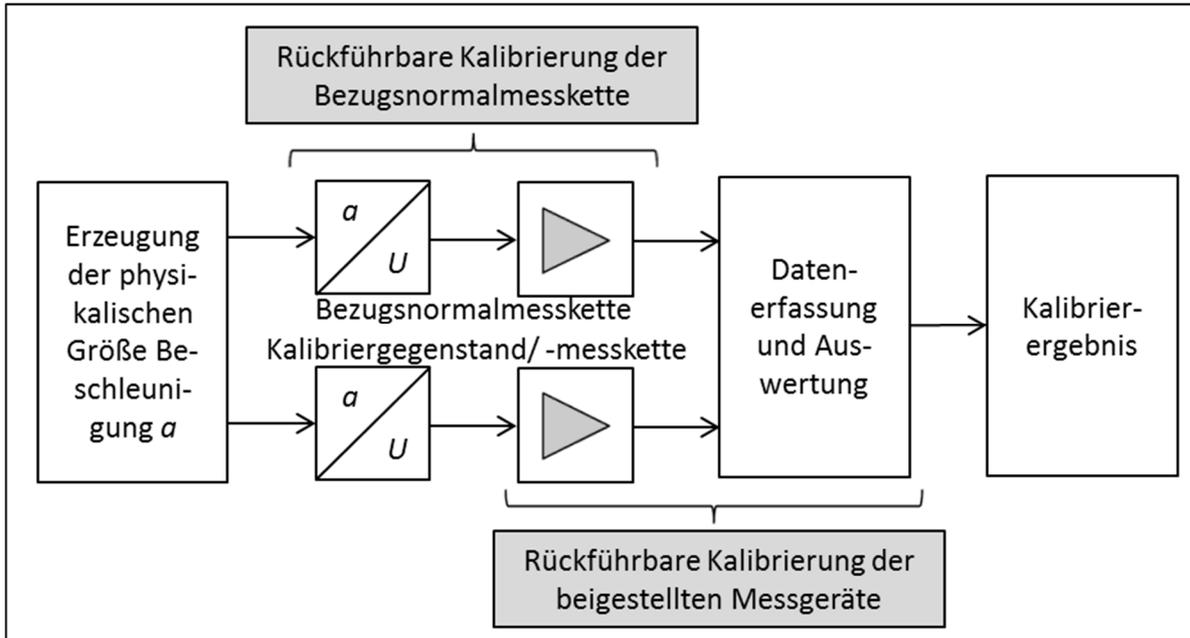


Abbildung 2: Prinzip der Vergleichskalibrierung

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.



Abbildung 3: Software als Prüfmittel (Quelle: PTB)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	15 / 22

8 Umgebungsbedingungen

Die relevanten Umgebungsbedingungen müssen der Kalibrierungsaufgabe angepasst sein, rückführbar überwacht und dokumentiert werden. Gegebenenfalls können begründete Korrekturen am Messergebnis vorgenommen werden; die Einflüsse der Umgebungsbedingungen sind in der jeweiligen Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

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

Die Kalibrierung sollte bei einer Umgebungstemperatur von $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ ausgeführt werden. Die relative Luftfeuchte sollte max. 75 % betragen.

9 Messunsicherheit

9.1 Modellgleichung und Berechnung

Allgemein wird der Zusammenhang zwischen der Ergebnisgröße Y und den Eingangsgrößen X_i durch die Bestimmungsgleichung:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

definiert. Im Rahmen von Messunsicherheitsbetrachtungen wird die Bestimmungsgleichung zur Modellgleichung erweitert.

Der Schätzwert y der Ergebnisgröße Y wird im Allgemeinen durch Einsetzen der Schätzwerte x_i der Eingangsgrößen X_i berechnet:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

Es wird vorausgesetzt, dass die Schätzwerte „beste Schätzwerte“ sind. Systematische Messabweichungen, die sich häufig in unsymmetrischen Verteilungsfunktionen äußern, sind durch Korrekturen bereits berücksichtigt worden. Der Schätzwert y der Ergebnisgröße Y wird durch das Einsetzen von $N' < N$ Eingangsgrößen als Bestimmungsgrößen gewonnen. Bei der Ermittlung der Messunsicherheit werden zusätzlich $N - N'$ Eingangsgrößen X_i durch die Einführung von zusätzlichen Korrekturfaktoren K_i berücksichtigt.

Die Bestimmungsgleichung für den Betrag des Übertragungskoeffizienten S_{xa} eines Beschleunigungsaufnehmers oder einer Messkette im Vergleichsverfahren hat folgende Form¹:

$$S_{xa} = S_S \cdot \frac{X}{U_S} \quad (3)$$

Die erweiterte Modellgleichung für den Betrag des Übertragungskoeffizienten, in der alle wesentlichen Korrekturfaktoren K_i Berücksichtigung finden, ergibt sich zu:

¹ Für Messgeräte mit Anzeige (Abbildung 1, Fall 3) ist das hier beschriebene Vorgehen nicht direkt anwendbar.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	16 / 22

$$S_{xa} = S_S \cdot \frac{X}{U_S} \cdot [K_{S_S} \cdot K_X \cdot K_{U_S} \cdot K_1 \cdot \dots \cdot K_{N-3}] \quad (4)$$

Für die Phasenverschiebung φ_{xa} des Übertragungskoeffizienten folgt entsprechend:

$$\varphi_{xa} = \varphi_X - \varphi_U + \varphi_S + \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_{M-3} \quad (5)$$

Dabei bedeutet:

- S_{xa} Betrag des komplexen Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes, $x = q$ für Aufnehmer mit Ladungsausgang, $x = u$ für Aufnehmer (oder Messketten) mit Spannungsausgang
- S_S Betrag des Übertragungskoeffizienten des Bezugsnormals (engl. reference standard); aus der Rückführung
- U_S gemessene Ausgangsgröße (bspw. Amplitude) des Bezugsnormals
- X gemessene Ausgangsgröße (bspw. Amplitude) des Kalibriergegenstandes
- φ_{xa} Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes
- φ_U gemessene Phasenlage des Bezugsnormals
- φ_X gemessene Phasenlage des Kalibriergegenstandes
- φ_S Phasenverschiebung des Übertragungskoeffizienten des Bezugsnormals (aus der Rückführung)

Die Korrekturfaktoren K_i für verschiedene Eingangsgrößen lassen sich typischerweise in der Form

$$K_i = (1 \pm e_i) \quad (6)$$

darstellen. Wobei an Stelle der „1“ auch ein anderer Summand zur Erwartungswertkorrektur einer bekannten systematischen Abweichung stehen kann. Die e_i realisieren relative Messunsicherheiten der Korrekturfaktoren K_i . Im Rahmen der Aufstellung einer Messunsicherheitsbilanz müssen für alle bekannten Einflussgrößen entsprechende Korrekturfaktoren betrachtet werden; welche das typischerweise sind, ist den weiteren Blättern dieser Richtlinie zu entnehmen.

Liegen keine signifikanten Korrelationen vor, berechnet sich die Standardmessunsicherheit $u_c(y)$ für den Schätzwert y näherungsweise [1] zu:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (7)$$

Die kombinierte **relative** Messunsicherheit des Betrags des Übertragungskoeffizienten S_{xa} ergibt sich bei diesem Ansatz zu:

$$\frac{u_c(y)}{y} = \frac{u_{S_{xa}}}{S_{xa}} = \sqrt{\sum_i \frac{u_i^2}{X_i^2}} \quad (8)$$

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	17 / 22

Also als Quadratwurzel der Summe der Quadrate der relativen Messunsicherheiten aller Einflussgrößen.

Die kombinierte absolute Messunsicherheit für die Phasenverschiebung ist durch die Gleichung

$$u_{\varphi_{xa}} = \sqrt{\sum_i u_{\varphi_i}^2} \quad (9)$$

bestimmt.

Die einzelnen Beiträge sind sorgfältig zu untersuchen, um für die verwendete Gerätekonfiguration die konkrete Messunsicherheitsbilanz aufzustellen. Das Ergebnis ist tabellarisch für die kleinste angebbare Messunsicherheit zusammenzufassen.

Die **erweiterte** (relative) kombinierte Messunsicherheit U , ergibt sich dann durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor k . Sie wird im Kalibrierschein angegeben und soll sicherstellen, dass der Wert der Messgröße mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (typisch 95 %) im Intervall $Y \pm U$ bzw. $Y \cdot (1 \pm \frac{U}{Y})$ liegt. Bei der begründeten Annahme einer Normalverteilung für die Messgröße hat k in guter Näherung den Wert 2.

9.2 Darstellung der Einflussgrößen

Für die Aufstellung des Modells der Auswertung wird eine grafische Darstellung des Messprinzips beispielsweise in einem Blockschaltbild (vergl. Abb. 4) oder Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa Diagramm) empfohlen. Hieraus werden die Einflussgrößen gut ersichtlich. Es visualisiert den Zusammenhang zwischen der Ursache (Anregungsbeschleunigung) und der Wirkung (Ergebnisgröße, Messergebnis) unter dem Einfluss von Störgrößen.

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.

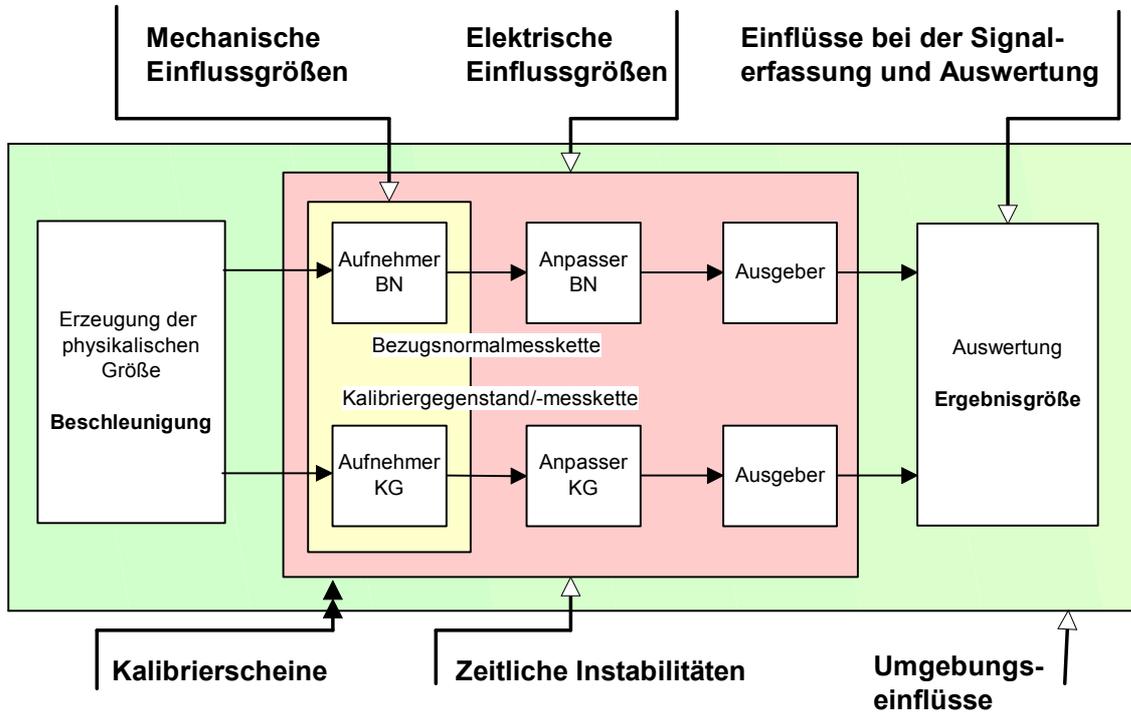


Abbildung 4: Darstellung von Einflussgrößen

Tabelle 2: Quellen von Messabweichungen und Messunsicherheiten

Quelle	Ursache
Messgeräte	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

Grundsätzlich ist zuerst sicherzustellen, dass alle systematischen Abweichungen erkannt und hierfür soweit möglich die Korrekturen angebracht werden. Die verbleibenden unbekanntenen Messabweichungen sind in Form von abgeschätzten Messunsicherheitsbeiträgen in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	19 / 22

Zur Ermittlung 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:

- Kalibrierergebnissen 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 Kalibrieraufbau
- Kabelführungen
- Signalrauschen
- Nullpunkt (Lage und Stabilität)
- Filterparameter (Filtertyp, -ordnung, -grenzfrequenzen)
- Kabel (Material, Schirmung, Kapazität)
- Brummen (z. B. durch Erdschleifen)
- Magnetfelder

Problematisch ist die Ermittlung der Messunsicherheit bei unbekanntem oder vom Kunden veränderten Kalibriergegenständen, über die keine Informationen vorliegen. Die durch die Beschleunigungs-BNME auf den Kalibriergegenstand einwirkenden Einflüsse können für die Berücksichtigung in der Messunsicherheitsbilanz 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 Kenngrößen 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 ADU, 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 Stoßspitzenwerten berechnet. In einem weitergehenden Auswertungsschritt kann ein Übertragungskoeffizient bestimmt werden, der für einen definierten Beschleunigungsbereich gilt (siehe Blatt 2 dieser Richtlinie).

Bei sinusförmiger Anregung werden der Betrag und ggf. die Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz bestimmt und in Tabellen und ggf. Diagrammen dargestellt. Hier wird im Falle von wiederholten Messungen ein arithmetischer Mittelwert gebildet (siehe Blatt 3 dieser Richtlinie).

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	20 / 22

Zur Dokumentation sind die Anforderungen des Regelwerks DAkKS-DKD-5 zu beachten. Anregungsspezifische Besonderheiten bei der Dokumentation der Kalibrierergebnisse sind in den Folgeblättern der DKD-R 3-1 enthalten.

11 Literatur

Anm.: Nicht alle nachfolgend aufgelisteten Literaturstellen sind im vorangehenden Text dieser Richtlinie referenziert. Sie sollen dem technisch interessierten Leser als weiterführende Lektüre dienen.

- [1] **JCGM 100:2008**, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in Measurement (GUM), BIPM - JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) Sèvres (Frankreich), 2008.
- [2] **JCGM 101:2008**, Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method, BIPM - JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) Sèvres (Frankreich), 2008.
- [3] **JCGM 200:2012** International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition), BIPM - JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) Sèvres (Frankreich), 2008.
- [4] **ISO 2041:2009** *Vibration and shock –Vocabulary*
2nd Edition, ISO, Geneva, CH, 2009
- [5] **DIN ISO 5348**: Mechanische Schwingungen und Stöße - Mechanische Ankopplung von Beschleunigungsaufnehmern (ISO 5348:1998), DIN, 1999-07
- [6] **ISO 16063: (Reihe)** Methods for the calibration of vibration and shock transducers
ISO, Geneva, CH
- [7] **IEEE Std 1057-2007**: *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders*
IEEE, New York, USA, 2007
- [8] **EA-4/02 M:2013**: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (Deutsche Übersetzung), Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS), 2018
- [9] **DAkKS-DKD-5**: *Anleitung zum Erstellen eines Kalibrierscheines*,
Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS), 2010
- [10] **71 SD 0 001**: *Allgemeine Regeln zur Akkreditierung von Konformitätsbewertungsstellen*, Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS), 2012
- [11] **71 SD 0 002**: *Anleitung Flexibilisierung des Akkreditierungsbereichs von Prüflaboratorien, Kalibrierlaboratorien und medizinischen Laboratorien*,
Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS), 2015
- [12] **71 SD 0 004**: *Leitfaden zum Einsatz von Computersystemen in akkreditierten Laboratorien*, Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS), 2010
- [13] **71 SD 0 005**: *Merkblatt zur metrologischen Rückführung im Rahmen von Akkreditierungsverfahren*, Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS),
Version 1.4, 2016
- [14] **71 SD 0 006**: *Rückführung von Mess- und Prüfmitteln auf nationale Normale*,
Hrsg.: Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS), 2010

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen https://doi.org/10.7795/550.20190502A	DKD-R 3-1 Blatt 1	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	21 / 22

- [15] **Tichý, J.; Gautschi G.:** *Piezoelektrische Meßtechnik*
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980, ISBN 3-540-09448-2
- [16] **Harris, Cyril M.; Crede, Charles E.:** *Shock and Vibration Handbook*
4th Edition, McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-026920-3
- [17] **Brüel & Kjær (Serridge, M.; Licht, T. R.):** *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers, Theorie and Application Handbook*, Brüel & Kjær, Nærum, DK, 1986, <https://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf>
- [18] **Sill, R.D.:** *Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers*, ENDEVCO Technical Paper TP 299,
<https://endevco.com/download/24461/>
- [19] **Sill, R.D.:** *Mass Loading in Back-To-Back Reference Accelerometers*
ENDEVCO Technical Paper TP 310, <https://endevco.com/download/24391/>
- [20] **L. Klaus, H. Volkerts, Th. Bruns:** *Calibration of bridge-, charge- and voltage amplifiers for dynamic measurement applications*, Metrologia, 52, 1, 2015
- [21] **H. Volkerts, Th. Bruns:** *The Influence of the Source Impedance on Charge Amplifier*, Proc. of XX IMEKO World Congress, Busan, Korea, 2011
- [22] **A. Täubner, H. Schlaak, M. Brucke, Th. Bruns:** *The influence of different vibration exciter systems on high frequency primary calibration of single-ended accelerometers*, Metrologia, 47, 1, 2009
- [23] **Th. Bruns, A. Link, A. Täubner:** *The influence of different vibration exciter systems on high frequency primary calibration of single-ended accelerometers: II*
Metrologia 49, 1, 2011



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de