

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Richtlinie  
DKD-R 3-1**

Blatt 2

**Kalibrierung von  
Beschleunigungsmessgeräten  
nach dem Vergleichsverfahren  
Stoßanregung**

---

Ausgabe 04/2019

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



	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	2 / 35

### Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 3. Mai 2011 erfolgte nach Ausgliederung der Akkreditierungsaufgaben 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 <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	3 / 35

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 3-1 Blatt 2 Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung, Ausgabe 04/2019, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20190502B*

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 – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	4 / 35

## 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; außerdem wurde das Literaturverzeichnis komplett überarbeitet und auf die Beschreibung des Kugelfall-Kalibrators verzichtet, da er nicht mehr Stand der Technik ist. Darüber hinaus ist sie inhaltsgleich mit der DKD-R 3-1, Blatt 2: 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 – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	5 / 35

## Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich.....	6
2	Symbole.....	7
3	Kalibriereinrichtungen.....	8
3.1	<i>Stoßpendel-Kalibrator</i> .....	8
3.1.1	<i>Aufbau und Prinzip</i> .....	8
3.1.2	<i>Einsatzgrenzen</i> .....	10
3.2	<i>Stoßkalibratoren mit zentralem und geradlinigem Stoß</i> .....	12
3.2.1	<i>Aufbau und Prinzip des pneumatischen Stoß-Kalibrators</i> .....	12
3.2.2	<i>Einsatzgrenzen des pneumatischen Stoß-Kalibrators</i> .....	14
4	Signalverläufe, Spitzenwertermittlung und Übertragungskoeffizient.....	15
5	Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung.....	21
5.1	<i>Vorbereitende Maßnahmen bei allen Kalibratoren</i> .....	21
5.2	<i>Spezielle Vorbereitungen</i> .....	21
5.2.1	<i>Spezielle Vorbereitungen beim Stoßpendel-Kalibrator</i> .....	21
5.2.2	<i>Spezielle Vorbereitungen beim pneumatischen Stoß-Kalibrator</i> .....	21
5.3	<i>Durchführung</i> .....	22
5.3.1	<i>Durchführung beim pneumatischen Stoß-Kalibrator</i> .....	24
6	Auswertung.....	24
7	Wartung und Kontrolle.....	27
8	Kontrolle der Anforderungen an Stoßkalibrierungen von Beschleunigungsaufnehmern.....	28
9	Messunsicherheit.....	29
9.1	<i>Modellgleichung</i> .....	29
9.2	<i>Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz</i> .....	30
9.2.1	<i>Spezifikation von BNME, BA-Normal und Kalibriergegenstand</i> .....	30
9.2.2	<i>Messunsicherheitsbilanz – Beispielwerte</i> .....	30
9.2.3	<i>Analyse der Messunsicherheitsbilanz</i> .....	32
9.3	<i>Abweichungsspanne <math>W'</math></i> .....	32
10	Angaben im Kalibrierschein.....	33
11	Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium.....	33
12	Literatur.....	34

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	6 / 35

## 1 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 Stoßkalibrierung 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:

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

Dabei ist für  $f_{\text{Res}}$  die Resonanzfrequenz des betrachteten Aufnehmers im montierten Zustand einzusetzen. Die Richtlinie ergänzt Forderungen der ISO 16063-22 um Hinweise für den Umgang mit Kalibriereinrichtungen für Stoßanregung und beschreibt Kalibrierabläufe. Die 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.

<sup>1</sup> 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.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	7 / 35

## 2 Symbole

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

Abkürzungen/ Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
$a_{z,S}$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigungsspitzenwert, der auf das Beschleunigungsaufnehmer-Normal wirkt
$a_{z,X}$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigungsspitzenwert, der auf den Kalibriergegenstand wirkt
$C_{SM}$	mm	Schwerpunkt der seismischen Masse (Centre of seismic mass)
$f_{Res}$	Hz	Resonanzfrequenz eines Beschleunigungsaufnehmers (im montierten Zustand)
$G_S$	versch.	Übertragungskoeffizient des Normal-Verstärkers
$G_X$	versch.	Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstands-Verstärkers
$Q_S$	pC	Ausgangsladung eines Beschleunigungsaufnehmer-Normals
$Q_X$	pC	Ausgangsladung eines Kalibriergegenstandes
$S_{ua,X}$	versch.	Übertragungskoeffizient der Kalibriergegenstands-Messkette
$S_S$	versch.	Übertragungskoeffizient des Beschleunigungsaufnehmer-Normals
$S_X$	versch.	Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandsaufnehmers
$t_{1,10\%}$	ms	Impulsdauer bei 10% des Impulsspitzenwertes
$\hat{u}_S$	V	Spannungsspitzenwert am Ausgang des Normal-Verstärkers
$\hat{u}_X$	V	Spannungsspitzenwert am Ausgang des Kalibriergegenstands-Verstärkers
IEEE		Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA
IEPE		Piezoelektrischer Aufnehmer mit integrierter Elektronik
ISO		International Organisation for Standardization, Geneva, CH
KG		Kalibriergegenstand
OIML		Organisation Internationale de Métrologie Légale
PMÜ		Prüfmittelüberwachung
PTB		Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, D

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	8 / 35

QM		Qualitätsmanagement
v. E.		vom Endwert
v. M.		vom Messwert

### 3 Kalibriereinrichtungen

Diese Richtlinie geht auf die Kalibrierverfahren zur Stoßkalibrierung mit dem Stoßpendel-Kalibrator<sup>2</sup> und dem pneumatischen Stoß-Kalibrator<sup>3</sup> ein. Die Unterschiede der Verfahren liegen

- im Kalibrierbereich hinsichtlich der Stoßparameter (Beschleunigungsspitzenwert und Stoßdauer)
- in der Montage von Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Kalibriergegenstand zueinander (Rücken-an-Rücken-Anordnung oder Befestigung der Referenzflächen an einer Zwischenadaption)
- 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

#### 3.1 Stoßpendel-Kalibrator

##### 3.1.1 Aufbau und Prinzip

Die wichtigsten Bestandteile des Stoßpendel-Kalibrators sind ein Ambosspendel aus einer Magnesium-Legierung und ein Hammerpendel wahlweise aus einer Aluminium- oder Stahllegierung (siehe Abbildung 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.

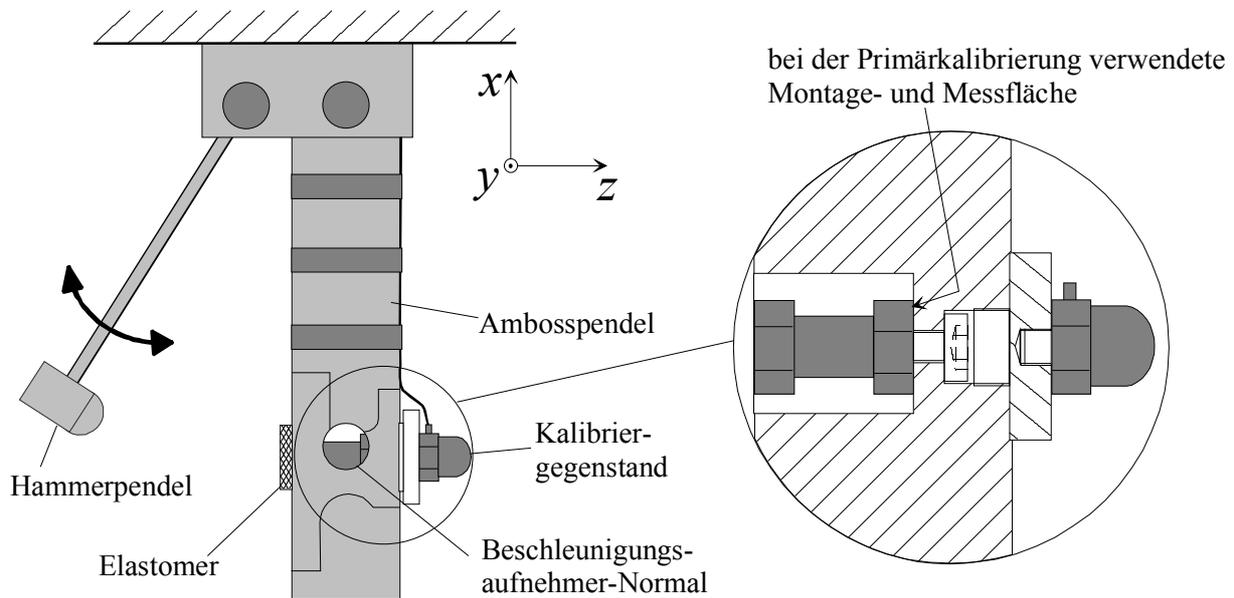
Das Ambosspendel dient als Trägerkörper für das Beschleunigungsaufnehmer-Normal und den zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmer. Durch Auslenken und Fallenlassen des Hammerpendels werden das Ambosspendel, und mit ihm die beiden Beschleunigungsaufnehmer, stoßförmig in Bewegung versetzt. Der entstehende 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, ergeben 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

<sup>2</sup> In ISO 16063-22: Shock Pendulum Calibrator

<sup>3</sup> In ISO 16063-22: Upward Moving Pneumatic Piston Shock Calibrator

Ambosspendel geklebt wird und den Stoß bedämpft. Gute Ergebnisse sind mit einem 8 mm starken Elastomer der Shore A-Härte 56 erzielbar.



**Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Stoßpendels**

Trotz des Elastomers werden unterhalb einer bestimmten Impulsdauer (und damit oberhalb eines bestimmten Beschleunigungsspitzenwertes) modale Biegeeigenformungen 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 Biegeeigenformung entlang der x-Achse (siehe Abbildung 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.

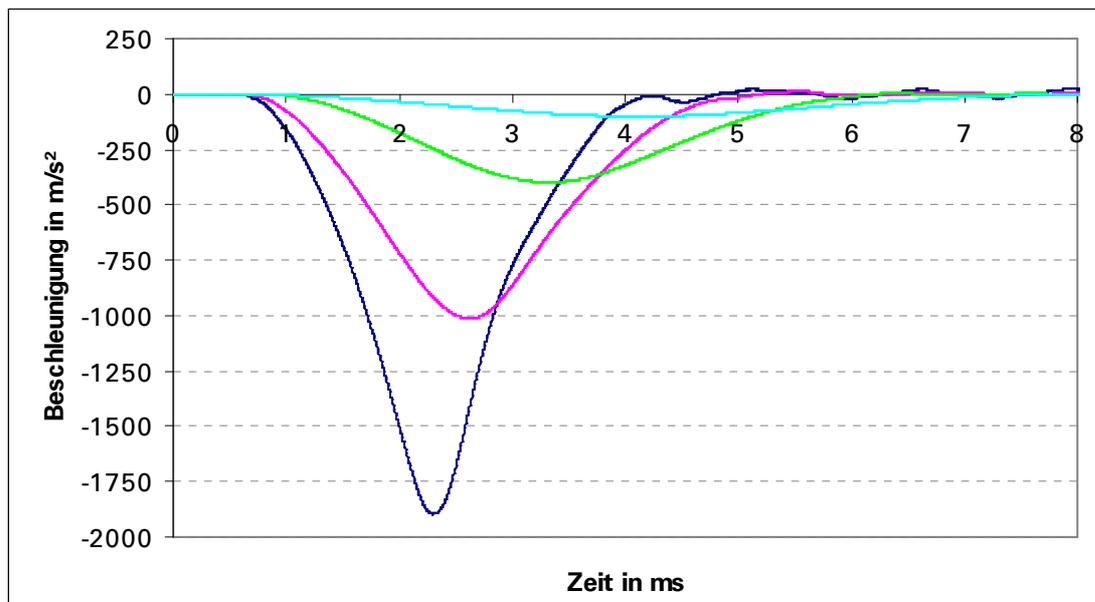
Im beschriebenen Fall stimmt die nominelle Messrichtung des Kalibriergegenstandes mit der z-Richtung des Ambosspendels überein. Zusätzlich sollte der Kalibriergegenstand zur Minimierung des systematischen Querschleunigungseinflusses so ausgerichtet werden, dass die Richtung der minimalen Querschleunigungsempfindlichkeit 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. Abbildung 2), während das Frequenzspektrum entsprechend breiter wird. Außerdem wird bei gleich bleibenden Trägheitsmomenten und gleichem Beschleunigungsspitzenwert die Impulsdauer länger, je weicher das Elastomer gewählt wird. Mit einem Elastomer der Shore A-Härte 56 ergeben sich beim Stoßpendel für Impulsspitzenwerte zwischen 2000 m/s<sup>2</sup> und 100 m/s<sup>2</sup> typischerweise Impulslängen  $t_{1,10\%}$  von ca. 3 ms bis 8 ms [3].



**Abbildung 2: Zusammenhang zwischen dem Beschleunigungsspitzenwert und der Dauer des Impulses**

### 3.1.2 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	11 / 35

Biegeeigenschwingungsform entlang der x-Achse und in Stoßrichtung bei ca. 700 Hz bis 750 Hz [3].

Für den Stoßpendel-Kalibrator resultiert eine obere Einsatzgrenze von ca. 2000 m/s<sup>2</sup> bei Gesamtmassen von Kalibriergegenstandsaufnehmer und Adaptern bis 100 g und von ca. 1000 m/s<sup>2</sup> 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 direkte 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
- die erheblich über die Aufspannflächen des Ambosspendels hinausragen

### 3.2 Stoßkalibratoren mit zentralem und geradlinigem Stoß

#### 3.2.1 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 Abbildung 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.

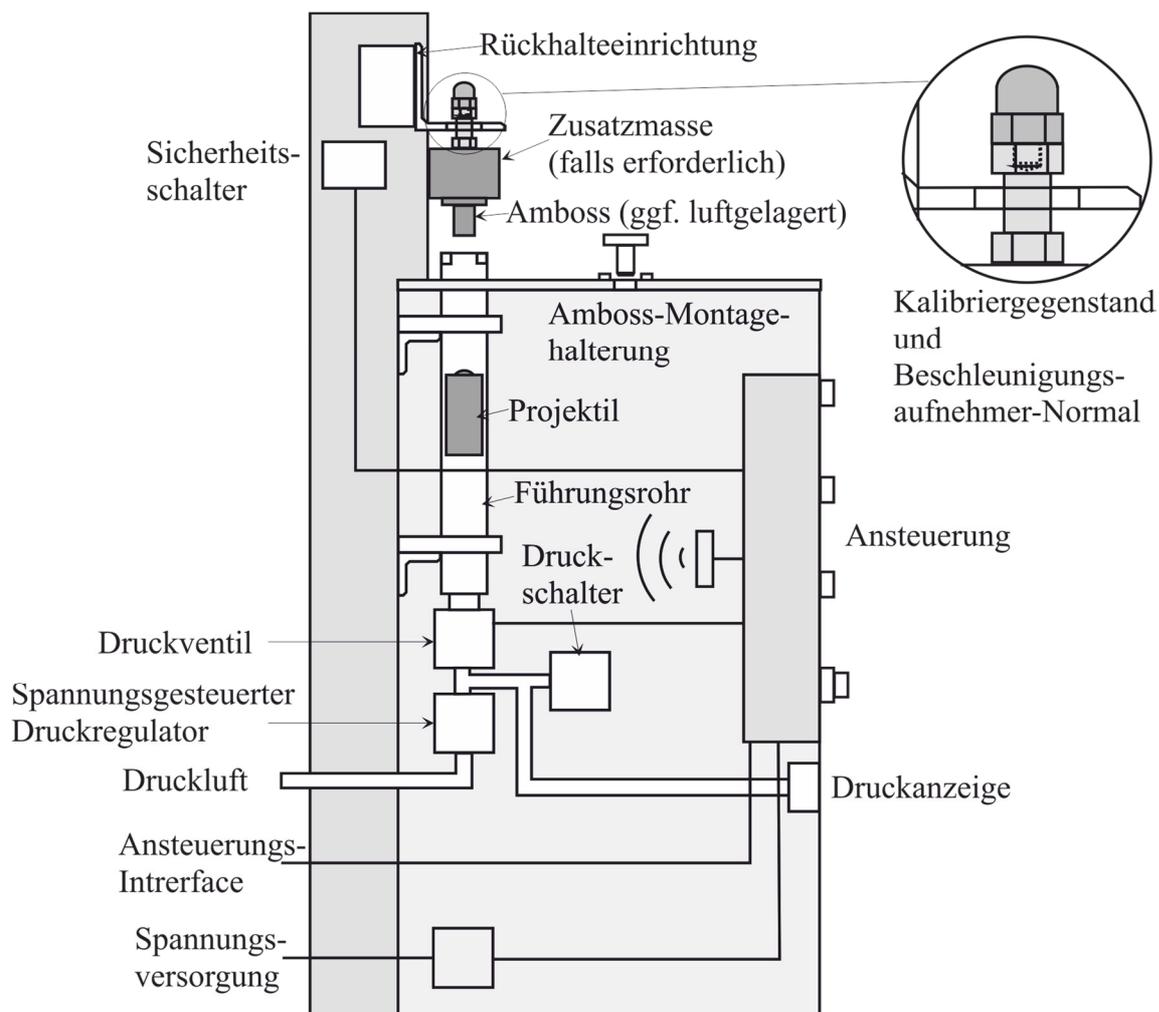


Abbildung 3: Beispielhafter Aufbau eines pneumatischen Stoß-Kalibrators

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	13 / 35

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 weiter Bereich von Impulsspitzenwerten und Impulszeiten erzielt werden.

Die Form des Stoßimpulses wird generell durch folgende Einflüsse bestimmt:

- Die Geschwindigkeit des Projektils
- Die Gesamtmasse und Form des Projektils
- Die Gesamtmasse und Form der Ambosseinheit (Amboss, Zusatzmasse und Beschleunigungsaufnehmer)
- 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.

Insgesamt sind mit der Einrichtung Impulsspitzenwerte zwischen  $200 \text{ m/s}^2$  und  $100\,000 \text{ m/s}^2$  bei Impulszeiten  $t_{1,10\%}$  von  $3 \text{ ms}$  bis  $100 \text{ }\mu\text{s}$  mit halbsinusförmigem Verlauf (ähnlich Abbildung 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.

Um Querbeschleunigungen zu minimieren, empfiehlt sich die Führung des Ambosses durch ein Luftlager. Dies kann insbesondere bei asymmetrischer Masseverteilung der Aufnehmer, z. B. verursacht durch die Sensorkabel, zu einer Verringerung der Querbewegung und somit auch der Messunsicherheit führen.

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

Die Kombination Impulsdauer zu Impulsspitzenwert ist von den Eigenschaften des Hammers und des Ambosses abhängig. In Tabelle 1 sind die Kombinationen für zwei typische Konfigurationen angegeben. Abweichende Kombinationen Impulsdauer zu Impulsspitzenwert sind zulässig und können über weitere Konfigurationen erzeugt werden.

**Tabelle 1: Typische Kombinationen von Impulsspitzenwert und -dauer beim pneumatischen Stoß-Kalibrator für zwei typischen Hammer / Amboss Konfigurationen**

Hammer / Amboss Konfiguration	Beschleunigungs- spitzenwert in m/s <sup>2</sup>		Impulsdauer			
			$t_{1,10\%}$ in ms			
1	100	bis	2 000	4,0	bis	1,2
2	2 000	bis	100 000	0,6	bis	0,1

### 3.2.2 Einsatzgrenzen des pneumatischen Stoß-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 liegt die obere Einsatzgrenze bei ca. 100 000 m/s<sup>2</sup>. Abhängig von den technischen Daten des Kalibriergegenstandes (minimal zulässige Stoßdauer) kann diese Grenze aber oft nicht erreicht werden (siehe Abschnitt 1).

Für die Ermittlung des Stoß-Übertragungskoeffizienten *eines* Beschleunigungsspitzenwertes können bei pneumatischem Stoß-Kalibrator Standardabweichungen der Einzelwerte einer Messreihe unter Wiederholbedingungen in der Größenordnung von 0,1 % erreicht werden. Allerdings kann es beim Durchlaufen eines Kalibrierbereiches 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.

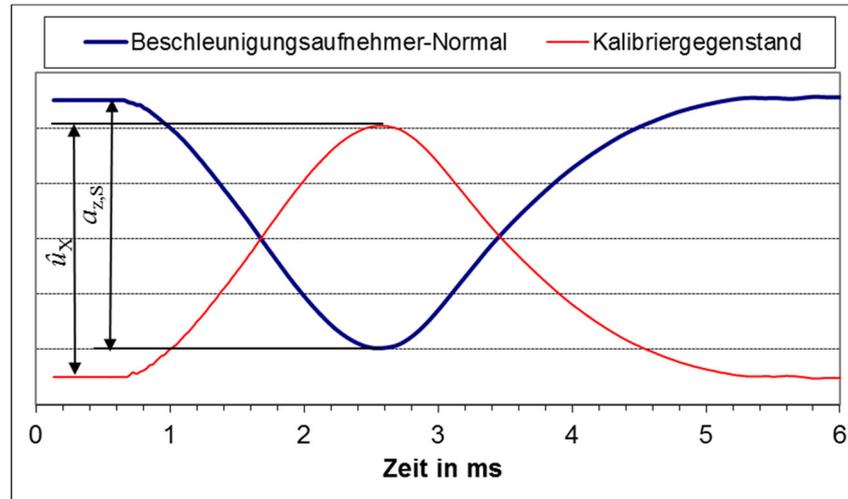
Als kleinste angebbare relative erweiterte Messunsicherheit sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand Werte von 1 % bis zu Beschleunigungsspitzenwerten von 2500 m/s<sup>2</sup> möglich. Mit größeren Messunsicherheiten muss insbesondere dann gerechnet werden, wenn der Schwerpunkt von Kalibriergegenstand und Adaption nicht koaxial zum Amboss zentriert ist.

Mit dem pneumatischem Stoß-Kalibrator **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
- die deutlich über die Aufspanflächen des Beschleunigungsaufnehmer-Normals hinausragen (s.o.)

#### 4 Signalverläufe, Spitzenwertermittlung und Übertragungskoeffizient

Abbildung 4 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.



**Abbildung 4: 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 Einflüsse<sup>4</sup> der Stoß-Übertragungskoeffizient  $S_{ua,X}$  der Kalibriergegenstands-Messkette zu:

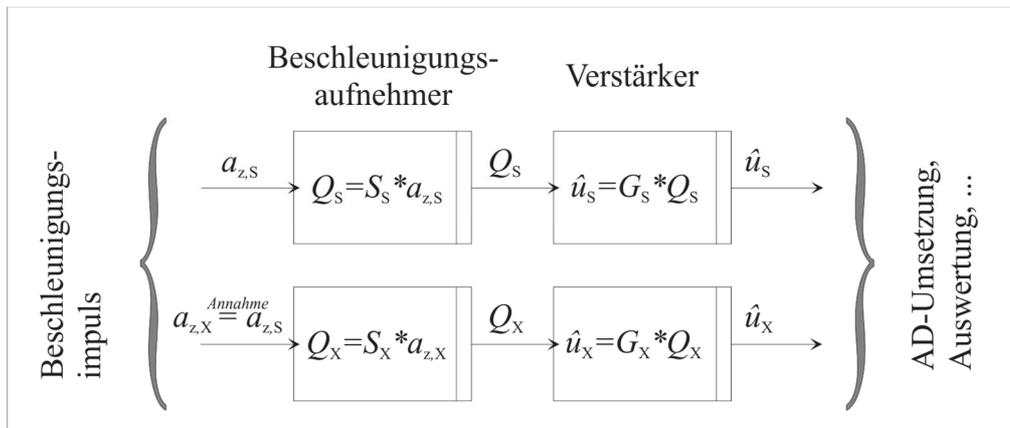
$$S_{ua,X} = \frac{\hat{u}_x}{a_{z,S}} = S_s \cdot \frac{G_s}{\hat{u}_s} \cdot \hat{u}_x \quad (2)$$

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:

$$S_x = \frac{S_{ua,X}}{G_x} = \frac{\hat{u}_x}{a_{z,S} \cdot G_x} = S_s \cdot \frac{G_s}{G_x} \cdot \frac{\hat{u}_x}{\hat{u}_s} \quad (3)$$

Abbildung 5 zeigt den zugehörigen Signalfussplan 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.

<sup>4</sup> Eine Aufzählung der Größen, die das Kalibrierergebnis störend beeinflussen, ist im Abschnitt 9 „Messunsicherheitsbetrachtungen“ zu finden.



**Abbildung 5: Typischer Signalflossplan für die Kalibrierung nach dem Vergleichsverfahren**

Für die Berechnung des Stoß-Übertragungskoeffizienten nach Gl. (2) oder Gl. (3) müssen die Spitzenwerte<sup>5</sup> der impulsförmigen Ausgangssignale der Normal- und der Kalibriergegenstands-Messkette ermittelt werden. Beim Stand der Technik sind diese Ausgangssignale digital zu erfassen 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 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.

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.

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

<sup>5</sup> Der gesuchte Spitzenwert des Impulses bezieht sich auf einen Basiswert („Nullsignal“), der i. Allg. nicht das Ausgangssignal Null darstellt.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	17 / 35

bestimmte Differenz zwischen den Extremwerten der Ausgleichsfunktionen und den gemessenen Maximalwerten zugelassen wird. Des Weiteren 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 (Ripple) 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 (Gauß'schen) 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.

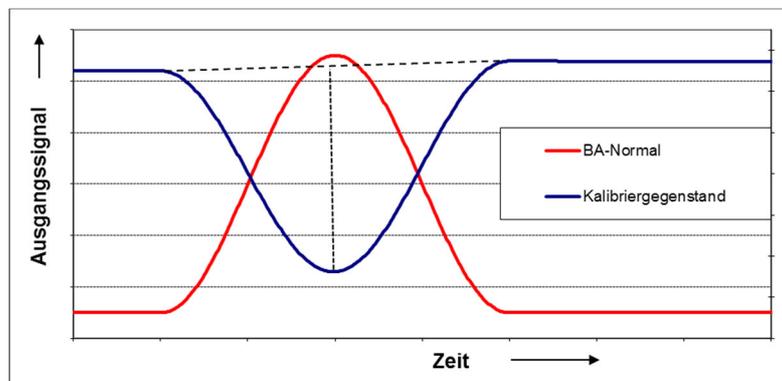
- d. Ermittlung des Stoß-Übertragungskoeffizienten  $S_X$  oder  $S_{ua,X}$  nach Gl. (3) oder Gl. (2).

**Anmerkung:** Neben den beschriebenen Verfahren, die eine Auswertung im Zeitbereich darstellen, ist insbesondere beim pneumatischen Stoß-Kalibrator aufgrund der teilweise auftretenden sehr kurzen Stoßdauern und damit hohen Bandbreite des Messsignales eine Auswertung im Frequenzbereich sinnvoll. Entsprechende Hinweise und Verfahren sind in ISO 16063-43:2015 beschrieben.

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 (vgl. Abbildung 6). Dabei sollte eine Differenz zwischen den beiden Nullpunkten vor und nach dem Impuls, bezogen auf den Spitzenwert, verursacht durch einen Hochpasseinfluss nicht größer als 1 % sein.

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 werden.

Die Unsicherheit der Nullpunktbestimmung sollte in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.



**Abbildung 6: Veranschaulichung der Nullsignalbestimmung (übertrieben dargestellt)**

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. Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	19 / 35

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 eine Kenngröße 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 Approximationsabweichungen stellen ein Qualitätsmerkmal des Kalibriergegenstandes dar (vgl. Abschnitt 6).

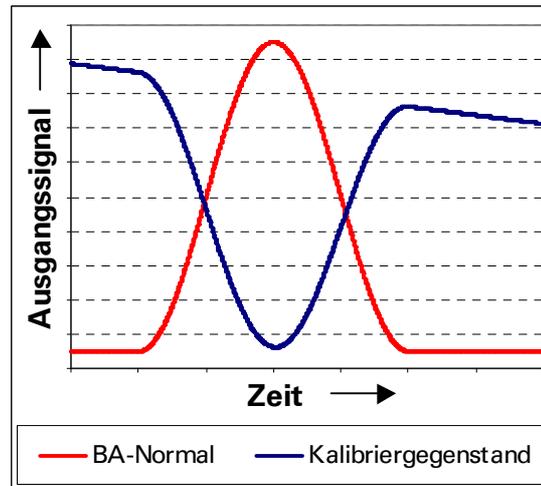
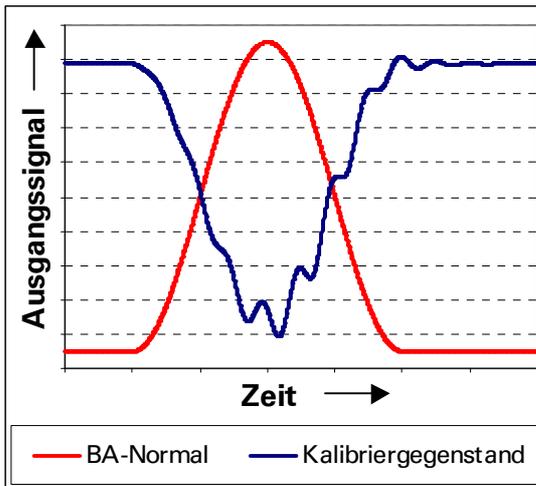


Abbildung 7: Impulsverlauf bei Störungen (links) und Drift des Ausgangssignals (rechts)

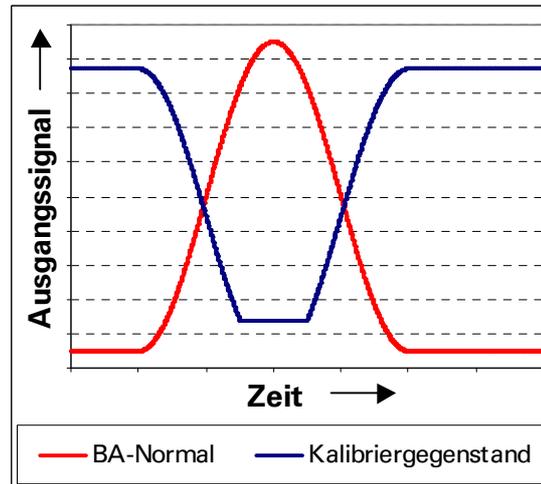
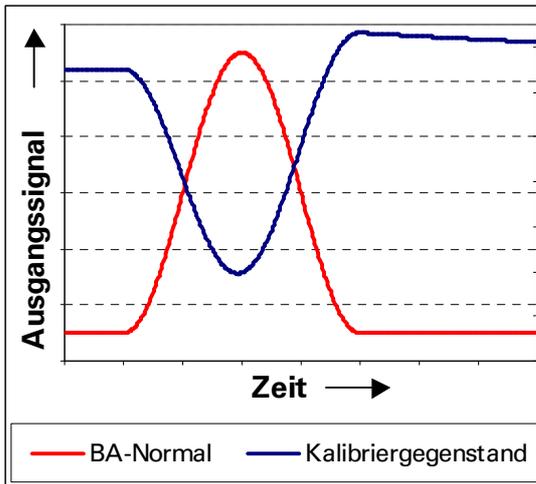


Abbildung 8: Impulsverlauf bei falsch angepasster unterer Grenzfrequenz (links) und Übersteuerung (rechts)

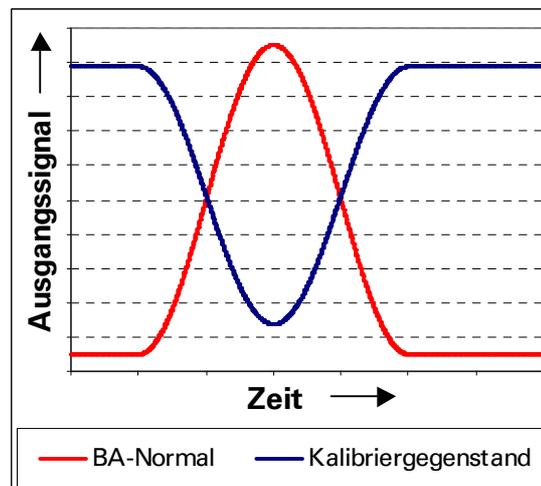
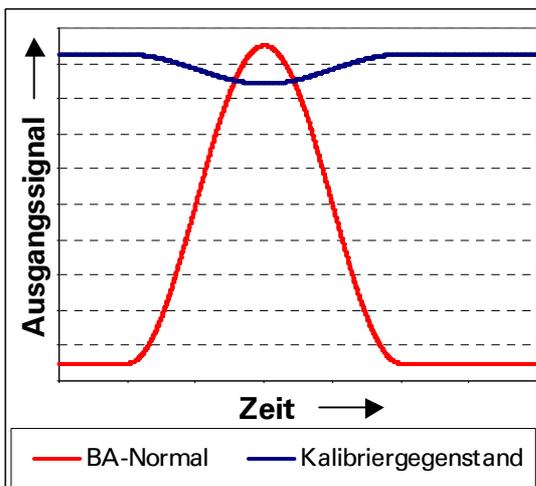


Abbildung 9: Impulsverlauf bei Untersteuerung (links) und von einwandfreien Signalen (rechts)

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	21 / 35

## 5 Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung

### 5.1 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 Adaptern 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 DIN ISO 5348). 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.

### 5.2 Spezielle Vorbereitungen

#### 5.2.1 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 3.1.1 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.

#### 5.2.2 Spezielle Vorbereitungen beim pneumatischen Stoß-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.

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	22 / 35

Der Amboss ist symmetrisch zu belasten, damit beim Stoß keine Querschleunigungen 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.

### 5.3 Durchführung

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 Abbildung 10 ist der zeitliche Ablauf einer Kalibrierung bis 1 000 m/s<sup>2</sup> dargestellt, Abbildung 11 zeigt eine mögliche Zykluseinteilung dieser Kalibrierung. Zyklus 1 erstreckt sich dabei von ca. 1 000 m/s<sup>2</sup> bis ca. 700 m/s<sup>2</sup>, Zyklus 2 von ca. 650 m/s<sup>2</sup> bis ca. 350 m/s<sup>2</sup> und Zyklus 3 von ca. 300 m/s<sup>2</sup> bis ca. 100 m/s<sup>2</sup>. Auf der Ordinate sind die zugehörigen Ausgangssignale des Anpassers dargestellt.

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 Kontrolle auf einer geeigneten Anzeige die Ausgangssignale der Verstärker zu prüfen (vgl. Abschnitt 0). Diese subjektive Kontrolle liefert Hinweise auf Störungen und Fehleinstellungen der signalführenden Komponenten. Gleichzeitig können diese Vorversuche als Vorbelastung der Aufnehmer angesehen werden.

Des Weiteren 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. ±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.

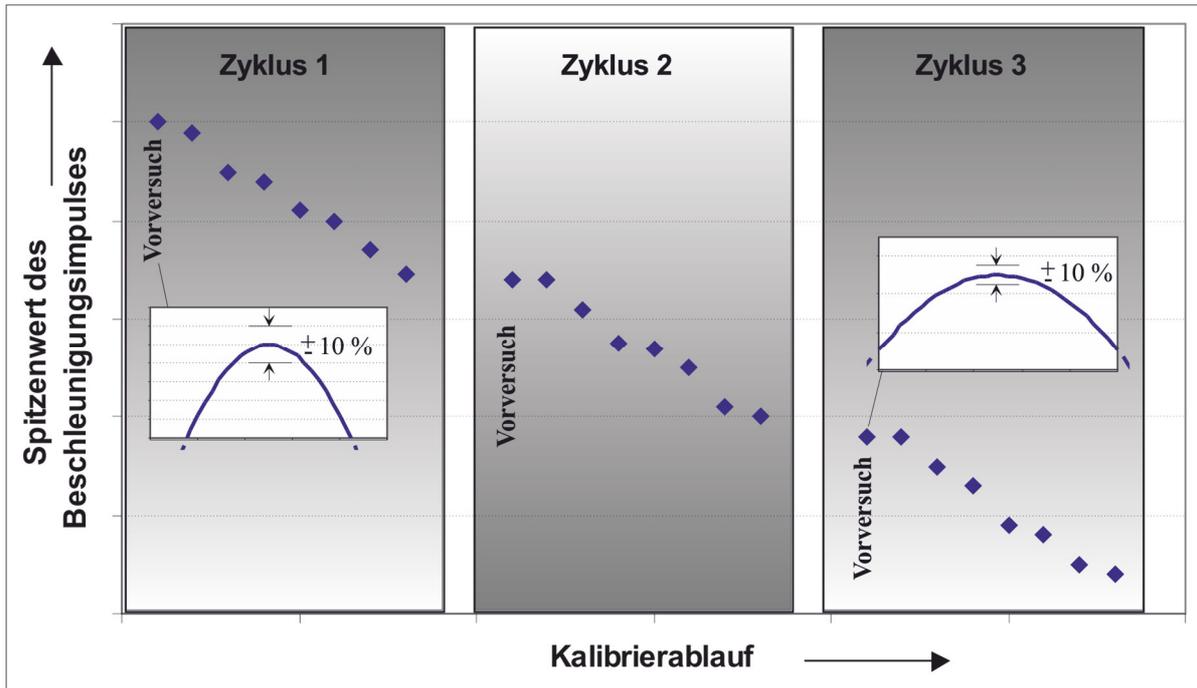


Abbildung 10: Prinzipieller Ablauf der Kalibrierung

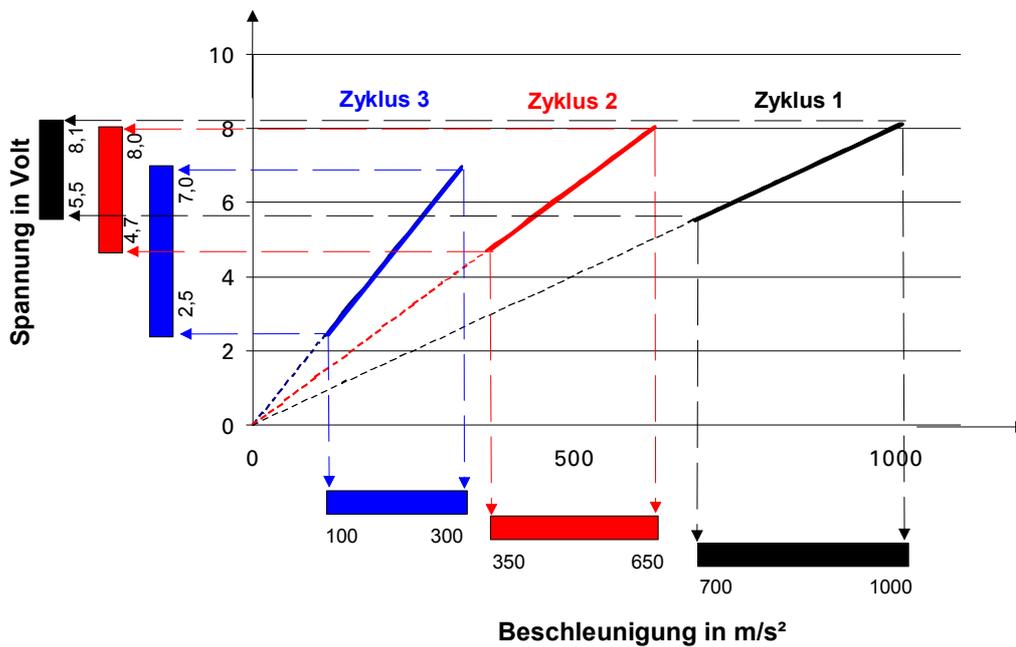


Abbildung 11: Aufteilung des Kalibrierbereiches in verschiedene Zyklen zur sinnvollen Anpassung der Signale

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	24 / 35

### 5.3.1 Durchführung beim pneumatischen Stoß-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 Aufspannfläche des Kalibriergegenstandes sollte nicht größer sein als die vorgesehene Montagefläche der Kalibriereinrichtung.

Bzgl. der kürzesten Stoßdauer sollten die Abschnitte 3.2.2 (Einsatzgrenzen des pneumatischen Stoß-Kalibrators) und 1 (Anwendungsbereich) beachtet werden.

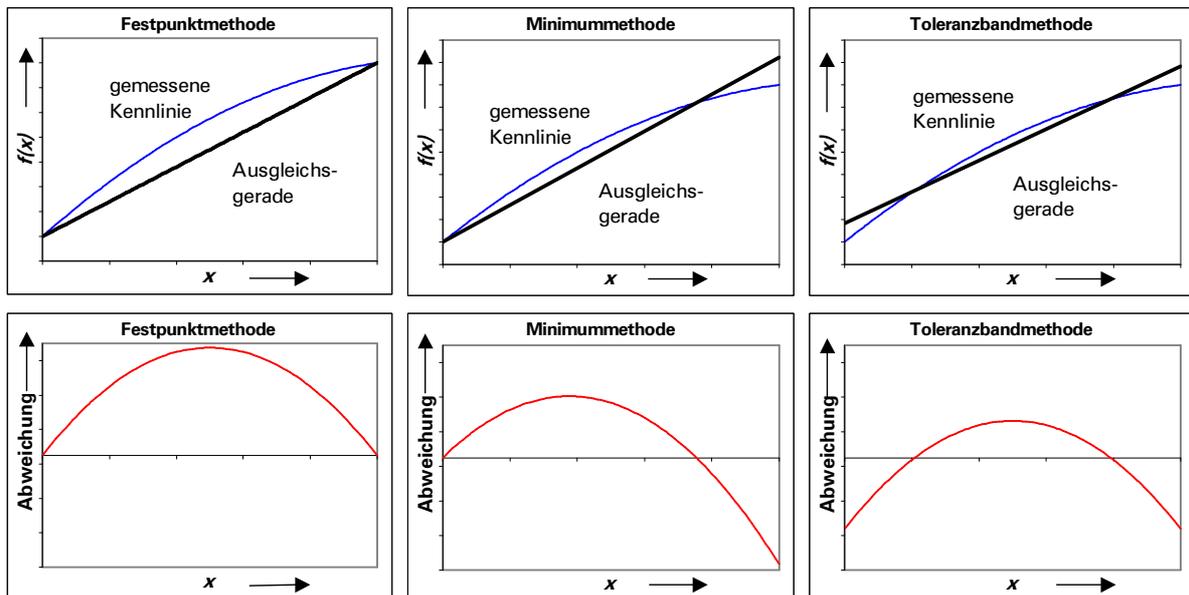
## 6 Auswertung

Nach der Datenaufnahme der Signale werden die Spitzenwerte des Beschleunigungsaufnehmer-Normals und des Kalibriergegenstandes für jeden Impuls sowie der Übertragungskoeffizient nach Abschnitt 0 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 9 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).

Es gibt unterschiedliche Methoden, eine solche Einwertangabe zu bestimmen:

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



**Abbildung 12: Verschiedene Methoden zur Gewinnung einer Einwertangabe und ein Vergleich der dabei entstehenden Abweichungen zwischen der gemessenen Kennlinie und der Ausgleichsgeraden**

Die unterschiedlichen Methoden führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Daher wird empfohlen, die Einwertangabe als Steigung einer Geraden anzugeben, deren Koeffizienten durch den linearen Ausgleich nach der (Gauß'schen) Methode der kleinsten Abweichungsquadrat-Summe berechnet werden (Toleranzbandmethode). In diesem Fall treten, insbesondere bei einem nichtlinearen Zusammenhang des Übertragungsverhaltens im Kalibrierbereich, in der Regel die geringsten Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem durch die Einwertangabe beschriebenen Übertragungsverhalten auf.

Um eine Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse sicherzustellen, muss die Methode, nach der die Einwertangabe bestimmt wird, im Kalibrierschein angegeben werden.

Bei Verwendung einer solchen Einwertangabe als Kenngröße des Beschleunigungsaufnehmers tritt an die Stelle der den einzelnen Werten des Stoß-Übertragungskoeffizienten beigeordneten Messunsicherheiten eine Konformitätsaussage mit selbstbestimmten Spezifikationsgrenzen.

Die dazu festzulegenden Spezifikationsgrenzen ergeben sich aus der maximalen Abweichungsspanne. Zur Berechnung der Abweichungsspanne sind

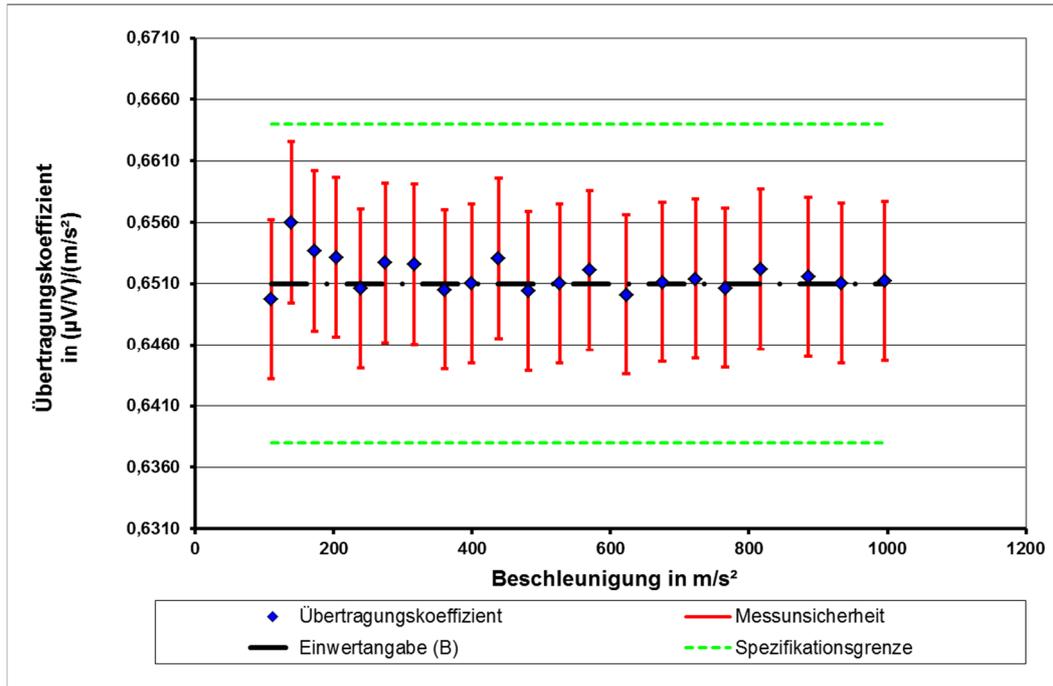
- die Abweichungen dieser Werte von der Einwertangabe des Stoß-Übertragungskoeffizienten und
- die den einzelnen Messwerten des Stoß-Übertragungskoeffizienten beigeordneten Messunsicherheiten

zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 9.3).

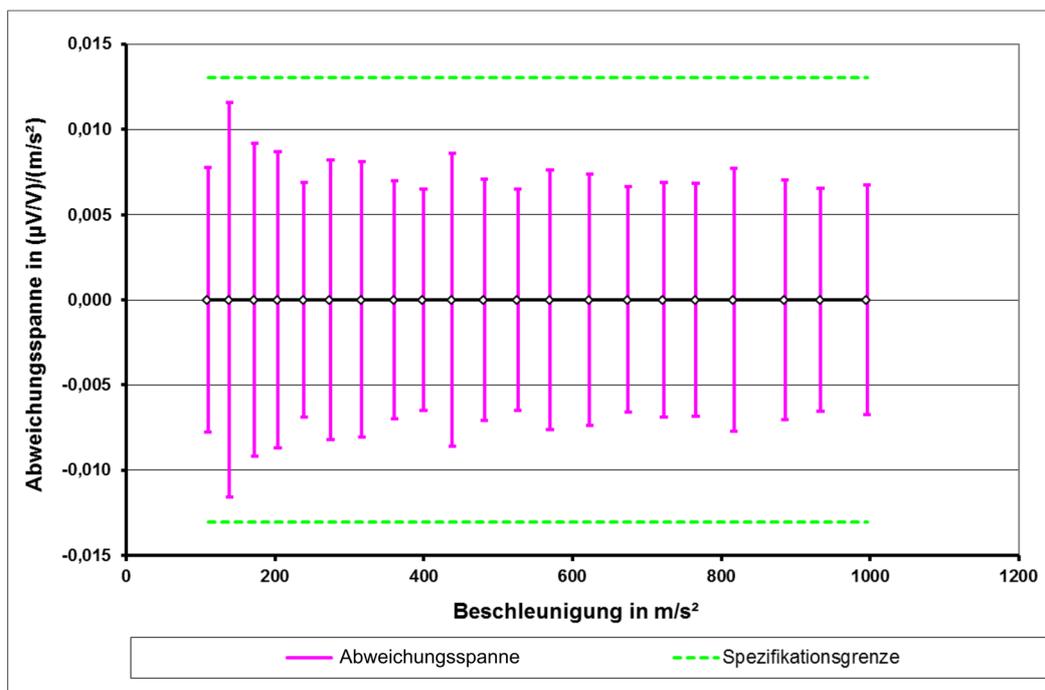
Anstelle der ermittelten Einwertangabe kann bei entsprechender Anpassung der Spezifikationsgrenzen auch ein nomineller Übertragungskoeffizient (z. B. Herstellerangabe) als Grundlage der Konformitätsaussage verwendet werden.

### Visualisierung

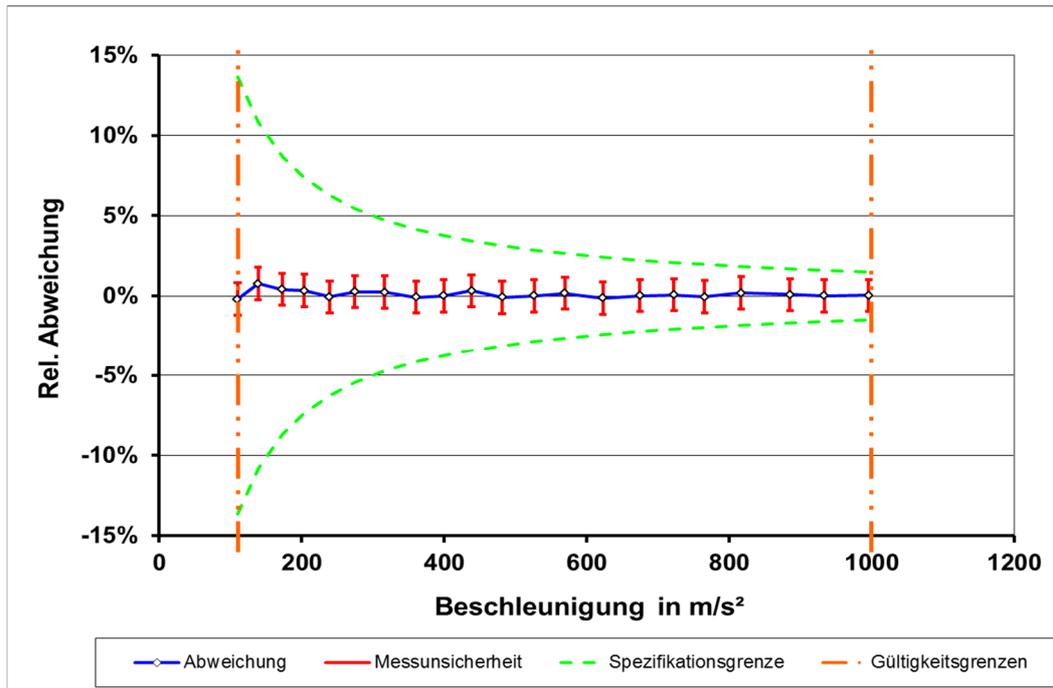
Die Übertragungskoeffizienten und die beigeordneten Messunsicherheiten werden im Vergleich zu den Spezifikationsgrenzen dargestellt. Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigen verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten.



**Abbildung 13: Visualisierung des Kalibrierergebnisses für einen Beschleunigungsaufnehmer; Übertragungskoeffizienten und Messunsicherheiten**



**Abbildung 14: Visualisierung des Kalibrierergebnisses für einen Beschleunigungsaufnehmer; Abweichungsspanne**



**Abbildung 15: Visualisierung des Kalibrierergebnisses für einen Beschleunigungsaufnehmer; messwertbezogene Darstellung**

## 7 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 geeigneten (langzeitstabilen) Normals

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	28 / 35

## 8 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 und relative Luftfeuchte eingehalten?
- Ist eine sinnvolle Konstruktion, Oberflächengüte und Materialwahl der Adaptionen gegeben?
- Liegen die Resonanzfrequenzen des Aufbaus hinreichend 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. Quereschleunigungsempfindlichkeit des Kalibriergegenstandes in die Richtung der max. Quereschleunigung 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. Quereschleunigungseinflüsse.)
- 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?

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	29 / 35

## 9 Messunsicherheit

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

### 9.1 Modellgleichung

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

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

Dabei sind folgende Größen des Messprozesses zu betrachten:

Ergebnisgröße:

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

Eingangsgrößen:

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

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

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

Einflussgrößen:

$$X_4 = K_{I,S_S} \quad \text{Korrektionsfaktor Zeitliche Instabilität des BA-Normalis}$$

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

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

$$X_7 = K_{TK} \quad \text{Korrektionsfaktor Temperatur}$$

$$X_8 = K_T \quad \text{Korrektionsfaktor Querbewegung}$$

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

$$X_{10} = K_{Pos} \quad \text{Korrektionsfaktor Position}$$

$$X_{11} = K_L \quad \text{Korrektionsfaktor Nichtlinearität/Linearitätsabweichung}$$

$$X_{12} = K_f \quad \text{Korrektionsfaktor Frequenzgang}$$

$$X_{13} = K_{Max} \quad \text{Korrektionsfaktor Stoßspitzenwert}$$

$$X_{14} = K_{Res} \quad \text{Korrektionsfaktor Residuale Größen}$$

<sup>6</sup> Ergebnisgröße

<sup>7</sup>  $N'$  Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ergebnisgröße  $N' < N$

<sup>8</sup>  $N$  Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit  $N' < N$

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	30 / 35

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

## 9.2 *Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz*

### 9.2.1 *Spezifikation von BNME, BA-Normal und Kalibriergegenstand*

Die Ermittlung der Messunsicherheit wird an folgenden konkreten Komponenten beispielhaft vorgenommen. Um die kleinste angebbare Messunsicherheit von Kalibriereinrichtungen zu demonstrieren, wird ein nach dem gegenwärtigen Stand der Technik "bester" Kalibriergegenstand ausgewählt. Alternativ können BA-Normale vergleichbarer Qualität anderer Hersteller eingesetzt werden.

*Kalibriereinrichtung:*

Stoßpendel-Kalibrator

*Normal:*

ENDEVCO Typ 2270

*bester (nahezu idealer) Kalibriergegenstand; hier:*

Brüel & Kjær Typ 8305<sup>9</sup>

### 9.2.2 *Messunsicherheitsbilanz – Beispielwerte*

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

Die in diesem Beispiel in Tabelle 2 verwendeten Zahlenwerte sind nicht allgemeingültig und müssen in den allermeisten Fällen für die jeweilige Bezugs-Normal-Messeinrichtung und ggf. auf für einzelne Arbeitspunkte der Einrichtung individuell bestimmt werden.

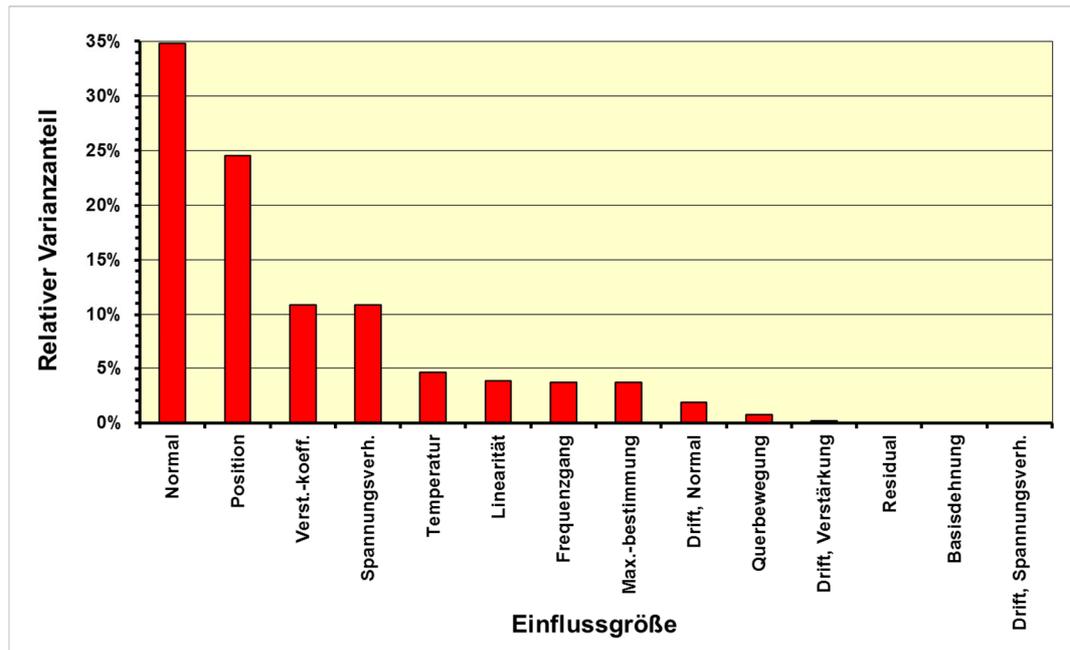
<sup>9</sup> Als Ersatz für den bestmöglichen Gegenstand – Brüel & Kjær Typ 8305WH2335 single-ended – wurde der back-to-back-Typ mit Montage an der Basis verwendet.

**Tabelle 2: Messunsicherheitsbilanz, kleinste angebbare Messunsicherheit (Calibration and Measurement Capability, CMC), BA BRÜEL & KJÆR Typ 8305,  $a_{z,S}=900$  m/s<sup>2</sup>**

lfd. Nr.	Größe	Schätzwert	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz
	$X_i$	$x_i$	$w(x_i)$	$c_i$	$w_i(y)$	$w^2_i(y)$
1	$S_S$	0,227 pC/(m/s <sup>2</sup> )	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	$K_{L,SS}$	1	5,8E-04	1	5,8E-04	3,3E-07
5	$K_{L,G}$	1	2,0E-04	1	2,0E-04	4,0E-08
6	$K_{L,R}$	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 <sup>2</sup> )	$w(S_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$		4,2E-03	1,8E-05
	$S_X$	0,124 pC/(m/s <sup>2</sup> )	$W(S_X) = k * w(S_X)$ $k = 2$		8,5E-03	
<b>Angabe des vollständigen Messergebnisses:</b>			$S_X =$ <b>0,124 pC/(m/s<sup>2</sup>)</b> $\pm$ <b>0,85%</b>			

### 9.2.3 Analyse der Messunsicherheitsbilanz

Im Sinne einer Optimierung des Kalibrierprozesses, der Bezugs-Normal-Messeinrichtung oder der Rückführungskette ist eine Analyse der Messunsicherheitsbilanz nach der Größe der Einflüsse sinnvoll. In Abbildung 16 sind die im Beispiel verwendeten Komponenten exemplarisch in Form eines Säulendiagrammes aufgetragen. Anhand der Darstellung wird schnell klar, dass sich nur bei wenigen Einflussgrößen aus einer Verringerung der Komponente auch eine signifikante Reduzierung der kombinierten Messunsicherheit ergibt.



**Abbildung 16: Varianzanteile der einzelnen Einflussgrößen an der Gesamt-Messunsicherheit**

### 9.3 Abweichungsspanne $W'$

Die relative Abweichungsspanne (vergl. Abschnitt 6)  $W'$  setzt sich additiv aus der relativen erweiterten Messunsicherheit  $W$  ( $k=2$ ) und dem Betrag der (systematischen) Messabweichung  $|\Delta\alpha|$  zusammen. Aufgrund des systematischen Anteils wird der Abweichungsspanne als Verteilungsform die Rechteckverteilung zugewiesen.

$$W' = W + |\Delta\alpha| \tag{6}$$

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	33 / 35

## 10 Angaben im Kalibrierschein

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

- Verwendete Hilfsmessgeräte mit Einstellungen
- Ggf. 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 Kenngrößen, z. B. Nullsignal,
- Kenngrößen und Charakteristik von Filtern
- Impulszeiten  $t_{1,10\%}$  bei dem kleinsten und dem größten Impulsspitzenwert
- Ggf. Temperatur des Kalibriergegenstandes während der Kalibrierung (wenn sie gemessen wurde) oder deren Abschätzung
- Tabellarische Übersicht der diskreten Übertragungskoeffizienten und Messunsicherheiten
- Ggf. Einwertangabe mit Gültigkeitsbereich, Spezifikationsgrenze und Auswertungsalgorithmus nach Abschnitt 6.

Des Weiteren wird empfohlen, die Kalibrierergebnisse zu visualisieren.

## 11 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
- Kenngrößen 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

	Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung <a href="https://doi.org/10.7795/550.20190502B">https://doi.org/10.7795/550.20190502B</a>	DKD-R 3-1 Blatt 2	
		Ausgabe:	04/2019
		Revision:	0
		Seite:	34 / 35

## 12 Literatur

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

- [1] **ISO 16063-13:2001:** *Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 13: Primary shock calibration using laser interferometry*  
ISO, Geneva, CH
- [2] **ISO 16063-22:2005:** *Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer*, ISO, Geneva, CH
- [3] **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/>
- [4] **Bruns, Th., et al.:** **Calibration of Accelerometers using Parameter Identification— Targeting a versatile new Standard**, Proc. XIX IMEKO World Congress, Lissabon, Portugal, 2009, <http://www.imeko.org/publications/wc-2009/IMEKO-WC-2009-TC22-118.pdf>
- [5] **Dubbel:** Taschenbuch für den Maschinenbau; Hrsg.: W. Beitz und K.-H. Grothe, Springer-Verlag, 20. Auflage, 2001, ISBN 3-540-67777-1



Herausgeber:

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

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