

**Physikalisch-
Technische
Bundesanstalt**



DKD

**Richtlinie
DKD-R 3-1**

**Kalibrierung von
Beschleunigungsmessgeräten
nach dem Vergleichsverfahren**

Blatt 2

Stoßanregung

Ausgabe 09/2018

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



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 Stoßanregung https://doi.org/10.7795/550.20180823C | DKD-R 3-1 Blatt 2 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 3 / 36 |

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-1, Blatt 2, Kalibrieren von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

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

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 | SYMBOLS UND BENENNUNGEN | 6 |
| 4 | KALIBRIEREINRICHTUNGEN | 7 |
| 4.1 | STOßPENDEL-KALIBRATOR..... | 7 |
| 4.1.1 | <i>Aufbau und Prinzip.....</i> | 7 |
| 4.1.2 | <i>Einsatzgrenzen</i> | 9 |
| 4.2 | STOßKALIBRATOREN MIT ZENTRALEM UND GERADLINIGEM STOß | 10 |
| 4.2.1 | <i>Aufbau und Prinzip des pneumatischen Stoß-Kalibrators</i> | 10 |
| 4.2.2 | <i>Aufbau und Prinzip des Kugelfall-Kalibrators</i> | 12 |
| 4.2.3 | <i>Einsatzgrenzen des pneumatischen Stoß-Kalibrators und des Kugelfall-Kalibrators</i> | 14 |
| 5 | SIGNALVERLÄUFE, SPITZENWERTERMITTLUNG UND ÜBERTRAGUNGSKOEFFIZIENT | 15 |
| 6 | VORBEREITUNG UND ABLAUF DER KALIBRIERUNG | 20 |
| 6.1 | VORBEREITENDE MAßNAHMEN BEI ALLEN KALIBRATOREN..... | 20 |
| 6.2 | SPEZIELLE VORBEREITUNGEN..... | 21 |
| 6.2.1 | <i>Spezielle Vorbereitungen beim Stoßpendel-Kalibrator.....</i> | 21 |
| 6.2.2 | <i>Spezielle Vorbereitungen beim pneumatischen Stoß-Kalibrator und beim Kugelfall-Kalibrator.....</i> | 21 |
| 6.3 | DURCHFÜHRUNG..... | 21 |
| 6.3.1 | <i>Durchführung beim Stoßpendel-Kalibrator</i> | 21 |
| 6.3.2 | <i>Durchführung beim pneumatischen Stoß-Kalibrator und beim Kugelfall-Kalibrator.....</i> | 23 |
| 7 | AUSWERTUNG | 23 |
| 8 | WARTUNG UND KONTROLLE | 26 |
| 9 | KONTROLLE DER ANFORDERUNGEN AN STOßKALIBRIERUNGEN VON BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERN..... | 26 |
| 10 | MESSUNSICHERHEITSBETRACHTUNGEN | 27 |
| 10.1 | DARSTELLUNG DER EINFLUSSGRÖßEN..... | 27 |
| 10.2 | MODELL..... | 27 |
| 10.3 | ABWEICHUNGSSPANNE W' | 29 |
| 10.4 | MESSUNSICHERHEITSBUDGET | 29 |
| 10.4.1 | <i>Budgettabelle, allgemein.....</i> | 29 |
| 10.4.2 | <i>Budgettabelle, Werte</i> | 31 |
| 10.4.3 | <i>Säulendiagramm der Einflussgrößen</i> | 32 |
| 11 | ANGABEN IM KALIBRIERSCHEIN..... | 32 |
| 12 | AUFZEICHNUNGEN IM KALIBRIERLABORATORIUM..... | 33 |
| 13 | LITERATUR..... | 33 |

1 Vorwort

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

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

Die vorliegende 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 2 (Ausgabe 2010). Die DAkKS wird die DAkKS-DKD-R 3-1, Blatt 2 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 geht auf Kalibrierverfahren ein, bei denen eine stoßförmige Beschleunigung mit einem **Hammer-Amboss-System** erzeugt wird. Sie gilt für die Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten, die einen seismischen Aufnehmer beinhalten. Seismische Aufnehmer besitzen eine seismische Masse, die über ein nachgiebiges und u. U. ein dämpfendes Element mit einem Gehäuse verbunden ist und die in einem bestimmten Frequenzbereich proportional zu einer einwirkenden Beschleunigung ausgelenkt wird. Diese Auslenkung wird häufig durch Änderung von Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten oder durch Nutzung des piezoelektrischen Effekts in ein elektrisches Signal umgewandelt. Voraussetzung für die stoßförmige Kalibrierung ist eine ausreichend hohe Resonanzfrequenz des Aufnehmers.

Bei Kalibriergegenständen, über die keine Informationen des Frequenzverhaltens vorliegen, sollte vor der Kalibrierung eine Frequenzgangbestimmung vorgenommen werden. Die kürzeste auf den Kalibriergegenstand anwendbare Stoßdauer sollte den Spezifikationen des Herstellers entnommen werden, um eine Beschädigung oder eine unzulässig hohe Messunsicherheit zu vermeiden. Liegen Herstellerangaben nicht vor, sollte die kürzeste Stoßdauer $t_{1,10\%}$ ¹ nach folgender Beziehung ermittelt werden:

$$t_{1,10\%} \geq \frac{5}{f_{\text{Res}}} \quad (1)$$

Dabei ist für f_{Res} die Resonanzfrequenz des betrachteten Aufnehmers im montierten Zustand einzusetzen. Die Richtlinie ergänzt Forderungen der ISO 16 063-22 um Hinweise für den Umgang mit Kalibriereinrichtungen für Stoßanregung und beschreibt Kalibrierabläufe. Die

¹ Zur besseren Verständigung bzgl. der Impulsdauer sollte durch einen Index angegeben werden, bei wieviel Prozent der Impulshöhe die Impulsdauer ermittelt wurde. Im Rahmen dieser Richtlinie wird vorzugsweise die Dauer $t_{1,10\%}$ verwendet, welche die Impulsdauer bei 10 % des Impulsspitzenwertes angibt.

Richtlinie beschränkt sich auf die Bestimmung des Stoß-Übertragungskoeffizienten von Beschleunigungsaufnehmern und –messketten, definiert als Verhältnis des Spitzenwertes der Ausgangsgröße (elektrische Spannung oder Ladung) zum Spitzenwert der Anregungsbeschleunigung. Zur Bestimmung des komplexen Übertragungskoeffizienten (Betrag und Phasenverschiebung) von Beschleunigungsaufnehmern und –messketten in Abhängigkeit von der Frequenz mittels Stoßanregung kann die ISO 16063-22 (Abschnitt 7.3.2, Verfahren nach Version 3) angewendet werden.

3 Symbole und Benennungen

Für die Anwendung dieser DKD-Richtlinie gelten die in Tabelle 1 genannten Symbole. Die in Abschnitt 10 „Messunsicherheitsbetrachtungen“ verwendeten Symbole werden dort extra aufgeführt.

| Symbol | Benennung |
|--------------|---|
| $a_{z,S}$ | Beschleunigungsspitzenwert, der auf das Beschleunigungsaufnehmer-Normal wirkt |
| $a_{z,X}$ | Beschleunigungsspitzenwert, der auf den Kalibriergegenstand wirkt |
| BA | Beschleunigungsaufnehmer |
| C_{SM} | Schwerpunkt der seismischen Masse (Centre of seismic mass) |
| f_{Res} | Resonanzfrequenz eines Beschleunigungsaufnehmers (im montierten Zustand) |
| G_S | Übertragungskoeffizient des Normal-Verstärkers |
| G_X | Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstands-Verstärkers |
| KG | Kalibriergegenstand |
| Q_S | Ausgangsladung eines Beschleunigungsaufnehmer-Normals |
| Q_K | Ausgangsladung eines Kalibriergegenstandes |
| $S_{ua,X}$ | Übertragungskoeffizient der Kalibriergegenstands-Messkette |
| S_S | Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmer-Normals |
| S_X | Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandsaufnehmers |
| $t_{1,10\%}$ | Impulsdauer bei 10% des Impulsspitzenwertes |
| \hat{u}_S | Spannungsspitzenwert am Ausgang des Normal-Verstärkers |
| \hat{u}_X | Spannungsspitzenwert am Ausgang des Kalibriergegenstands-Verstärkers |

Tabelle 1: Symbole und Benennungen

4 Kalibriereinrichtungen

Diese Richtlinie geht auf die stoßförmigen Kalibrierverfahren mit dem Stoßpendel-Kalibrator², dem pneumatischen Stoß-Kalibrator³ und dem Kugelfall-Kalibrator⁴ ein. Die Unterschiede der Verfahren liegen

- im Kalibrierbereich hinsichtlich der Stoßparameter (Beschleunigungsspitzenwert und Stoßdauer),
- in der Einstellbarkeit der Stoßparameter (kontinuierliche oder diskrete Werte; eine äquidistante Verteilung der Stützstellen innerhalb eines Kalibrierbereiches ist nicht immer möglich),
- in der Montage von Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Kalibriergegenstand zueinander (Rücken-an-Rücken-Anordnung oder Befestigung der Referenzflächen an einer Zwischenadaptation),
- in der Automatisierbarkeit,
- in der Standardabweichung der Einzelwerte einer Messreihe für einen Stoß-Übertragungskoeffizienten unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen,
- in dem benötigten Zeitaufwand für eine Kalibrierung.

4.1 Stoßpendel-Kalibrator

4.1.1 Aufbau und Prinzip

Die wichtigsten Bestandteile des Stoßpendel-Kalibrators sind ein Ambosspendel aus einer Magnesium-Legierung und ein Hammerpendel wahlweise aus einer Aluminium- oder Stahlliegierung (siehe Bild 1). Über eine Welle und geeignete Kugellager werden beide Pendel an ihrem oberen Ende drehbar mit der Kopfplatte eines steifen Gehäuses verbunden. Dabei besitzen die Lagerungspunkte der Kugellager einen so großen Abstand, dass eine ausreichende Steifigkeit in y-Richtung vorhanden ist und die Pendelbewegung dem Idealzustand eines einzigen (rotatorischen) Freiheitsgrades möglichst nahe kommt.

Das Ambosspendel dient als Trägerkörper für das Beschleunigungsaufnehmer-Normal und den zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmer. Durch Auslenken und Fallenlassen des Hammerpendels werden das Ambosspendel, und mit ihm die beiden Beschleunigungsaufnehmer, stoßförmig in Bewegung versetzt. Der entstehende Impuls sollte an Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Kalibriergegenstand den gleichen Verlauf besitzen und frei von Störungen und Oberwellen sein. Um Impulse bis zu einer gewünschten Höhe zu erzeugen, ergibt sich daher die Form und das Material des Ambosspendels aus dem einzugehenden Kompromiss zwischen einer hohen Steifigkeit des Pendels und einem geringen Trägheitsmoment um die Drehachse.

Die Dauer, die Höhe und der Frequenzinhalt des Impulses werden durch das Verhältnis der Trägheitsmomente zwischen den Pendeln, die Auslenkung des Hammerpendels und die Härte, Stärke und Form eines Elastomers beeinflusst, das an entsprechender Stelle an das Ambosspendel geklebt wird und den Stoß bedämpft. Gute Ergebnisse sind mit einem 8 mm starken Elastomer der Shore A-Härte 56 erzielbar.

² In ISO 16063-22: Shock Pendulum Calibrator

³ In ISO 16063-22: Upward Moving Pneumatic Piston Shock Calibrator

⁴ In ISO 16063-22: Drop Ball Shock Calibrator

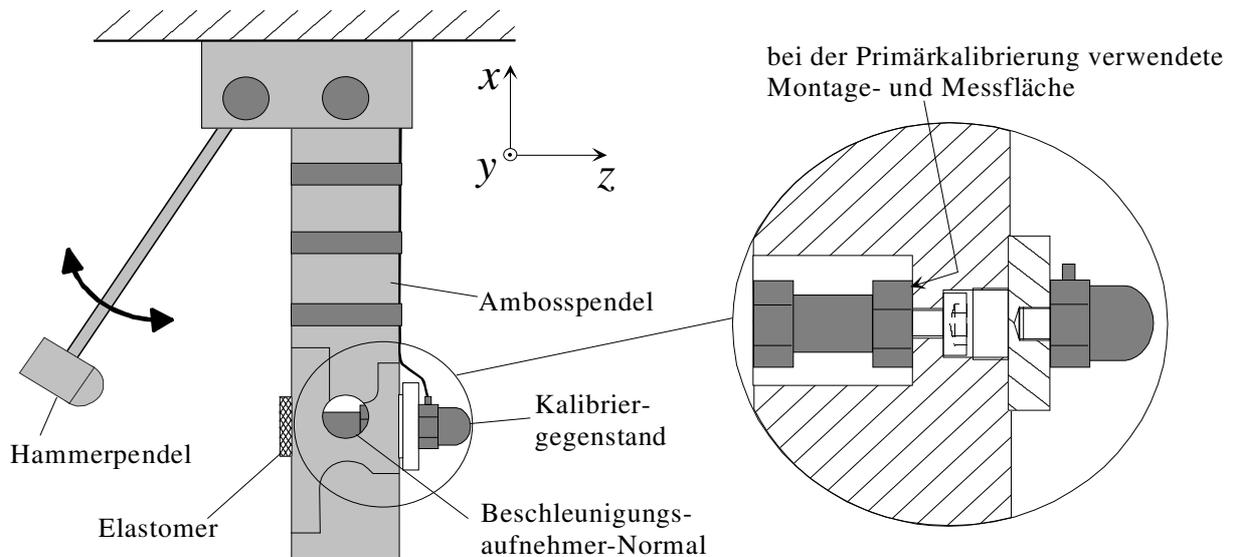


Bild 1: Prinzipieller Aufbau des Stoßpendels

Trotz des Elastomers werden unterhalb einer bestimmten Impulsdauer (und damit oberhalb eines bestimmten Beschleunigungsspitzenwertes) modale Biegeeigenschwingungsformen des Ambosspendels angeregt und überlagern sich dem gewünschten Bewegungsverlauf am Ambosspendel. Um diesen Einfluss zu minimieren, liegen einerseits die Befestigungspunkte für das Beschleunigungsaufnehmer-Normal und den Kalibriergegenstand, andererseits die Stoßstelle zwischen den Pendeln im Schwingungsknoten der ersten Biegeeigenschwingungsform entlang der x -Achse (siehe Bild 1). Der zu kalibrierende Aufnehmer wird an der Stirnseite des Ambosspendels befestigt, die der Stoßstelle gegenüberliegt, während das Beschleunigungsaufnehmer-Normal durch eine Bohrung auf gleicher Höhe im Pendelinnern montiert werden kann.

Bei der Montage des Kalibriergegenstandes ist darauf zu achten, dass die nominellen Messrichtungen der Aufnehmer und damit die Schwerpunkte der seismischen Massen auf einer Linie liegen. Ist dies nicht der Fall, muss dies mit Hilfe von Adaptern korrigiert werden. Voraussetzung ist die Kenntnis der genauen Schwerpunktlage der seismischen Masse innerhalb des Kalibriergegenstandes.

Im beschriebenen Fall stimmt die nominelle Messrichtung des Kalibriergegenstandes mit der z -Richtung des Ambosspendels überein. Zusätzlich sollte der Kalibriergegenstand zur Minimierung des systematischen Querschleunigungseinflusses so ausgerichtet werden, dass die Richtung der minimalen Querschleunigungsempfindlichkeit des Kalibriergegenstandes mit der positiven oder negativen Richtung der x -Achse übereinstimmt.

Alternativ kann die nominelle Messrichtung auch tangential zur kreisförmigen Bewegungsbahn ausgerichtet werden, auf welcher der Schwerpunkt der seismischen Masse des Kalibriergegenstandes geführt wird.

Die Ausrichtung zur z -Achse hat den Vorteil, dass die bei einem Stoß in nomineller Messrichtung wirkende Beschleunigung auf beide Aufnehmer als gleich groß betrachtet werden kann. Von Nachteil ist, dass eine systematische Querschleunigungskomponente auf den Kalibriergegenstand wirkt, die mit zunehmendem Abstand zwischen der seismischen Masse des Kalibriergegenstandes und der langen Ambosspendelachse größer wird. Die tangentielle

Ausrichtung hat den Vorteil, dass als Querschleunigung nur die Zentripetalbeschleunigung wirkt, die normalerweise vernachlässigt werden kann. Nachteilig ist, dass für jeden Kalibriergegenstandstyp ein eigener Adapter benötigt wird und u.U. eine rechnerische Korrektur der Messergebnisse durchgeführt werden muss.

Die Beschleunigungshöhe der Impulse kann durch Variation der Hammerpendel-Auslenkung auf einfache Weise verändert werden. Dabei verkürzt sich bei sonst konstanten Bedingungen die Impulsdauer mit zunehmender Impulshöhe (vgl. Bild 2), während das Frequenzspektrum breiter wird. Außerdem wird bei gleich bleibenden Trägheitsmomenten und gleichem Beschleunigungsspitzenwert die Impulsdauer desto länger, je weicher das Elastomer gewählt wird. Mit einem Elastomer der Shore A-Härte 56 ergeben sich beim Stoßpendel für Impulsspitzenwerte zwischen 2000 m/s² und 100 m/s² typischerweise Impulslängen $t_{1,10\%}$ von ca. 3 ms bis 8 ms [14], [15].

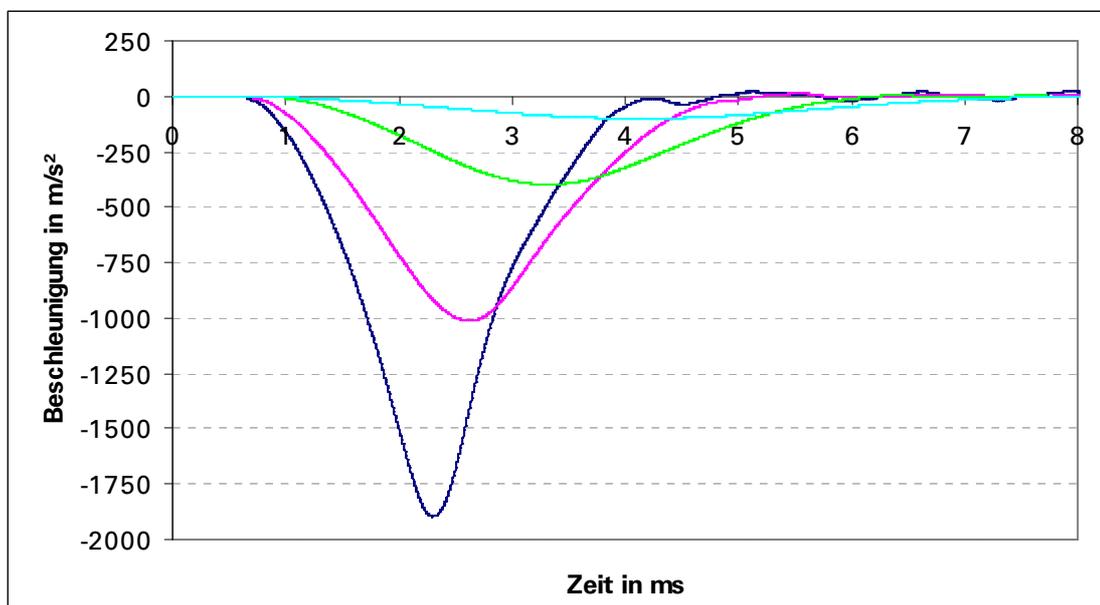


Bild 2: Zusammenhang zwischen dem Beschleunigungsspitzenwert und der Dauer des Impulses

4.1.2 Einsatzgrenzen

Die untere Grenze des Kalibrierbereiches ist von den Eigenschaften der verwendeten Messketten (Normal und Kalibriergegenstand) abhängig; sie wird mit kleiner werdenden Beschleunigungen durch die Verschlechterung des Verhältnisses von Mess- zu Störsignal bestimmt.

Die obere Einsatzgrenze ist durch die mechanischen Eigenschaften des Ambosspendels gegeben. Sie liegt bei dem Beschleunigungsspitzenwert, bei dem Eigenfrequenzen des Ambosspendels innerhalb des Impuls-Frequenzspektrums in der Art angeregt werden, dass sich den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer störende Oberwellen überlagern. Bei bekannten Bauformen des Ambosspendels liegt die erste Eigenfrequenz der Biegeeigenform entlang der x -Achse und in Stoßrichtung bei ca. 700 Hz bis 750 Hz [14], [15].

Für den Stoßpendel-Kalibrator resultiert eine obere Einsatzgrenze von ca. 2000 m/s² bei Gesamtmassen von Kalibriergegenstandsaufnehmer und Adaptern bis 100 g und von ca. 1000 m/s² bei Gesamtmassen von Kalibriergegenstandsaufnehmer und Adaptern bis 1000 g. Für die Ermittlung des Stoß-Übertragungskoeffizienten eines Beschleunigungsspitzenwertes können Standardabweichungen der Einzelwerte einer Messreihe unter

Wiederholbedingungen kleiner als 0,1 % erreicht werden.

Als kleinste angebbare relative erweiterte Messunsicherheit sind Werte von weniger als 1 % möglich.

Der Stoßpendel-Kalibrator ist nicht für die Montage des Beschleunigungsaufnehmer-Normals und des Kalibriergegenstandes in der Rücken-an-Rücken-Anordnung („Back-to-Back“, „piggy back“) geeignet.

Mit dem Stoßpendel **nicht** zu kalibrieren sind Kalibriergegenstände,

- die nach den Kriterien aus DKD-R 3-1, Blatt 1 als nicht kalibrierfähig eingestuft werden müssen,
- bei denen die Resonanzfrequenz des Aufnehmers signifikant angeregt wird,
- bei denen die Schwerpunktlage der seismischen Masse zu den Bezugsflächen nicht hinreichend genau bekannt ist,
- die eine Gesamtmasse von Aufnehmer und Adaptern > 1 000 g besitzen oder
- die erheblich über die Aufspannflächen des Ambosspendels hinausragen.

4.2 Stoßkalibratoren mit zentralem und geradlinigem Stoß

4.2.1 Aufbau und Prinzip des pneumatischen Stoß-Kalibrators

Die wichtigsten Bestandteile des pneumatischen Stoß-Kalibrators sind ein Projektil, das in einem Rohr geführt und pneumatisch beschleunigt gegen das Erdschwerefeld bewegt werden kann, und ein über dem Rohr befestigter Amboss, an dem ein Beschleunigungsaufnehmer-Normal und der zu kalibrierende Beschleunigungsaufnehmer in Rücken-an-Rücken-Anordnung montiert werden (siehe Bild 3).

Zur Beschleunigung des Projektils wird in einem Reservoir ein Überdruck aufgebaut, der durch die elektromechanische Steuerung eines Ventils für eine gewünschte Zeit auf das Projektil wirkt. Durch die Entspannung des Überdrucks wird das Projektil beschleunigt, bis es gegen den Amboss prallt und diesen mit den beiden Aufnehmern durch einen annähernd geraden und zentralen Stoß zusammen impulsförmig beschleunigt. Anschließend wird das Projektil aufgefangen, während der Amboss nach einer kurzen und nach oben gerichteten Bewegung durch einen weichen Puffer gestoppt wird.

Wie beim Stoßpendel-Kalibrator wird zur Erzeugung eines definierten Impulses an die Stoßstelle des Ambosses ein Elastomer geklebt. Durch Variation von Härte, Stärke und Form des Elastomers oder der Höhe des aufgebauten Überdrucks sowie durch Austausch des Ambosses (aus Stahl oder Aluminium) und ggf. die Integration einer Zusatzmasse kann ein weiterer Bereich von Impulsspitzenwerten und Impulszeiten erzielt werden.

Die Form des Stoßimpulses wird generell durch folgende Einflüsse bestimmt:

- Die Geschwindigkeit des Projektils,
- die Gesamtmasse der Ambosseinheit (Amboss, Zusatzmasse und Beschleunigungsaufnehmer) und
- die Deformation des Materials zwischen Amboss und Projektil.

Die Geschwindigkeit des Projektils ist etwa proportional zum antreibenden Überdruck. Die Geschwindigkeit des Ambosses (Fläche unter dem durch die Aufnehmer aufgezeichneten Beschleunigungs-Zeit-Verlauf $a(t)$) wird bestimmt durch das Verhältnis von der Gesamtmasse der Ambosseinheit (einschließlich zusätzlich befestigter Teile) und der Projektilmasse. Die Gesamtmasse der Ambosseinheit setzt sich dabei zusammen aus der Masse des Ambosses, des Beschleunigungsaufnehmer-Normals, des Kalibriergegenstandsaufnehmers, der zusätzlichen mechanischen Adaptionen und ggf. der Zusatzmasse.

Je weicher das Elastomer an der Stoßstelle ist, desto länger wird die Stoßzeit. Für eine

gegebene Stoßgeschwindigkeit ist das Produkt aus Stoßzeit und -spitzenwert etwa gleich. Ein dünneres Elastomer bewirkt einen Impuls von kurzer Dauer und hohem Spitzenwert, ein dickeres an demselben Amboss einen von längerer Dauer und niedrigerem Spitzenwert. Die Flächen unter den Kurven der beiden Impulse sind etwa gleich [11].

Insgesamt sind mit der Einrichtung Impulsspitzenwerte zwischen 200 m/s² und 100 000 m/s² bei Impulszeiten $t_{1,10\%}$ von 3 ms bis 100 µs mit halbsinusförmigem Verlauf (ähnlich Bild 2) erzielbar.

Zu beachten ist, dass das Elastomer an der Stoßstelle durch hohe Projektilgeschwindigkeiten und große zusätzliche Massen hohen Belastungen ausgesetzt ist und zerreißen kann. Daher sollte es vor der Nutzung immer auf Beschädigungen kontrolliert werden. Ein beschädigtes Elastomer bewirkt nicht wiederholbare Signalverläufe und beeinflusst die Stoßdauer. Beschädigte Elastomere können, insbesondere wenn sie Stöße mit Metall-Metall-Berührung zwischen dem Projektil und dem Amboss zulassen, dazu führen, dass die Beschleunigungsaufnehmer (auch bei sehr geringer Geschwindigkeit des Projektils) zerstört werden.

Da sich die bewegenden Teile nach dem Stoß durch das Erdschwerefeld in die Ausgangsposition bewegen, ist das Verfahren gut zur Automatisierung geeignet.

Für die Stoßamplitude und die Stoßzeit lassen sich durch die Verwendung verschiedener Ambosse, Zusatzmassen und Druckbereiche folgende Werte erreichen:

| Beschleunigungsspitzenwert in m/s ² | | | Impulsdauer $t_{1,10\%}$ in ms | | |
|---|-----|---------|-----------------------------------|-----|------|
| 200 | bis | 2 000 | 3 | bis | 1,2 |
| 350 | bis | 3 000 | 1,6 | bis | 0,6 |
| 500 | bis | 4 000 | 2,5 | bis | 1,3 |
| 900 | bis | 7 000 | 1,5 | bis | 0,7 |
| 3 000 | bis | 10 000 | 1,5 | bis | 0,9 |
| 5 000 | bis | 20 000 | 0,9 | bis | 0,5 |
| 8 000 | bis | 30 000 | 0,7 | bis | 0,35 |
| 20 000 | bis | 100 000 | 0,2 | bis | 0,1 |

Tabelle 2: Typische Kombinationen von Impulsspitzenwert und -dauer beim pneumatischen Stoß-Kalibrator

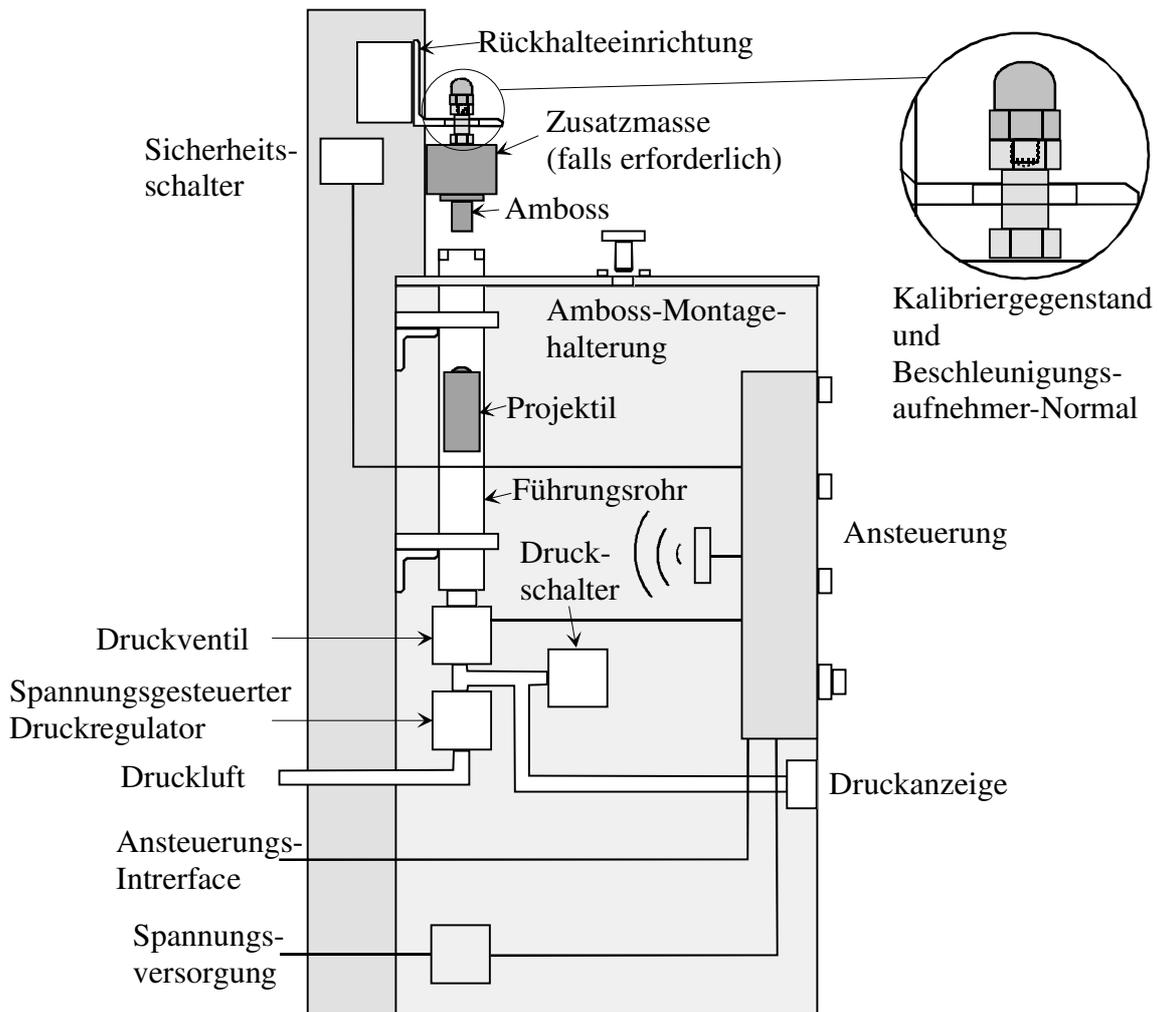


Bild 3: Aufbau eines pneumatischen Stoß-Kalibrators

4.2.2 Aufbau und Prinzip des Kugelfall-Kalibrators

Das Prinzip des Kugelfall-Kalibrators ist dem des pneumatischen Stoß-Kalibrators ähnlich. Anstelle des durch Überdruck nach oben beschleunigten Projektils wird hier eine Stahlkugel in einem Führungsrohr durch die Erdanziehungskraft beschleunigt, bis sie auf einen Amboss stößt, an dessen unterem Ende ein Beschleunigungsaufnehmer-Normal und der zu kalibrierende Beschleunigungsaufnehmer in Rücken-an-Rücken-Anordnung montiert sind (siehe Bild 4).

Durch den annähernd geraden und zentralen Stoß löst sich der Amboss von dem ihn haltenden Permanentmagneten und wird nach einer Fallhöhe von ca. 7 cm zusammen mit den Beschleunigungsaufnehmern in dämpfendem Polstermaterial aufgefangen. Die Kugel wird unmittelbar nach Einleitung des Stoßes in den Amboss von einem weichen Auffangring abgebremst.

Auch hier wird zur Erzeugung eines definierten Impulses an die Stoßstelle des Ambosses ein Elastomer geklebt. Die Form bzw. der Spitzenwert und die Dauer des Impulses werden durch folgende Gegebenheiten beeinflusst:

- Die Stärke, die Härte und die Form des verwendeten Elastomers an der Stoßstelle,
- dem Einsatz verschieden großer Stahlkugeln mit verschiedenen Massen,
- der Variation der Fallhöhe,

- der Verwendung von Ambossen mit unterschiedlicher Größe und aus unterschiedlichem Material und
- der am Amboss montierten Massen (Beschleunigungsaufnehmer und Zusatzmassen) bzw. dem Verhältnis der am Stoß beteiligten Massen.

Wie beim pneumatischen Stoß-Kalibrator gilt: Je weicher das Elastomer an der Stoßstelle ist, desto länger wird die Stoßzeit. Für eine gegebene Stoßgeschwindigkeit ist das Produkt aus Stoßzeit und –spitzenwert etwa gleich. Ein dünneres Elastomer bewirkt einen Impuls von kurzer Dauer und hohem Spitzenwert, ein dickeres an demselben Amboss einen von längerer Dauer und niedrigerem Spitzenwert. Die Flächen unter den Kurven der beiden Impulse sind etwa gleich.

Grundsätzlich hat die Verwendung von Kugeln und Ambossen mit kleinen Abmessungen zwei Vorteile: Einerseits verringert eine kleinere Ambossmasse das Risiko, den Kalibriergegenstand zu beschädigen, wenn der Amboss in den Auffangkorb fällt, andererseits erhöhen sich die Eigenfrequenzen des Ambosses, je geringer die Abmessungen sind. Der zweite Punkt ist insbesondere für die Bestimmung der Impulsspitzenwerte im Zeitbereich von Bedeutung, da die Ambossresonanz die einhüllende Stoßkurve sichtbar modulieren kann [10]. Insgesamt sind mit der Einrichtung Impulsspitzenwerte zwischen 200 m/s² und 100 000 m/s² bei Impulszeiten $t_{1,10\%}$ von 3 ms bis 100 µs bei halbsinusförmigem Verlauf (ähnlich Bild 2) erzielbar. Durch die endliche Anzahl der Stahlkugeln und der vorgesehenen Fallhöhen lassen sich im Gegensatz zum Stoßpendel-Kalibrator und zum pneumatischen Stoß-Kalibrator innerhalb des erzielbaren Bereichs allerdings nur Impulse mit bestimmten, diskreten Spitzenwerten erzeugen.

Für den Beschleunigungsspitzenwert und die Stoßzeit lassen sich durch die Verwendung verschiedener Ambosse, Zusatzmassen und Fallkugeln folgende Werte erreichen:

| Beschleunigungsspitzenwert in m/s ² | Impulsdauer $t_{1,10\%}$ in ms |
|---|-----------------------------------|
| 200 | 2,5 |
| 500 | 2,5 |
| 1 000 | 2,5 |
| 5 000 | 1 |
| 10 000 | 1 |
| 50 000 | 0,15 |
| 100 000 | 0,08 |

Tabelle 3: Typische Kombinationen von Beschleunigungsspitzenwert und Impulsdauer beim Kugelfall-Kalibrator

Bezüglich der Kontrolle und der Beschädigung der Elastomere gilt das gleiche wie beim pneumatischen Stoß-Kalibrator.

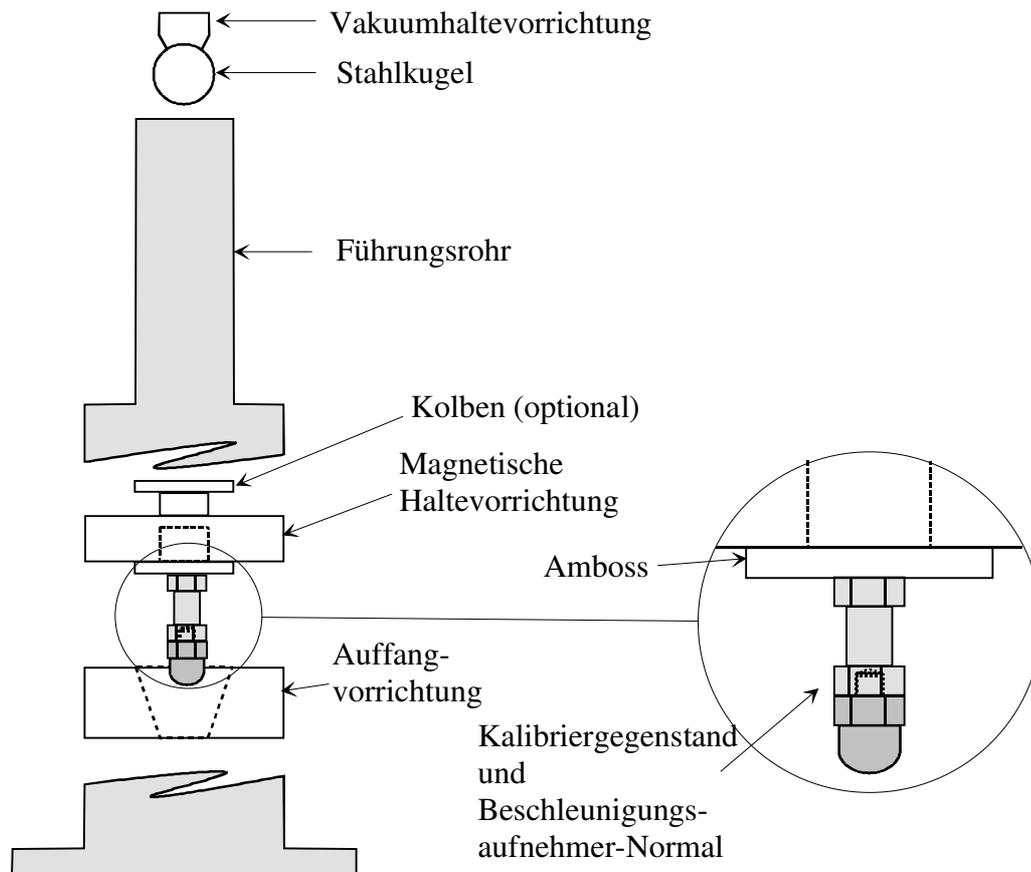


Bild 4: Prinzip der Kalibrierung mit dem Kugelfall-Kalibrator

4.2.3 Einsatzgrenzen des pneumatischen Stoß-Kalibrators und des Kugelfall-Kalibrators

Die untere Grenze des Kalibrierbereiches ist wie beim Stoßpendel-Kalibrator von den Eigenschaften der verwendeten Messketten (Normal und Kalibriergegenstand) abhängig und wird mit kleiner werdenden Beschleunigungen durch die Verschlechterung des Verhältnisses von Mess- zu Störsignal bestimmt.

Die obere Grenze wird durch die mechanischen Eigenschaften des Aufbaus festgelegt und liegt bei dem Beschleunigungsspitzenwert, bei dem der Signalverlauf, der von den Beschleunigungsaufnehmern ausgegeben wird und die Starrkörperbewegung des Ambosses beschreiben soll, mit störenden Oberwellen überlagert wird. Bei den z. Zt. verbreitet angewendeten Bauformen des pneumatischen Stoß-Kalibrators und des Kugelfall-Kalibrators liegt die obere Einsatzgrenze bei ca. 100 000 m/s². Abhängig von den technischen Daten des Kalibriergegenstandes (minimal zulässige Stoßdauer) kann diese Grenze aber oft nicht erreicht werden (siehe Abschnitt 2).

Für die Ermittlung des Stoß-Übertragungskoeffizienten eines Beschleunigungsspitzenwertes können bei pneumatischem Stoß-Kalibrator und Kugelfall-Kalibrator Standardabweichungen der Einzelwerte einer Messreihe unter Wiederholbedingungen in der Größenordnung von 0,1 % erreicht werden. Allerdings kann es beim Durchlaufen eines Kalibrierbereiches bei beiden Kalibratoren notwendig werden, den Amboss auszuwechseln. Damit müssen Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Kalibriergegenstand wiederholt montiert und demontiert werden.

Dabei treten Wiederholbedingungen nur in Teilbereichen der Messgröße auf.

Als kleinste angebbare relative erweiterte Messunsicherheit sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand Werte von 1 % bis zu Beschleunigungsspitzenwerten von 2 500 m/s² möglich. Mit größeren Messunsicherheiten muss insbesondere dann gerechnet werden, wenn der Schwerpunkt von Kalibriergegenstand und Adaption nicht koaxial zum Amboss zentriert ist.

Mit dem pneumatischem Stoß-Kalibrator und dem Kugelfall-Kalibrator **nicht** zu kalibrieren sind Kalibriergegenstände,

- die nach den Kriterien aus DKD-R 3-1, Blatt 1 als nicht kalibrierfähig eingestuft werden müssen,
- bei denen die Resonanzfrequenz des Aufnehmers signifikant angeregt wird,
- bei denen die Gesamtmasse von Aufnehmer und Adaptern wesentlich größer als die Masse des Beschleunigungsaufnehmer-Normals ist oder
- die deutlich über die Aufspanflächen des Beschleunigungsaufnehmer-Normals hinausragen (s.o.).

5 Signalverläufe, Spitzenwertermittlung und Übertragungskoeffizient

Bild 5 zeigt zwei typische Signalverläufe, die bei einem Impuls einer Kalibriereinrichtung nach dem Hammer-Ambossprinzip (hier Stoßpendel-Kalibrator) von den Messketten des Beschleunigungsaufnehmer-Normals und des Kalibriergegenstandes ausgegeben werden.

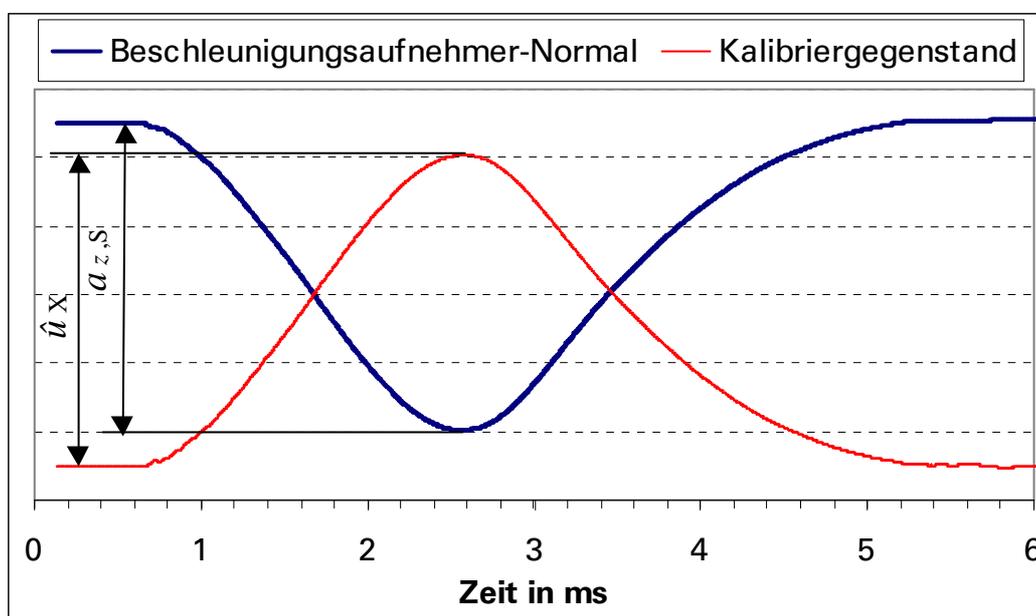


Bild 5: Typische Impulse bei der Kalibrierung mit einer Kalibriereinrichtung nach dem Hammer-Ambossprinzip (z.B. Stoßpendel-Kalibrator)

Nach jedem Stoß werden \hat{u}_s und \hat{u}_x , die Spannungsspitzenwerte der Messketten für das Beschleunigungsaufnehmer-Normal und den Kalibriergegenstand, ermittelt. Mit S_s als Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmer-Normals, G_s als Übertragungskoeffizient

des Normal-Verstärkers und $a_{z,S}$ als resultierender Beschleunigungsspitzenwert, ermittelt durch die Normal-Messkette, ergibt sich bei Vernachlässigung störender Einflüsse⁵ der Stoß-Übertragungskoeffizient $S_{ua,X}$ der Kalibriergegenstands-Messkette zu:

$$S_{ua,X} = S_S \cdot \frac{G_S}{\hat{u}_S} \cdot \hat{u}_X = \frac{\hat{u}_X}{a_{z,S}} \quad (2)$$

Häufig ist nicht der Übertragungskoeffizient $S_{ua,X}$ der Messkette von Interesse, sondern der Übertragungskoeffizient S_X des zu kalibrierenden Aufnehmers. Mit G_X als Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstands-Verstärkers ergibt er sich aus:

$$S_X = \frac{S_{ua,X}}{G_X} = S_S \cdot \frac{G_S}{G_X} \cdot \frac{\hat{u}_X}{\hat{u}_S} = \frac{\hat{u}_X}{a_{z,S} \cdot G_X} \quad (3)$$

Bild 6 zeigt den zugehörigen Signalflussplan für die Verwendung von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern und Ladungsverstärkern. Die Ausgangssignale der Aufnehmer Q_S und Q_X stellen Ladungen des Beschleunigungsaufnehmer-Normals und des Kalibriergegenstandes dar.

Für die Berechnung des Stoß-Übertragungskoeffizienten nach Gl.(2) oder Gl.(3) müssen die Spitzenwerte⁶ der impulsförmigen Ausgangssignale der Normal- und der Kalibriergegenstands-Messkette ermittelt werden. Beim Stand der Technik sind diese Ausgangssignale digital zu erfassen

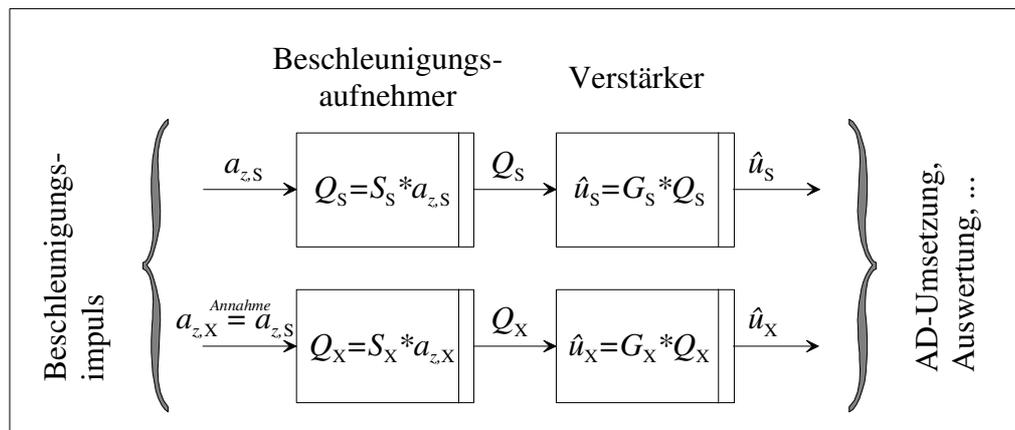


Bild 6: Typischer Signalflussplan für die Kalibrierung nach dem Vergleichsverfahren

und zu verarbeiten. Zur Vermeidung von Aliasing-Effekten ist vor der Analog/Digital-Umsetzung (ADU) eine geeignete analoge Tiefpassfilterung auszuführen. Zur Unterdrückung von Störgrößen (z.B. Oberwellen, hochfrequentes Rauschen) lassen sich analoge bzw. digitale Filter einsetzen. Dabei darf der Impulsverlauf und damit der Spitzenwert nicht verfälscht werden. Diese Bedingung lässt sich einhalten, wenn Filter konstanter Gruppenlaufzeit (Idealfall Phasenverschiebung Null) eingesetzt werden (z.B. rekursives Butterworthfilter mit Vor- und Rückwärtsfilterung, s.u.). Trotz der Möglichkeiten der Tiefpassfilterung bestehen hohe Ansprüche an die Qualität der Signalverläufe und damit

⁵ Eine Aufzählung der Größen, die das Kalibrierergebnis störend beeinflussen, ist im Abschnitt 10 „Messunsicherheitsbetrachtungen“ zu finden.

⁶ Der gesuchte Spitzenwert des Impulses bezieht sich auf einen Basiswert („Nullsignal“), der i. Allg. nicht das Ausgangssignal Null darstellt.

insbesondere an die Erzeugung der Anregungsbeschleunigung (Hammer-Amboss-System). Für die Ermittlung des Spitzenwertes der digital gewonnenen Messwerte haben sich zwei Verfahren als sinnvoll erwiesen:

- 1) die Ermittlung des Spitzenwertes nach einer Tiefpassfilterung und
- 2) die Ermittlung des Extremwertes einer Ausgleichsfunktion der äquidistant abgetasteten Messwerte im Bereich um den Spitzenwert.

Vorteil der Tiefpassfilterung in Verfahren 1 ist die mögliche Realisierung einer sehr steilflankigen Filtercharakteristik, mit der Frequenzanteile des Impulses gut von höherfrequenten Störsignalen getrennt und entsprechend unterdrückt werden können. Insbesondere bei der *digitalen* Tiefpassfilterung ist vorteilhaft, dass eine Glättung mit monoton wachsender Dämpfung höherfrequenter Störsignale erfolgt. Allerdings muss die Anzahl der aufgenommenen Daten bzw. die Abtastrate ausreichend hoch sein (höher als beim Polynomausgleich) und die Abtastung über den gesamten Impulsverlauf ausgeführt werden.

Beispiel:

Der \sin^2 -förmige Verlauf wird mit $N = 100$ Messwerten erfasst, d.h. im Bereich des Spitzenwertes liegen etwa 20 Messwerte. Wird die (normierte) Grenzfrequenz des Filters auf $f_g = 3/N$ gelegt, so ist der Filtereinschwingvorgang nach $0,4 N$ Zeitpunkten beendet und ein Störsignal, dessen Frequenz etwa der doppelten Grenzfrequenz $2f_g = 6/N$ entspricht, wird um ca. 25 dB gedämpft, d.h. eine Sinusschwingung mit 6 Perioden in N wird um 25 dB gedämpft.

Allerdings führt der Amplitudengang des Filters zu einer Signalreduzierung in der Umgebung des Impulsspitzenwertes, im beschriebenen Fall um weniger als 0,6 %. Diese Messabweichung kann durch Erhöhung der Filtergrenzfrequenz verringert werden, z. B. führt eine Erhöhung um den Faktor 1,5 zu einer Messabweichung von weniger als 0,13 %.

Durch eine Tiefpassfilterung wird der Betrag der Impulsantwort reduziert. Eine solche Verfälschung ist durch die Filtercharakteristik vorgegeben und kann deshalb – wenn gefordert – zur Korrektur des Ergebnisses genutzt werden. Die Dimensionierung des Filters hat zu gewährleisten, dass der „Filtereinschwingvorgang“ nach etwa 40 % des Impulsverlaufes beendet ist. Bei Vor- und Rückwärtsfilterung bleibt dann der Zeitbereich in der Umgebung des Spitzenwertes (+10 %, –10 %) von dieser Filterreaktion unbeeinflusst. Wenn als Tiefpass ein digitales Butterworthfilter 2. Ordnung eingesetzt wird, ergibt sich bei Vor- und Rückwärtsfilterung ein Amplitudenfrequenzgang des Filters 4. Ordnung, wobei eine zeitliche Verschiebung des Spitzenwertes vermieden wird.

Vorteil des Polynomausgleichs (Verfahren 2) ist eine ausgleichende Wirkung auch bei niederfrequenten Verzerrungen des Signals und die Möglichkeit, auf einfache Weise eine automatische Kontrolle der Impulsqualität im Spitzenwertbereich zu realisieren, indem nur eine bestimmte Differenz zwischen den Extremwerten der Ausgleichsfunktionen und den realen Spitzenwerten zugelassen wird. Desweiteren werden für die Anwendung dieses Verfahrens weniger Werte benötigt als bei der digitalen Filterung.

Bei Bedarf können die Verfahren kombiniert oder auch ignoriert werden, wenn die Impulsqualität so hochwertig ist, dass eine Störunterdrückung nicht benötigt wird.

1) Vorgehensweise bei Verwendung der betragsmäßig größten auftretenden Werte als Impulsspitzenwerte

- a) Verarbeitung der abgetasteten Signale, die von dem Beschleunigungsaufnehmer-Normal und dem Kalibriergegenstand ausgehen, durch eine geeignete Tiefpassfilterung.
- b) Ermittlung der betragsmäßig größten auftretenden Werte \hat{u}_S der Normal-Messkette und \hat{u}_X der Kalibriergegenstands-Messkette aus den gefilterten Daten.

c) Ermittlung des Stoß-Übertragungskoeffizienten S_x oder $S_{ua,x}$ nach Gl.(3) oder Gl.(2).

2) Vorgehensweise bei Verwendung eines Polynomspitzenwertes als Impulsspitzenwert

a) Definition von Bereichen für die Bildung von Ausgleichsfunktionen um die betragsmäßig größten abgetasteten Werte der Normal-Messkette und der Kalibriergegenstands-Messkette. Die Bereiche, in denen die Ausgleichsfunktionen ermittelt werden, müssen so gewählt werden, dass Oberwellen und Rauschen unterdrückt werden, ohne den Impulsverlauf zu verfälschen. Je besser die Impulsqualität bzw. je geringer die Störungen sind, desto kleiner kann der Bereich für die Ermittlung der Ausgleichsfunktion gewählt werden. Üblich sind Werte oberhalb von 90 % der Impulshöhe.

b) Berechnung von quadratischen Ausgleichsfunktionen für die abgetasteten Werte der Normal-Messkette und der Kalibriergegenstands-Messkette. Für die Normal-Messkette ergibt sich z.B.:

$$u_s(t) = b_{s,2}t^2 + b_{s,1}t + b_{s,0} \quad (4)$$

Dabei sollten die Koeffizienten $b_{s,2}$, $b_{s,1}$ und $b_{s,0}$ nach der (Gaußschen) Methode der kleinsten Abweichungsquadrate (Minimierung der Summe der absoluten Abweichungsquadrate) bestimmt werden.

c) Ermittlung der Stoßspitzenwerte für die Normal-Messkette und die Kalibriergegenstands-Messkette. Als Spitzenwerte werden die Extremwerte der Ausgleichsfunktionen verwendet. Für das Normal gilt:

$$\hat{u}_s = b_{s,0} - \frac{b_{s,1}^2}{4b_{s,2}} \quad (5)$$

Für den Kalibriergegenstand wird \hat{u}_x analog ermittelt.

d) Ermittlung des Stoß-Übertragungskoeffizienten S_x oder $S_{ua,x}$ nach Gl.(3) oder Gl.(2).

Neben den beschriebenen Verfahren, die eine Auswertung im Zeitbereich darstellen, ist insbesondere beim pneumatischen Stoß-Kalibrator und beim Kugelfall-Kalibrator aufgrund der hohen erreichbaren Beschleunigungsspitzenwerte eine Auswertung im Frequenzbereich möglich und sinnvoll (siehe Abschnitt 2).

Um den Spitzenwert des Impulses zu bestimmen, muss u.a. der Basiswert („Nullsignal“) ermittelt werden. Als Basis des Impulses kann eine Linie dienen, die durch Verbindung eines Nullpunktes unmittelbar vor und eines unmittelbar nach dem Impuls entsteht. Dabei sollte eine Differenz zwischen den beiden Nullpunkten vor und nach dem Impuls, bezogen auf den Spitzenwert, nicht größer als 1 % sein. Bei größeren Differenzen muss ein entsprechender Beitrag im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

Kann der Nullpunkt nach dem Impuls nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden (z.B. wegen der Überlagerung mit Oberwellen), sollte nur der Nullpunkt vor dem Impuls als Basis für die Spitzenwertermittlung verwendet und der mögliche Einfluss einer Drift auf die Spitzenwertermittlung im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung der Basis kann es außerdem zweckmäßig sein, die Nullpunkte nicht mit einzelnen Werten gleichzusetzen, sondern als Mittelwerte aus einer größeren Anzahl von aufgenommenen Werten zu definieren. Die in diesem Fall ermittelbaren Standardabweichungen können zur automatischen Kontrolle von Oberwellen, Rauschen, Drift und anderen unerwünschten Effekten genutzt werden. Bild 7, Bild 8 und Bild 9 zeigen Beispiele für zu kontrollierende Kriterien des Ausgangssignals wie Störungen, Signalverluste durch einen falsch angepassten Frequenzgang, Drift oder Über- und Untersteuerung.

Ursachen von **Störungen und Oberwellen** können z. B. sein:

- lose Steck- oder Schraubverbindungen,
- Kabelbrüche oder Kontaktschwierigkeiten,
- Erdschleifen und elektromagnetische Einstreuungen,
- Montagefehler,
- unzureichender Frequenzgang des Kalibriergegenstandes,
- defekte Elastomere bei der Stoßübertragung.

Ursachen von **Drift** können z. B. sein:

- zu große Zeitkonstante eines Ladungsverstärkers,
- ungeeignete oder defekte Anpasser.

Ursachen eines **ungeeigneten Frequenzgangs** können z. B. sein:

- zu geringe obere Grenzfrequenz der Anpasser,
- zu hohe untere Grenzfrequenz der Anpasser (bei Ladungsverstärkern: zu kleine Zeitkonstante),
- Resonanzfrequenz des Aufnehmers im Frequenzspektrum der Anregungsimpulse.

Ursache von **Unter- und Übersteuerung** kann z. B. sein:

- ungeeignete Messbereiche von Verstärker und/oder A/D-Umsetzer.

Durch wiederholte Bestimmung eines Stoß-Übertragungskoeffizienten bei *einem* bestimmten Beschleunigungsspitzenwert können zufällige Einflüsse verringert und ein gemittelter Wert $S_{ua,x}$ oder S_x als Kalibrierergebnis angegeben werden. Die entstehende Streuung ist bei der Kalibrierung eines qualitativ guten Aufnehmers ein Kennwert der Kalibriereinrichtung einschließlich aller verwendeten elektrischen Geräte.

Werden verschiedene Werte des Stoß-Übertragungskoeffizienten bei *unterschiedlichen* Beschleunigungsspitzenwerten bestimmt, lässt sich durch eine Ausgleichsrechnung aus den ermittelten Messwertpaaren (Anzeige des Kalibriergegenstandes und eingestellter Wert der Messgröße) ein „ausgeglichener“ Stoß-Übertragungskoeffizient (**Einwertangabe**) für einen definierten Beschleunigungsbereich bestimmen. Die resultierenden Interpolationsabweichungen stellen ein Qualitätsmerkmal des Kalibriergegenstandes dar (vgl. DKD-R 3-1, Blatt 1, Abschnitt 10).

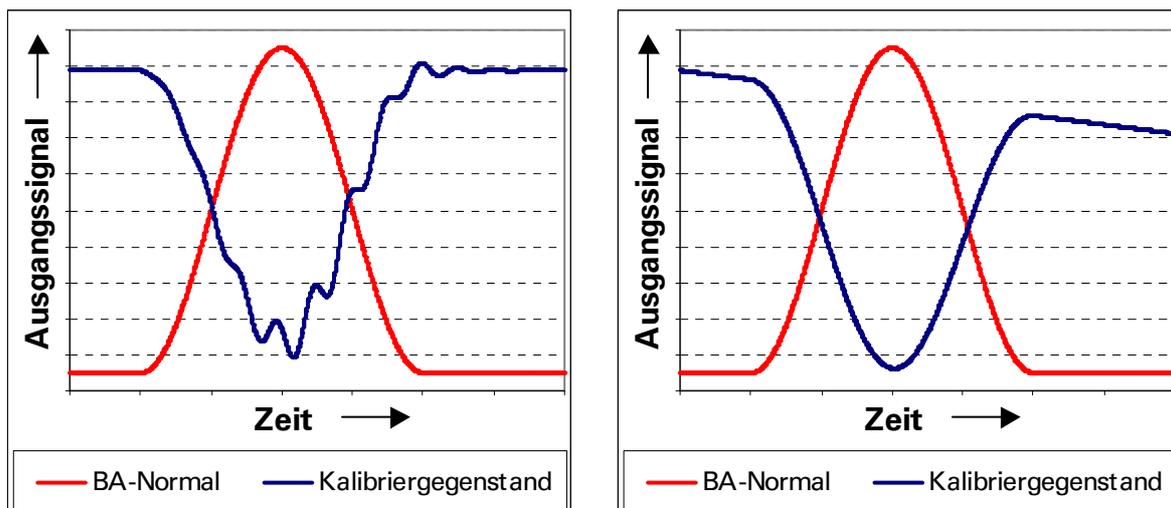


Bild 7: Impulsverlauf bei Störungen (links) und Drift des Ausgangssignals (rechts)

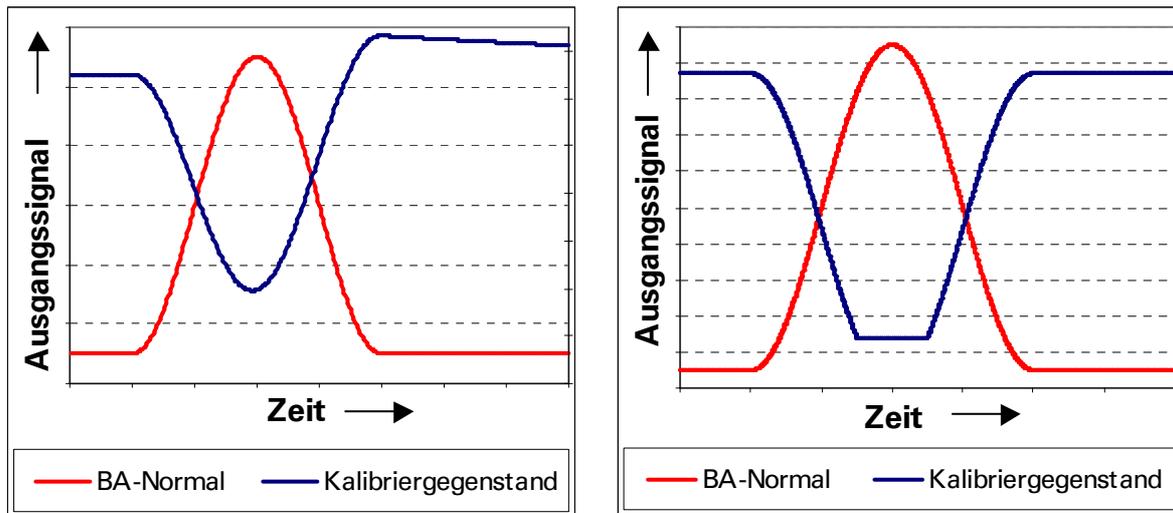


Bild 8: Impulsverlauf bei falsch angepasster unterer Grenzfrequenz (links) und Übersteuerung (rechts)

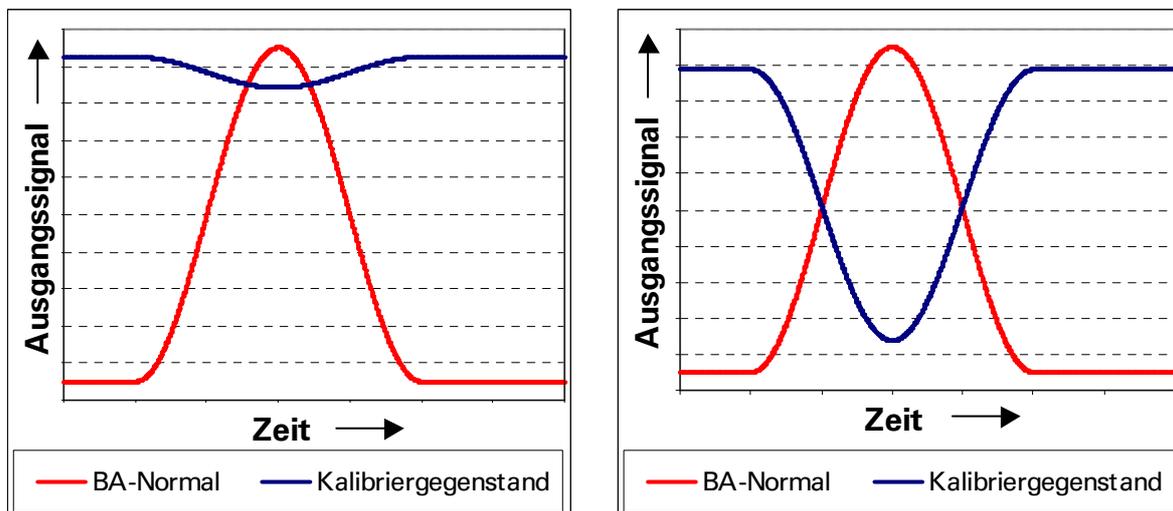


Bild 9: Impulsverlauf bei Untersteuerung (links) und von einwandfreien Signalen (rechts)

6 Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung

6.1 Vorbereitende Maßnahmen bei allen Kalibratoren

Bei allen in dieser Richtlinie beschriebenen Kalibratoren ist auf folgende Punkte zu achten:

- Der Kalibriergegenstand muss auf seine Kalibrierfähigkeit geprüft werden (siehe DKD-R 3-1, Blatt 1, Abschnitt 4.2)
- Der Kalibriergegenstand ist durch Lagerung im Kalibrierlaboratorium zu konditionieren (Temperierung).
- Die Elastomere sind vor der Kalibrierung auf eine Beschädigung zu überprüfen, um die Beschleunigungsaufnehmer nicht durch Stöße mit Metall-Metall-Berührung zwischen Hammer und Amboss in ihrer Eigenfrequenz anzuregen und zu zerstören.
- Der Kalibriergegenstand wird direkt oder unter Verwendung von Adaptionen befestigt. Bei selbstgefertigten Adaptionen ist die Position des Kabelabgangs in der Weise zu berücksichtigen, dass bei der Befestigung der Aufnehmer keine Knicke oder zu große Schlaufen entstehen (siehe auch [2]). Des Weiteren ist zu beachten, dass die Ansprüche an die Güte der Oberfläche mit zunehmenden Beschleunigungsspitzenwerten steigen.

- Es wird empfohlen, die mechanischen Kontaktflächen leicht einzufetten (säurefreie Fette verwenden).
- Das vom Hersteller des Kalibriergegenstandes angegebene Drehmoment bei der Montage ist einzustellen; dabei sind kalibrierte Drehmomentschlüssel einzusetzen.
- Die vom Kalibrierlaboratorium beizustellenden signalführenden Komponenten müssen in einem warmgelaufenen, definierten und kalibrierten Zustand sein.
- Die Nullpunkte der signalführenden Komponenten sind einzustellen. Bei Kalibriergegenständen in Brückenschaltung ist außerdem ein Abgleich des Nullsignals durchzuführen.
- Um einen Stoß-Übertragungskoeffizienten (**Einwertangabe**) zu bestimmen, der das Verhalten eines Kalibriergegenstandes über einen bestimmten Beschleunigungsbereich möglichst gut beschreibt, werden auf den zu kalibrierenden Gegenstand eine Anzahl von Impulsen mit unterschiedlichen Beschleunigungsspitzenwerten ausgeübt.

6.2 Spezielle Vorbereitungen

6.2.1 Spezielle Vorbereitungen beim Stoßpendel-Kalibrator

Bei der Befestigung des Kalibriergegenstandes am Ambosspendel des Stoßpendel-Kalibrators sind folgende Punkte zu beachten:

- Das Hammerpendel sollte arretiert werden, um Quetschgefahren für den Bediener zu vermeiden.
- Das Ambosspendel sollte an seinem unteren Ende fixiert werden, um Belastungen der Lager bei der Montage zu verringern.
- Der Schwerpunkt der seismischen Masse ist gemäß Abschnitt 4.1.1 zu positionieren.
- Das Kabel ist zweckmäßiger Weise entlang der Stirnseite des Ambosspendels zu führen und z.B. mit Klettverschlüssen so zu befestigen, dass das Kabel nicht beschädigt und die Pendelbewegung nicht beeinträchtigt wird.

6.2.2 Spezielle Vorbereitungen beim pneumatischen Stoß-Kalibrator und beim Kugelfall-Kalibrator

Die Kabel der am Amboss befestigten Beschleunigungsaufnehmer werden bei hoch intensiven Stößen sowie generell beim Fallen in den gepolsterten Auffangmechanismus des Kugelfall-Kalibrators stark belastet. Sie sollten entsprechend abgefangen werden, um die Zugentlastungen der Stecker nicht zu stark zu belasten. Es empfiehlt sich eine regelmäßige Überprüfung der Kabel auf Beschädigungen.

Der Amboss ist symmetrisch zu belasten, damit beim Stoß keine Querbeschleunigungen auftreten. Die Elastomere sind vor der Kalibrierung auf Beschädigung zu überprüfen, um die Beschleunigungsaufnehmer nicht durch Metall-Metall-Stöße in Resonanz anzuregen und zu zerstören.

6.3 Durchführung

6.3.1 Durchführung beim Stoßpendel-Kalibrator

Als Ablauf hat sich beim Stoßpendel-Kalibrator folgende Vorgehensweise bewährt:

Auf den zu kalibrierenden Aufnehmer wird eine Anzahl von ca. 20 Impulsen mit unterschiedlichen Beschleunigungsspitzenwerten ausgeübt. Dabei sollten die Beschleunigungsspitzenwerte annähernd äquidistant über den Kalibrierbereich verteilt werden.

Um in diesem Fall bei jedem Impuls eine ausreichende Aussteuerung zu erzielen (*annähernd konstante relative Auflösung des A/D-Umsetzers*), wird die Kalibrierung in beispielsweise drei Impulsspitzenwertbereiche eingeteilt, in denen sich der Ablauf zyklisch wiederholt und unterschiedliche Messbereiche der Verstärker und der A/D-Umsetzer eingestellt werden. In Bild 10

ist der zeitliche Ablauf einer Kalibrierung bis 1000 m/s² dargestellt, Bild 11 zeigt eine mögliche Zykuseinteilung dieser Kalibrierung. Zyklus 1 erstreckt sich dabei von ca. 1 000 m/s² bis ca. 700 m/s², Zyklus 2 von ca. 650 m/s² bis ca. 350 m/s² und Zyklus 3 von ca. 300 m/s² bis ca. 100 m/s². Auf der Ordinate sind die zugehörigen Ausgangssignale des Anpassers dargestellt.

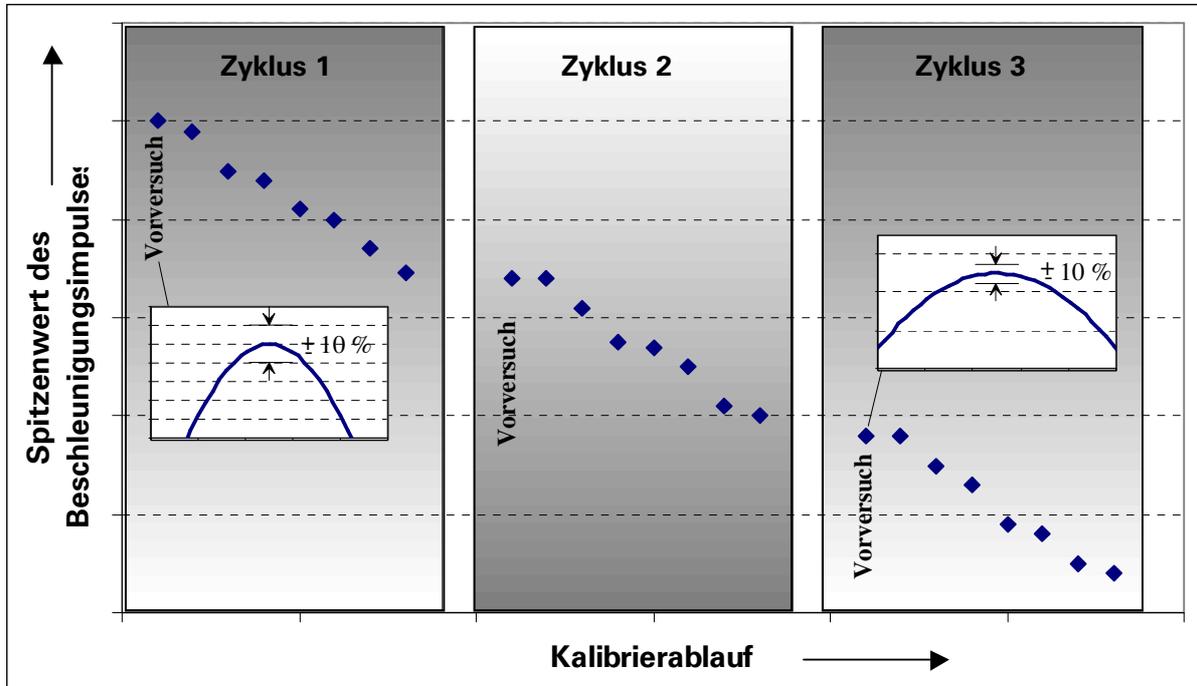


Bild 10: Prinzipieller Ablauf der Kalibrierung

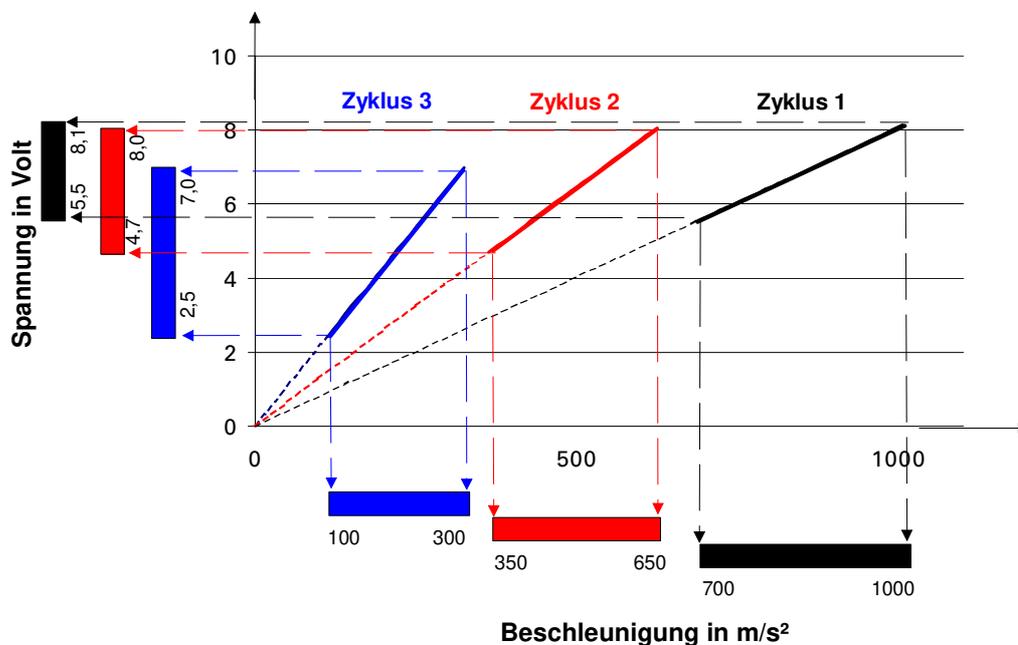


Bild 11: Aufteilung des Kalibrierbereiches in verschiedene Zyklen zur sinnvollen Anpassung der Signale

Die Datenaufnahme wird fortschreitend vom größten Impulsspitzenwert des Kalibrierbereiches bis zum kleinsten Impulsspitzenwert ausgeführt. Dieses Vorgehen lässt fehlerhafte

Kalibriergegenstände oder Störungen, die durch irgendeine Komponente des Aufbaus verursacht werden, frühzeitig erkennen.

Da die Masse der zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmer einschließlich Adaptionen variiert, sind in Vorversuchen am Beginn eines jeden Zyklus die Startpositionen (Fallhöhe) des Hammerpendels und, wenn es nicht automatisch geschieht, durch Sichtkontrolle auf einem Datensichtgerät die Ausgangssignale der Verstärker zu prüfen (vgl. Abschnitt 5). Diese subjektive Kontrolle liefert Hinweise auf Störungen und Fehleinstellungen der signalführenden Komponenten. Gleichzeitig können diese Vorversuche als Vorbelastung der Aufnehmer angesehen werden.

Desweiteren wird empfohlen, schon die Messsignale der Vorversuche auszuwerten, um eine erste Orientierung über das zu erwartende Kalibrierergebnis zu erhalten.

Die richtige Auslenkung des Hammerpendels ist gefunden, wenn der Beschleunigungsspitzenwert innerhalb eines zu jedem Zyklus gehörenden „Fensters“ liegt, z.B. innerhalb von ca. $\pm 10\%$ des jeweils größten Beschleunigungsspitzenwertes am Anfang eines Zyklus.

Bei Kalibriergegenständen ohne Kenntnis des Übertragungskoeffizienten kann durch eine Serie von Vorversuchen die Parametrierung des Anpassers mit dem Ziel einer optimalen Aussteuerung gefunden werden.

Bei dem oben beschriebenen Ablauf wurde vorausgesetzt, dass jeweils einzelne Impulse erzeugt werden. Bei geringeren Ansprüchen an die Messunsicherheit ist es auch möglich, einen Ablauf auszuführen, bei dem eine Impulsfolge mit abnehmenden Beschleunigungsspitzenwerten durch ein „Durchpendeln“ von Hammer- und Ambosspendel realisiert wird. Voraussetzung ist, dass die Trägheitsmomente und die Bewegungsdämpfung beider Pendel gleich groß sind. Nur in diesem Fall findet der Zusammenstoß zwischen den Pendeln in senkrechter Lage am gleichen Auftreffpunkt statt. Sofern die Auftreffpunkte während des Durchpendelns variieren, werden Signalstörungen erzeugt.

6.3.2 Durchführung beim pneumatischen Stoß-Kalibrator und beim Kugelfall-Kalibrator

Durch die Angaben aus der Bedienungsanleitung des Herstellers oder durch Erfahrungswerte sind geeignete Paarungen von Amboss, ggf. einer Zusatzmasse und Beschleunigungsaufnehmern auszuwählen, durch die gewünschte Impulsspitzenwerte und Stoßzeiten realisiert werden können. Die Aufspannflächen der Kalibriergegenstände sollten nicht größer sein als die Referenzfläche des Beschleunigungsaufnehmer-Normals. Bei Bedarf können Beschleunigungsaufnehmer-Normale mit unterschiedlichen Abmessungen eingesetzt werden.

Beim pneumatischen Stoß-Kalibrator können durch Veränderung des Druckes die Impulsspitzenwerte in weiten Bereichen kontinuierlich verändert werden. Beim Kugelfall-Kalibrator hingegen sind aufgrund der endlichen Anzahl von möglichen Fallhöhen nur bestimmte, diskrete Impulsspitzenwerte realisierbar (siehe Abschnitt 4.2.2).

Bzgl. der kürzesten Stoßdauer sollten die Abschnitte 4.2.3 und 2 beachtet werden.

7 Auswertung

Nach der Datenaufnahme der Signale werden die Spitzenwerte des Beschleunigungsaufnehmer-Normals und des Kalibriergegenstandes für jeden Impuls sowie der Übertragungskoeffizient nach Abschnitt 5 ermittelt. Zur Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse ist es außerdem sinnvoll, die Stoßdauer $t_{1,10\%}$ der Impulse anzugeben. Die Messunsicherheiten, die den Werten des Übertragungskoeffizienten beizuordnen sind, werden nach Abschnitt 10 abgeschätzt. Die Ergebnisse werden tabellarisch dargestellt.

Beim industriellen Einsatz eines Beschleunigungsaufnehmers wird häufig nicht mit

unterschiedlichen Werten des Übertragungskoeffizienten für die diskreten Belastungsstufen gearbeitet, sondern mit einem einzigen Übertragungskoeffizienten für den gesamten Gültigkeitsbereich der Kalibrierung (**Einwertangabe**). Dies ist vorzugsweise die Steigung der Ausgleichsgeraden durch sämtliche Wertepaare, gebildet aus dem Spitzenwert der Ausgangsgröße (elektrische Spannung oder Ladung) und dem Spitzenwert der Anregungsbeschleunigung.

Bei Verwendung dieser Kenngröße des Beschleunigungsaufnehmers tritt an die Stelle der den einzelnen Werten des Übertragungskoeffizienten beigeordneten Messunsicherheiten eine Konformitätsaussage.

Dazu sind die Abweichungsgrenzbeträge festzulegen. Dies kann, ausgehend von den Kalibrierergebnissen, durch Berechnung der Abweichungsspannen erfolgen ("selbstbestimmte Konformität"; Festlegung auf Grund von Herstellerangaben s. unten). Dabei sind

- die Abweichungen dieser Werte von der Einwertangabe des Übertragungskoeffizienten und
- die den einzelnen Messwerten des Übertragungskoeffizienten beigeordneten Messunsicherheiten

zu berücksichtigen.

Als Abweichungsgrenzbetrag kann die größte berechnete Abweichungsspanne gewählt werden (in diesem Fall werden die Abweichungsgrenzbeträge im Bild 12 als Geraden parallel zur Beschleunigungsachse dargestellt).

Bei Kalibriergegenständen mit vom Hersteller abgeglichenem Nennkennwert (z.B. bei resistiven Aufnehmern) können die Abweichungsgrenzbeträge alternativ auch aus der zugeordneten Kennwerttoleranz ermittelt werden. In diesem Fall ist jedoch stets zu prüfen, ob die bei der Kalibrierung bestimmten Werte der Übertragungskoeffizienten einschließlich ihrer beigeordneten Messunsicherheiten und ihrer systematischen Abweichungen von der Einwertangabe des Kennwertes die Abweichungsgrenzbeträge nicht überschreiten.

Visualisierung

Die Übertragungskoeffizienten und die beigeordneten Messunsicherheiten werden im Vergleich zu den Abweichungsgrenzbeträgen (Spezifikationsgrenzen nach Herstellerangabe bzw. selbstbestimmte Grenze) dargestellt.

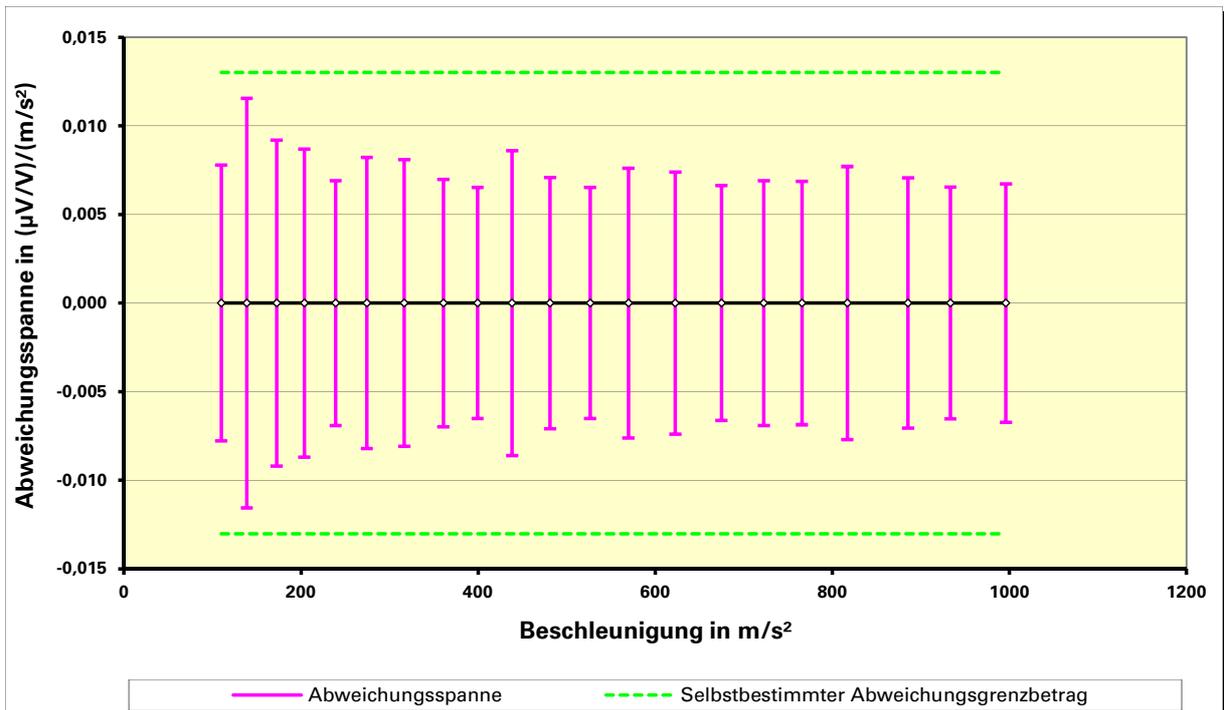
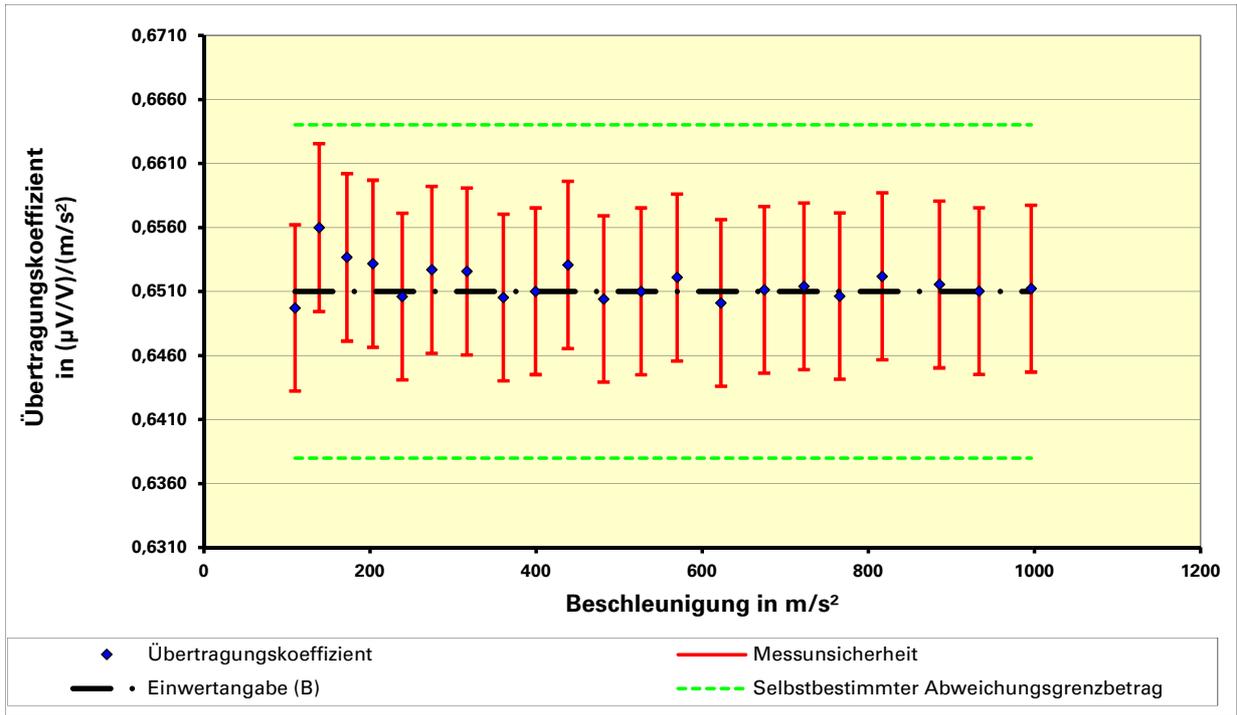


Bild 12: Visualisierung des Kalibrierergebnisses für einen Beschleunigungsaufnehmer

Konformität

Liegen die Abweichungsspanne bzw. die Übertragungskoeffizienten mit beigeordneter Messunsicherheit innerhalb der vom Hersteller angegebenen Spezifikationsgrenzen, dann kann die Konformität nach DAkkS-DKD-5 bestätigt werden. Dabei ist deren Gültigkeitsbereich anzugeben.

8 Wartung und Kontrolle

Beispiele für präventive Wartungsmaßnahmen (planmäßig):

- Lagerung auf Spielfreiheit prüfen,
- Regelmäßiges Auswechseln des Elastomers,
- Güte der Aufspannflächen prüfen und Flächen ggf. läppen.

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

- Test der signalführenden Komponenten,
- Kontrolle der Wiederholpräzision bei definierten Impulsspitzenwerten,
- Regelmäßige Kalibrierung eines Referenznormals.

9 Kontrolle der Anforderungen an Stoßkalibrierungen von Beschleunigungsaufnehmern

Folgende Aspekte sind zu beachten:

- Werden Umgebungseinflüsse, die ein Ausgangssignal der Aufnehmer erzeugen, ausreichend entkoppelt? Steht die Kalibriereinrichtung an einem Ort, an dem starke Zugluft, Sonneneinstrahlung oder Umgebungsbewegungen vorhanden sind?
- Sind starke akustische, magnetische oder radioaktive Felder in der Nähe?
- Werden durch die Klimatisierung die geforderten Bereiche für Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck eingehalten?
- Ist eine sinnvolle Konstruktion, Oberflächengüte und Materialwahl der Adaptionen gegeben?
- Liegen die Resonanzfrequenzen des Aufbaus genügend hoch?
- Wird das Drehmoment bei der Montage eingehalten?
- Besitzt der Kalibriergegenstand eine Ansatzfläche für einen Drehmomentschlüssel?
- Erzeugen die Kabelabgänge des Kalibriergegenstandes störende Einflüsse?
- Sind die verwendeten Kabel ausreichend flexibel und sinnvoll verlegt?
- Zeigt die Richtung der min. Querbeschleunigungsempfindlichkeit des Kalibriergegenstandes in die Richtung der max. Querbeschleunigung der Kalibriereinrichtung?
- Kann die Befestigung des Kalibriergegenstandes mit möglichst wenigen Adaptern realisiert werden?
- Stehen die Aufspannflächen des Kalibriergegenstandes und der Kalibriereinrichtung in einem angemessenen Verhältnis?
- Liegt der Schwerpunkt der seismischen Masse (C_{SM}) des Kalibriergegenstandes möglichst nahe am C_{SM} des Beschleunigungsaufnehmer-Normals?
- Liegen beim Stoßpendel-Kalibrator die C_{SM} auf Höhe des Schwingungsknotens der ersten Biegeeigenschwingungsform des Ambosspendels?
- Liegt beim Stoßpendel-Kalibrator der Gesamtschwerpunkt von Kalibriergegenstand und allen benötigten Adaptern auf der langen Pendelachse? (Eine symmetrische Masseverteilung des Kalibriergegenstandes am Ambosspendel verringert Schwingungen quer zur Stoßrichtung bzw. Querbeschleunigungseinflüsse.)
- Ist das Elastomer an der Stoßstelle in Ordnung? (Schadhafte Elastomere führen zu Signalstörungen und müssen deshalb regelmäßig ausgewechselt werden.)
- Ist der Abstand von Nutz- zu Störsignalen ausreichend hoch?
- Liegt eine Drift des Ausgangssignals vor? Ist sie hinreichend klein?

- Sind die eingestellten Filter und Grenzfrequenzen angepasst? Empfehlenswert sind beim Stoßpendel-Kalibrator z.B. Tiefpasseinstellungen > 10 kHz und Hochpasseinstellungen < 0,16 Hz (Zeitkonstante Ladungsverstärker > 1 s)
- Sind das Material, die Schirmung und die Kapazität der Kabel richtig gewählt?

10 Messunsicherheitsbetrachtungen

10.1 Darstellung der Einflussgrößen

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

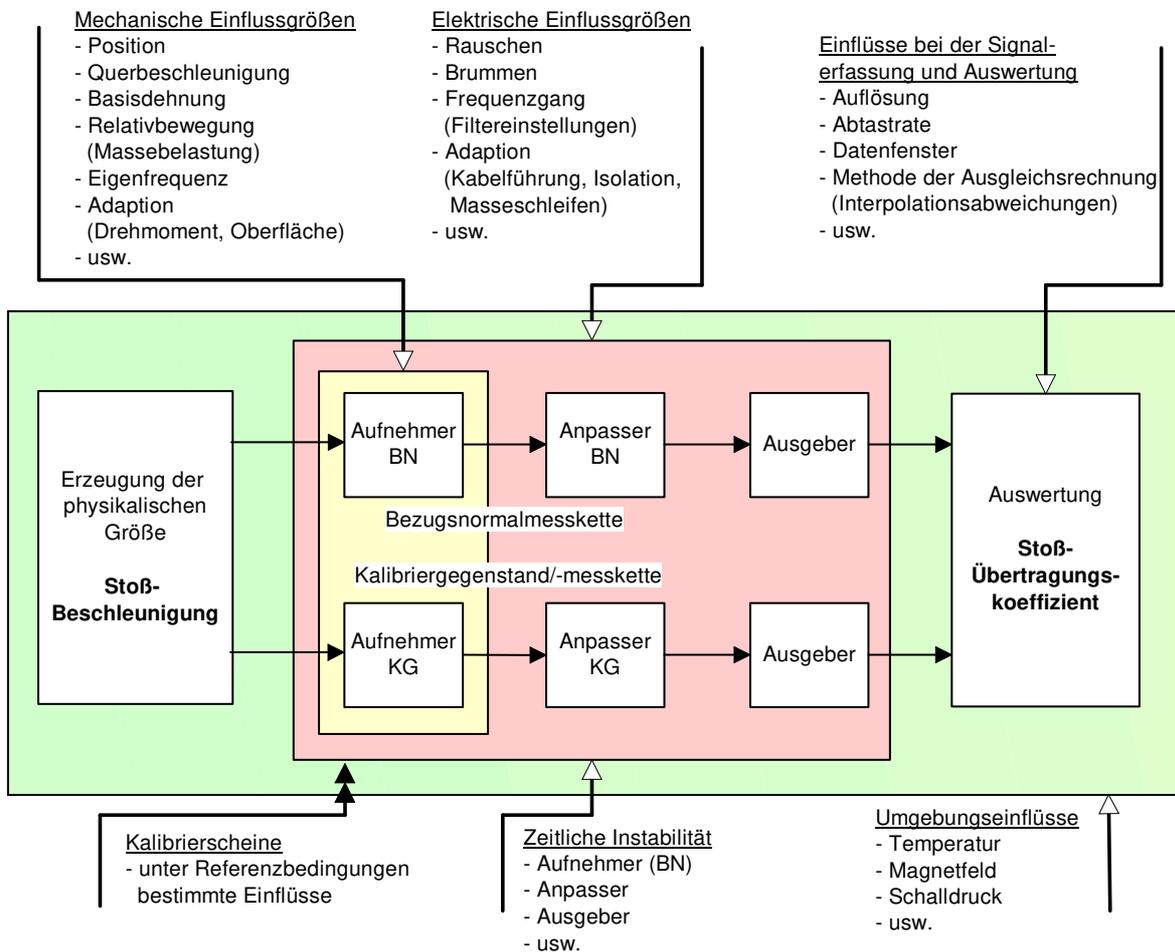


Bild 13: Darstellung der Einflussgrößen

10.2 Modell

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

Größen:

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

Schätzwerte:

$$y = q * \prod_i^N x_i^{p_i} ; p_i = \pm 1$$

In der detaillierten Darstellung – Bestimmungsgleichung mit „besten“ Schätzwerten - wird daraus der Ausdruck:

$$S_X = S_S * G * R * K_{I,S_S} K_{I,G} K_{I,R} K_{TK} K_T K_B K_{Pos} K_L K_f K_{Max} K_{Res}$$

| | | | |
|--------------------|--|---|--|
| $Y = S_X$ | Ergebnis, Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes (KG) Beschleunigungsaufnehmer ohne Verstärker | 7 | |
| $X_1 = S_S$ | Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmer (BA) – Normal | 8 | |
| $X_2 = G$ | Verhältnis der Verstärkerübertragungskoeffizienten $G = G_S/G_X$ | | |
| $X_3 = R$ | Verhältnis der Ausgangsspannungen $R = V_X/V_S$ | | |
| $X_4 = K_{I,S_S}$ | Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität des BA-Normals | 9 | |
| $X_5 = K_{I,G}$ | Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität der Verstärkerübertragungskoeffizienten | | |
| $X_6 = K_{I,R}$ | Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität des Analog-/Digital-Umsetzers (ADU) | | |
| $X_7 = K_{TK}$ | Korrektionsfaktor Temperatur | | |
| $X_8 = K_T$ | Korrektionsfaktor Querbewegung | | |
| $X_9 = K_B$ | Korrektionsfaktor Basisdehnung | | |
| $X_{10} = K_{Pos}$ | Korrektionsfaktor Position | | |
| $X_{11} = K_L$ | Korrektionsfaktor Nichtlinearität/Linearitätsabweichung | | |
| $X_{12} = K_f$ | Korrektionsfaktor Frequenzgang | | |
| $X_{13} = K_{Max}$ | Korrektionsfaktor Stoßspitzenwert | | |
| $X_{14} = K_{Res}$ | Korrektionsfaktor Residuale Größen | | |

Korrektionsfaktoren:

für das Normal:

$$K_i = (1 + e_{S,i}^*)$$

für X_4, X_{11}

(für den Kalibriergegenstand:

$$K_i = (1 - e_{X,i}^*)$$

#)

für das Normal und den KG:

$$K_i = (1 - e_{X,i}^* + e_{S,i}^*)$$

für alle weiteren X_i

Relative Messabweichungen:

⁷ Ergebnisgröße

⁸ N' Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ergebnisgröße

$N' < N$

⁹ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit

$N' < N$

Die relative Messabweichung

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

ist eine Transformation einer mehrdimensionalen Einflussgröße, die sich im Allgemeinfall aus den multiplikativ verknüpften Zufallsvariablen

| | |
|-----------------|--|
| S_{z_i} | Empfindlichkeit bezüglich der Einflussgröße |
| z_i | Intensitätsparameter (Amplitude) der Einflussgröße |
| $g(\alpha_i)$ | Richtungsfaktor (Winkel) |
| $g(\Delta t_i)$ | Zeiteinflussfaktor (z.B. Phase) |

zusammengesetzt denken lässt, wobei die resultierende Zufallsvariable symmetrisch um den Erwartungswert Null verteilt ist. Die Varianz des Produktes aus Zufallsgrößen (mit dem Erwartungswert Null) ist gleich dem Produkt der Varianzen der Verteilungen der einzelnen Zufallsgrößen bzw. ihrer Funktionen.

10.3 Abweichungsspanne W'

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

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

10.4 Messunsicherheitsbudget

10.4.1 Budgettabelle¹⁰, allgemein

Kalibriereinrichtung:

Stoßpendel-Kalibrator

Normal:

ENDEVCO Typ 2270

bester (nahezu idealer) Kalibriergegenstand; hier:

Brüel & Kjær Typ 8305¹¹

Für die Bestimmung der relativen Messunsicherheit sind folgende in der Tabelle 1 aufgeführten Beiträge zu berücksichtigen.

Anmerkung:

- es wird vorausgesetzt, dass die Eingangswerte in dem Sinne beste Schätzwerte sind, dass sie bezüglich der für das Modell bedeutsamen Einflüsse und Effekte geeignet korrigiert wurden. Ist das nicht der Fall, müssen die erforderlichen Korrekturen als getrennte Eingangsgrößen in das Modell der Auswertung eingeführt werden.
- evtl. vorhandene Korrelationen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen X_i werden bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren (gleiches i bei Wirkung auf Normal und KG) berücksichtigt.
- aufgrund des gewählten (linearen) Produkt-Modells und der Betrachtung von relativen Messunsicherheiten sind die Sensitivitätskoeffizienten stets gleich 1 ($c_i = 1$), d.h. es gilt:

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

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

¹⁰ Nach [17], [18], [21], [22].

¹¹ Als Ersatz für den bestmöglichen Gegenstand - Brüel & Kjær Typ 8305WH2335 single-ended – wurde der back-to-back-Typ mit Montage an der Basis verwendet.

| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|----------|-------------|------------|----------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | X_i | x_i | $w(x_i)$ | c_i | $w_i(y)$ | $w_i^2(y)$ |
| 1 | S_S | S_S | $w(S_S)$ | 1 | $w_{S_S}(S_X)$ | $w_{S_S}^2(S_X)$ |
| 2 | G | G | $w(G)$ | 1 | $w_G(S_X)$ | $w_G^2(S_X)$ |
| 5 | R | R | $w(R)$ | 1 | $w_R(S_X)$ | $w_R^2(S_X)$ |
| 4 | K_{L,S_S} | 1 | $w(K_{L,S_S})$ | 1 | $w_{L,S_S}(S_X)$ | $w_{L,S_S}^2(S_X)$ |
| 5 | $K_{L,G}$ | 1 | $w(K_{L,G})$ | 1 | $w_{L,G}(S_X)$ | $w_{L,G}^2(S_X)$ |
| 6 | $K_{L,R}$ | 1 | $w(K_{L,R})$ | 1 | $w_{L,R}(S_X)$ | $w_{L,R}^2(S_X)$ |
| 7 | K_{TK} | 1 | $w(K_{TK})$ | 1 | $w_{TK}(S_X)$ | $w_{TK}^2(S_X)$ |
| 8 | K_T | 1 | $w(K_T)$ | 1 | $w_T(S_X)$ | $w_T^2(S_X)$ |
| 9 | K_B | 1 | $w(K_B)$ | 1 | $w_B(S_X)$ | $w_B^2(S_X)$ |
| 10 | K_{Pos} | 1 | $w(K_{Pos})$ | 1 | $w_{Pos}(S_X)$ | $w_{Pos}^2(S_X)$ |
| 11 | K_L | 1 | $w(K_L)$ | 1 | $w_L(S_X)$ | $w_L^2(S_X)$ |
| 12 | K_f | 1 | $w(K_f)$ | 1 | $w_f(S_X)$ | $w_f^2(S_X)$ |
| 13 | K_{Max} | 1 | $w(K_{Max})$ | 1 | $w_{Max}(S_X)$ | $w_{Max}^2(S_X)$ |
| 14 | K_{Res} | 1 | $w(K_{Res})$ | 1 | $w_{Res}(S_X)$ | $w_{Res}^2(S_X)$ |
| | S_X | S_X | | | $w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$ | |
| | S_X | S_X | | | $W(S_X) = k * w(S_X)$ | |

Tabelle 4: Allgemeine Budgettabelle

10.4.2 Budgettabelle, Werte

| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|--|-------------|------------------------------|---|--------------------------|----------------------|------------|
| | X_i | x_i | $w(x_i)$ | c_i | $w_i(y)$ | $w^2_i(y)$ |
| 1 | S_S | 0,227 pC/(m/s ²) | 2,5E-03 | 1 | 2,5E-03 | 6,3E-06 |
| 2 | G | 0,558 | 1,4E-03 | 1 | 1,4E-03 | 2,0E-06 |
| 3 | R | 0,980 | 1,4E-03 | 1 | 1,4E-03 | 2,0E-06 |
| 4 | $K_{I,S S}$ | 1 | 5,8E-04 | 1 | 5,8E-04 | 3,3E-07 |
| 5 | $K_{I,G}$ | 1 | 2,0E-04 | 1 | 2,0E-04 | 4,0E-08 |
| 6 | $K_{I,R}$ | 1 | 8,2E-05 | 1 | 8,2E-05 | 6,7E-09 |
| 7 | K_{TK} | 1 | 9,1E-04 | 1 | 9,1E-04 | 8,3E-07 |
| 8 | K_T | 1 | 3,7E-04 | 1 | 3,7E-04 | 1,4E-07 |
| 9 | K_B | 1 | 9,5E-05 | 1 | 9,5E-05 | 9,0E-09 |
| 10 | K_{Pos} | 1 | 2,1E-03 | 1 | 2,1E-03 | 4,4E-06 |
| 11 | K_L | 1 | 8,3E-04 | 1 | 8,3E-04 | 6,9E-07 |
| 12 | K_f | 1 | 8,2E-04 | 1 | 8,2E-04 | 6,7E-07 |
| 13 | K_{Max} | 1 | 8,2E-04 | 1 | 8,2E-04 | 6,7E-07 |
| 14 | K_{Res} | 1 | 1,0E-04 | 1 | 1,0E-04 | 1,0E-08 |
| | S_X | 0,124 pC/(m/s ²) | $w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$ | | 4,2E-03 | 1,8E-05 |
| | S_X | 0,124 pC/(m/s ²) | $W(S_X) = k * w(S_X)$ $k = 2$ | | 8,5E-03 | |
| Angabe des vollständigen Messergebnisses: | | | $S_X = 0,124 \text{ pC/(m/s}^2) \pm 0,85\%$ | | | |

Tabelle 5: Budgettabelle, kleinste angebbare Messunsicherheit (best measurement capability), BA BRÜEL & KJÆR Typ 8305, $a_{z,S} = 900 \text{ m/s}^2$

10.4.3 Säulendiagramm der Einflussgrößen

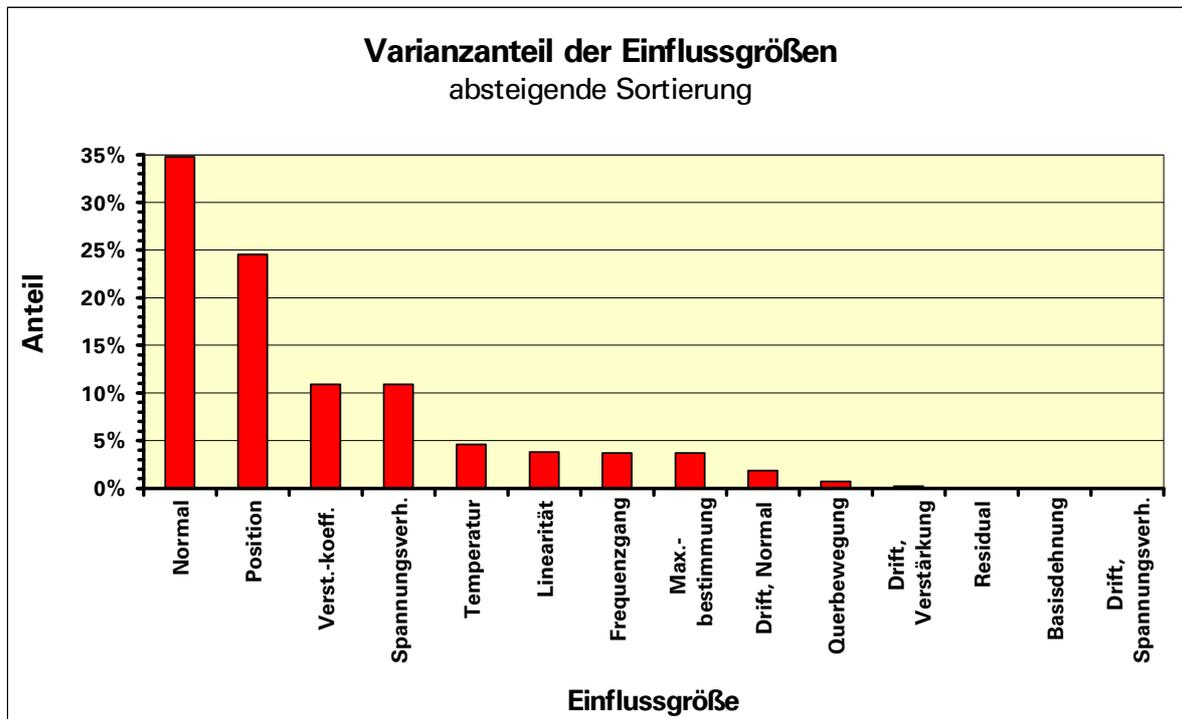


Bild 14: Varianzanteile der einzelnen Einflussgrößen an der Gesamt-Messunsicherheit

11 Angaben im Kalibrierschein

Die in DAkkS-DKD-5 aufgelisteten Angaben sind um folgende Punkte zu erweitern:

- Verwendete Hilfsmessgeräte mit Einstellungen,
- Steckplätze der Messverstärker bei Mehrkanalsystemen,
- bauartbedingte Messbedingungen, z. B. Kabellänge, Kabelkapazität, Art der Befestigung des Kalibriergegenstandes, Material der Befestigungsfläche, Drehmoment bei der Montage, usw.,
- bauartbedingte Kennwerte, z. B. Nullsignal,
- Kennwerte und Charakteristik von Filtern,
- Impulszeiten $t_{1,10\%}$ bei dem kleinsten und dem größten Impulsspitzenwert,
- Temperatur des Kalibriergegenstandes während der Kalibrierung (wenn sie gemessen wurde) oder deren Abschätzung,
- tabellarische Übersicht der diskreten Übertragungskoeffizienten und Messunsicherheiten,
- ggf. Einwertangabe mit Gültigkeitsbereich, Grenzabweichung nach Abschnitt 7 und mit Auswertealgorithmus (vgl. DKD-R 3-1, Blatt 1, Abschnitt 10),

Des Weiteren wird empfohlen, die Kalibrierergebnisse zu visualisieren.

12 Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium

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

- Lage des Kalibriergegenstandes bei der Kalibrierung (Zentrum der seismischen Masse),
- Richtung des Kabelabgangs (ggf. Zusammenhang mit der Richtung der minimalen Querbeschleunigungsempfindlichkeit),
- Art und Anzahl der verwendeten Einbauteile, z.B. Gewintheadapter
- Kennwerte und Angaben zur Analog/Digital-Umsetzung (z.B. Abtastfrequenz, nominelle Auflösung, etc.),
- eine Beschreibung des Verfahrens zur Spitzenwertermittlung der Impulse,
- die Softwareversion bei rechnergestütztem Betrieb,
- alle für die Rückführung relevanten Informationen, z.B. Beschleunigungsaufnehmer-Normal.

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-Kalibrierung¹²</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 environments¹³</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

¹² z. Z. im Entwurfsstadium

¹³ z. Z. noch ISO 5347-11 bis –19 (Ausgabe 1993)

- [5] **DKD-5: Anleitung zum Erstellen eines DKD-Kalibrierscheines**
Hrsg.: PTB Braunschweig, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1999
incl. *Änderungsblatt zu DKD-5*; Januar 2000, 2010 ersetzt durch DAkKS-DKD-5
- [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] **Evans, David J.:** *Testing the Sensitivity of Accelerometers Using Mechanical Shock Pulses* Under NIST - Special Publication 250, Special Test No. 24040S,
Proceedings of the 1995 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, CA November 12-17.1995
- [11] **Sill, R. D.:** *ENDEVCO Automatic Acceleration Calibration System, Model 2925, Comparison Shock Calibrator (POP)*, http://www.endevco.com/test/test_main.htm
- [12] **Sill, R.D.:** *Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers*, ENDEVCO Technical Paper TP 299, p 32,
http://www.endevco.com/test/test_main.htm
- [13] **Sill, R.D.:** *Mass Loading in Back-To-Back Reference Accelerometers*
ENDEVCO Technical Paper TP 310, p 8, http://www.endevco.com/test/test_main.htm
- [14] **Wittkowski, U.:** *Stoßpendelverfahren zum Kalibrieren und Prüfen von Beschleunigungsmessgeräten*; Technisches Messen tm 1979, Heft 9, S.323-328
- [15] **Müller, H.:** *Stoßförmige Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren*, Dissertation, TU Braunschweig und VOLKSWAGEN AG Wolfsburg, Mai 2001; veröffentlicht auch unter <http://opus.tu-bs.de/opus/volltexte/2001/227/>
- [16] **Wenzel, R.:** *Ermittlung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern*, Diplomarbeit, Fachhochschule Heidelberg und ENDEVCO Vertriebsges. mbH Deutschland Heidelberg, Sep.1999
- Grundlage für Messunsicherheitsbetrachtungen sind folgende Dokumente und Veröffentlichungen:
- [17] **ISO:** *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
1st Edition 1993, ISO, Geneva, CH, ISBN 92-67-10188-9
- [18] **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“)
- [19] **EA-4/02 (früher EAL-R2):** *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*
Edition 1, April 1997, <http://www.european-accreditation.org>
- [20] **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>
- [21] **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“). DAkkS-DKD-3 (2010) ist inhaltsgleich mit DKD-3.

- [22] **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*). DAkkS-DKD-3-E1 (2010) ist inhaltsgleich mit DKD-3-E1.
- [23] **DIN 1319-3:** *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin 1996
- [24] **DIN 1319-4:** *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 4: Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin 1999
- [25] **VDI/VDE 2620:** *Unsichere Messungen und ihre Wirkung auf das Messergebnis* Beuth Verlag Berlin, Entwurf Dezember 1998
- [26] **Martens, H.-J. v.; Rogazewski, P.:** *Representation and Transfer of the Units of Vibration Quantities in the GDR*, Bulletin OIML No. 108, 1987
- [27] **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
- [28] **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*
- [29] **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
- [30] **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
- [31] **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