

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



---


## Vergleichsbericht    DKD-Ringvergleich 2019 DKD-V 3-3            „Beschleunigung-digital“

---

Ausgabe 06/2021

<https://doi.org/10.7795/550.20210621>



	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	2 / 24

## 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: 0531 592-8021

Internet: [www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	3 / 24

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Vergleichsbericht DKD-V 3-3 DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“, Ausgabe 06/2021, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20210621*

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:

Dipl.-Ing. (FH) Denis Nordmann, Arbeitsgruppe 1.71 „Darstellung Beschleunigung“  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Dr. Thomas Bruns, Arbeitsgruppe 1.71 „Darstellung Beschleunigung“  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Pilotlabor: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

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.


	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	4 / 24

## Vorwort

DKD-Vergleichsberichte verfolgen das Ziel, die Ergebnisse von Vergleichsmessungen offenzulegen, die im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes organisiert, durchgeführt bzw. ausgewertet wurden. Sie enthalten Informationen über die Leistung der teilnehmenden Kalibrierlaboratorien für bestimmte Messungen und deren Vergleichbarkeit. In DKD-Vergleichsberichten wird nicht notwendigerweise in allen Details die Sichtweise des Vorstands oder der Fachausschüsse des DKD wiedergegeben.


Die DKD-Vergleichsberichte sollen die im Vergleich untersuchten Aspekte und Ergebnisse der Kalibrierung darstellen und durch die Publikation im Rahmen des DKD der großen Gemeinschaft der Kalibrierlaboratorien national und international zugänglich machen.

Experten- und Vergleichsberichte müssen nicht vom Vorstand genehmigt werden (Beschluss auf der 5. DKD-Vorstandssitzung), sondern nur vom jeweiligen Fachausschuss und der Geschäftsstelle.

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	5 / 24

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabe und Zweck des Ringvergleichs.....	6
2	Aufbau des Berichts .....	6
3	Transfornormal, Anregung und Messbereiche.....	7
3.1	Transfornormal.....	7
3.2	Anregung und Messbereiche.....	8
3.2.1	Stoßförmige Anregung .....	8
3.2.2	Sinusförmige Anregung.....	8
4	Teilnehmer und Zeitplan.....	9
5	Auswertung der Messergebnisse .....	10
5.1	Auswertemethodik.....	10
5.2	Ermittlung des DiMod-Referenzwerts, Berechnung der $E_n$ -Werte .....	11
5.2.1	Bewertung der Ergebnisse .....	12
6	Ergebnisse des Ringvergleichs .....	13
7	Zusammenfassung.....	18
8	Literaturverzeichnis .....	19
	Anhang A – Technisches Protokoll.....	20
	Anhang B – Teilnehmerergebnisse (nicht Teil des öffentlichen Berichts).....	23

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	6 / 24

**Pilotlabor:** **Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)**

Kontaktpersonen: Dr. Thomas Bruns und Dipl.-Ing. (FH) Denis Nordmann  
Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Fachbereich 1.7 „Akustik und Dynamik“  
Arbeitsgruppe 1.71 „Darstellung Beschleunigung“  
Bundesallee 100  
D-38116 Braunschweig  
Telefon: +49 531 592-1700 und -1226  
Fax: +49 531 592 69-1700 und -1226  
E-Mail: [thomas.bruns@ptb.de](mailto:thomas.bruns@ptb.de), [denis.nordmann@ptb.de](mailto:denis.nordmann@ptb.de)

## 1 Aufgabe und Zweck des Ringvergleichs

Die Norm DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [4] fordert in Kapitel 7.7 – Sicherung der Validität von Ergebnissen, dass Laboratorien Qualitätslenkungsverfahren planen, einführen und anwenden müssen, um die Ergebnisse der von ihnen durchgeführten Prüfungen oder Kalibrierungen abzusichern. Unter anderem ist dabei die Teilnahme an Eignungsprüfungsprogrammen und anderen Vergleichsprogrammen vorgesehen.

Ziel des DKD-Ringvergleichs 2019 „Beschleunigung-digital“ ist es, die in den teilnehmenden Laboratorien angewandten Kalibrierverfahren zu vergleichen und die Übereinstimmung mit den Anforderungen an Kalibrierlaboratorien für die physikalische Größe der Beschleunigung (analog und digital) nachzuweisen bzw. Abweichungen festzustellen und gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen einzuleiten.

## 2 Aufbau des Berichts

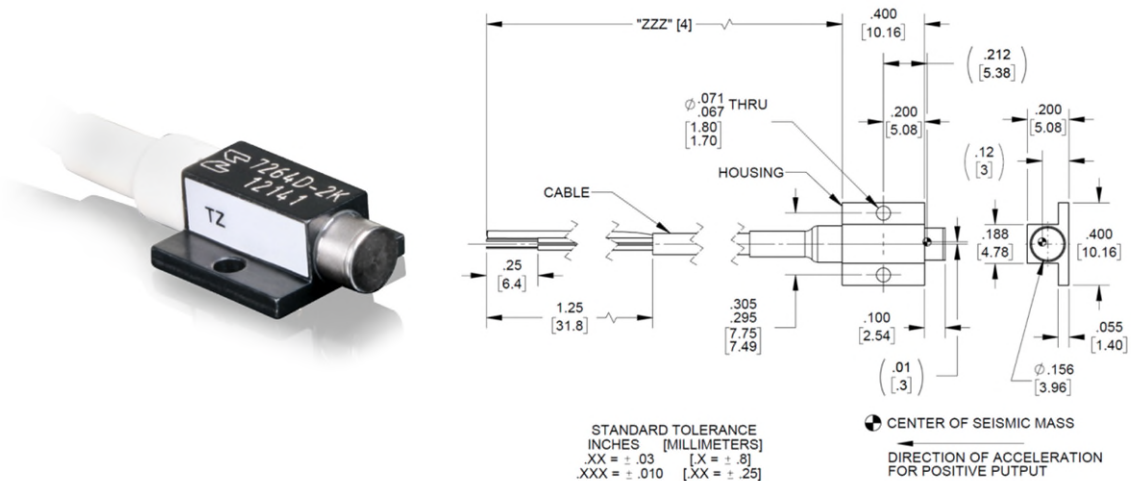
Im Nachfolgenden sind die Details des Ringvergleichs beschrieben. Dies umfasst die Messaufgabe, Prüflinge und Umgebungsbedingungen. Anschließend sind die Teilnehmer mit dem Ablaufplan genannt. Nach einer Beschreibung der Auswertung folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Den Abschluss des Gesamtberichts bildet Anhang A mit dem technischen Protokoll. Ein Anhang B, der die individuellen Ergebnisse des jeweiligen Teilnehmers enthält, ist nur im jeweiligen, nicht öffentlichen Teilnehmerbericht enthalten.

### 3 Transfernnormal, Anregung und Messbereiche

#### 3.1 Transfernnormal

Als Transfernnormal wird ein Beschleunigungsaufnehmer des Herstellers Endevco, Typ: 7264D-2K, S/N: 14596 verwendet. Es handelt sich dabei um einen piezoresistiven MEMS- Beschleunigungsaufnehmer, der u. a. im Bereich der Stoß- und Crashtests eingesetzt wird.




**Abbildung 1: Foto eines Endevco 7264D-2K-Aufnehmers mit Angaben zu geometrischen Abmessungen [1].**

Laut Herstellerdatenblatt [1] gelten folgende Angaben (Auswahl):

**Tabelle 1: Herstellerangaben zum Transfernnormal.**

Messgröße/Eigenschaft	Typischer Wert
Messbereich	± 19620 m/s <sup>2</sup>
Übertragungskoeffizient (bei 100 Hz, 98,1 m/s <sup>2</sup> und 10 V Gleichspannung)	0,0204 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Frequenzbereich (± 5%)	DC bis 6 kHz
Resonanzfrequenz (montiert)	> 40 kHz
Querempfindlichkeit	max. 3%
Speisespannung/Spannungsversorgung (Gleichspannung)	2 V, 5 V und 10 V
Eingangswiderstand	530 Ω bis 900 Ω
Ausgangswiderstand	530 Ω bis 1800 Ω
Max. Anzugsdrehmoment	0,3 N·m
Masse des Aufnehmers	1,4 g (Kabel: 9 g/m)

Das Transfernnormal ist mit einem 15-poligen D-Sub-Stecker ausgestattet. Über einen Adapter kann der Sensor an einen Analog-Signalkonditionierer adaptiert werden. Alternativ ist der direkte Anschluss an eine geeignete Kalibriereinrichtung möglich.

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	8 / 24

Für digitale Messungen stehen drei Digitalmodule (DiMod) zur Verfügung. Diese werden an den analog arbeitenden Sensor angeschlossen und sind für drei Messbereiche (2000 m/s<sup>2</sup>, 10000 m/s<sup>2</sup> und 20000 m/s<sup>2</sup>) bestimmt.

Das TransfERNormal wurde freundlicherweise allen Teilnehmern des Ringvergleichs von Fa. SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden zur Verfügung gestellt.

### 3.2 Anregung und Messbereiche

Im Rahmen des DKD-Ringvergleichs 2019 „Beschleunigung-digital“ werden Kalibrierungen des unter Abschnitt 2.1 beschriebenen TransfERNormals mit stoßförmiger und sinusförmiger Anregung jeweils im Analog- und Digitalbetrieb (DiMod) durchgeführt. Der digitale Teil der Kalibrierung soll nach Möglichkeit alle drei DiMod-Messbereiche erfassen (2000 m/s<sup>2</sup>, 10000 m/s<sup>2</sup> und 20000 m/s<sup>2</sup>). Daraus resultieren bis zu 8 Kalibrierungen.

Die Teilnehmer führen die Kalibrierungen gemäß den zum Zeitpunkt des Ringvergleichs gültigen Kalibrierrichtlinien (z. B. DKD-R 3-1 Blatt 2 und Blatt 3) durch. Der Umfang der Teilnahme ist den Kalibrierlaboren freigestellt, jedoch sollten die Messungen nach Möglichkeit den Akkreditierungsumfang des Labors berücksichtigen. Messergebnisse außerhalb des Akkreditierungsumfangs können ebenfalls eingereicht werden.

#### 3.2.1 Stoßförmige Anregung

Für die Stoßanregung werden folgende Messbereiche vorgeschlagen:

- Stoß-Spitzenwerte (analog und digital): 100 m/s<sup>2</sup>, 500 m/s<sup>2</sup>, 1000 m/s<sup>2</sup>, 1500 m/s<sup>2</sup> und 2000 m/s<sup>2</sup>

Als Messergebnisse werden für jede Kalibrierung folgende Größen angegeben:

- Spitzenwert der Beschleunigung in m/s<sup>2</sup>
- Stoßdauer  $t_{i,10\%}$  in ms
- Stoß-Übertragungskoeffizient
  - angegeben entweder in (mV/V)/(m/s<sup>2</sup>) für analoge Kalibrierung bzw. in mV/(m/s<sup>2</sup>) unter Angabe der Speisespannung
  - oder als Angabe in LSB/(m/s<sup>2</sup>) für Kalibrierungen mittels DiMod (LSB = Least Significant Bit, das niedrigstwertige Bit)
- Relative Standardabweichung aus  $N$  Werten (z. B.  $N = 15$ )
- Relative erweiterte Messunsicherheit  $U$  ( $k = 2$ )

#### 3.2.2 Sinusförmige Anregung


Für die Sinusanregung werden folgende Messbereiche vorgeschlagen:

- Frequenzbereich von 10 Hz bis 5 kHz, Terzreihe gemäß ISO 266
- Beschleunigungsamplituden im Bereich bis 100 m/s<sup>2</sup>

Als Messergebnisse werden für jede Kalibrierung folgende Größen angegeben:

- Frequenz in Hz
- Beschleunigungsamplitude in m/s<sup>2</sup>
- Betrag des komplexen Übertragungskoeffizienten unter Angabe der erweiterten relativen Messunsicherheit  $U$  ( $k = 2$ )
  - in (mV/V)/(m/s<sup>2</sup>) oder in mV/(m/s<sup>2</sup>) unter Angabe der Speisespannung
  - in LSB/(m/s<sup>2</sup>) für Kalibrierungen mittels DiMod
- Phasenverschiebung des komplexen Übertragungskoeffizienten unter Angabe der erweiterten Messunsicherheit  $U$  ( $k = 2$ ), sofern zutreffend



	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	9 / 24

#### 4 Teilnehmer und Zeitplan

Die Teilnehmer sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

**Tabelle 2: Teilnehmerliste zum DKD-Ringvergleich 2019 "Beschleunigung-digital".**

Firma	Ansprechpartner und Kontaktdaten
SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH	Philipp Begoff; Heidelberger Str. 12, 01189 Dresden Tel. 0351-40024-728; <a href="mailto:Philipp.Begoff@spektra-dresden.de">Philipp.Begoff@spektra-dresden.de</a>
Volkswagen AG	Dr. Heiko Müller; EGEM/K, Brieffach 011/17820, 38436 Wolfsburg Tel.: 05361-9-30900; <a href="mailto:Heiko.Mueller@volkswagen.de">Heiko.Mueller@volkswagen.de</a>
mg-sensor GmbH	Dr. Andreas Marroquin; Airport Boulevard B 210, 77836 Rheinfelden, Tel.: 07229-69969-0; <a href="mailto:andreas.marroquin@mg-sensor.de">andreas.marroquin@mg-sensor.de</a>
Porsche AG	Thomas Weiß, EEX5, Porschestraße, 71287 Weissach Tel.: 0711-911-83334; <a href="mailto:thomas.weiss@porsche.de">thomas.weiss@porsche.de</a>
Kistler Instrumente GmbH	Robert Bausch; TC, Umberto-Nobile-Str. 14, 71063 Sindelfingen Tel.: 07031-3090-146; <a href="mailto:robert.bausch@kistler.com">robert.bausch@kistler.com</a>
Ford Werke GmbH	Peter Hüskes; MK-1/L11, Spessartstr., 50769 Köln Tel.: 0221/903-7628; <a href="mailto:phueskes@ford.com">phueskes@ford.com</a>
Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)	Stefan Clausnitzer; Abteilung Fahrzeugtechnik, Referat F2; Brüderstraße 53, 51427 Bergisch Gladbach; Tel.: 02204 43-5204; <a href="mailto:Clausnitzer@bast.de">Clausnitzer@bast.de</a>
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Pilotlabor)	Dr. Thomas Bruns; Fachbereich 1.7, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig; Tel.: 0531-592-1700; <a href="mailto:thomas.bruns@ptb.de">thomas.bruns@ptb.de</a>

Der Ringvergleich erfolgt kreisförmig über die Fa. SPEKTRA. Die Kalibrierung des TransfERNormals (Sinus- und Stoßanregung, analog) sowie die Auswertung der Ergebnisse und Berichterstellung erfolgt durch die PTB.

**Tabelle 3: Zeitplan und durchgeführte Kalibrierungen.**

Teilnehmer	Messung (Kalenderwoche)	Sinus					Stoß			
		Analog		Digital			Analog		Digital	
		Betrag	Phase	DiMod1	DiMod2	DiMod3	Betrag	DiMod1	DiMod2	DiMod3
SPEKTRA	41/2019	x	x	x	x	x	x	x	x	x
mg-sensor	43/2019	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Volkswagen	45/2019	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ford	47/2019	x	-	x	-	-	x	x	-	-
Porsche	49/2019	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kistler (SIF) <sup>1</sup>	51/2019	x	-	-	-	-	x	x	x	x
Kistler (HD) <sup>2</sup>		x	-	x	x	x	x	x	x	x
BAST	02/2020	x	-	-	-	-	x	x	x	x
SPEKTRA	04/2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PTB	24/2020	x	x	-	-	-	x	-	-	-

<sup>1</sup> SIF: Standort Sindelfingen

<sup>2</sup> HD: Standort Heidelberg

## 5 Auswertung der Messergebnisse

Die Messergebnisse werden von den Teilnehmern in eine Tabellenkalkulationsvorlage (*Messergebnisse\_DKD-Ringvergleich\_TEILNEHMER\_DATUM.xlsx*) eingetragen, welche durch das Pilotlabor erstellt und dem Kalibrierlabor zur Verfügung gestellt wurde. Nach Beendigung der Messungen werden dem Pilotlabor die Kalibrierergebnisse sowie Kalibrierscheine elektronisch per E-Mail zugesandt.

### 5.1 Auswertemethodik

Die Auswertung des Ringvergleichs erfolgt mithilfe eines vom Pilotlabor geschriebenen Verarbeitungsalgorithmus, der in der Programmiersprache *Python 3* geschrieben worden ist. Prinzipiell ist die Auswertung dieses Ringvergleichs von einer Programmiersprache unabhängig, d. h. eine Validierung und Verifizierung der Berechnungen kann mithilfe einer Standard-Tabellenkalkulationssoftware oder mit einem Taschenrechner durchgeführt werden.

Im Algorithmus sind folgende Berechnungen implementiert: Berechnung von Referenzwerten für digitale Sensoren, Berechnung von  $E_n$ -Werten, die Bewertung der Ergebnisse (OK/NOK), die grafische Darstellung der Ergebnisse sowie die Erzeugung von Statistiken zum DKD-Ringvergleich 2019.

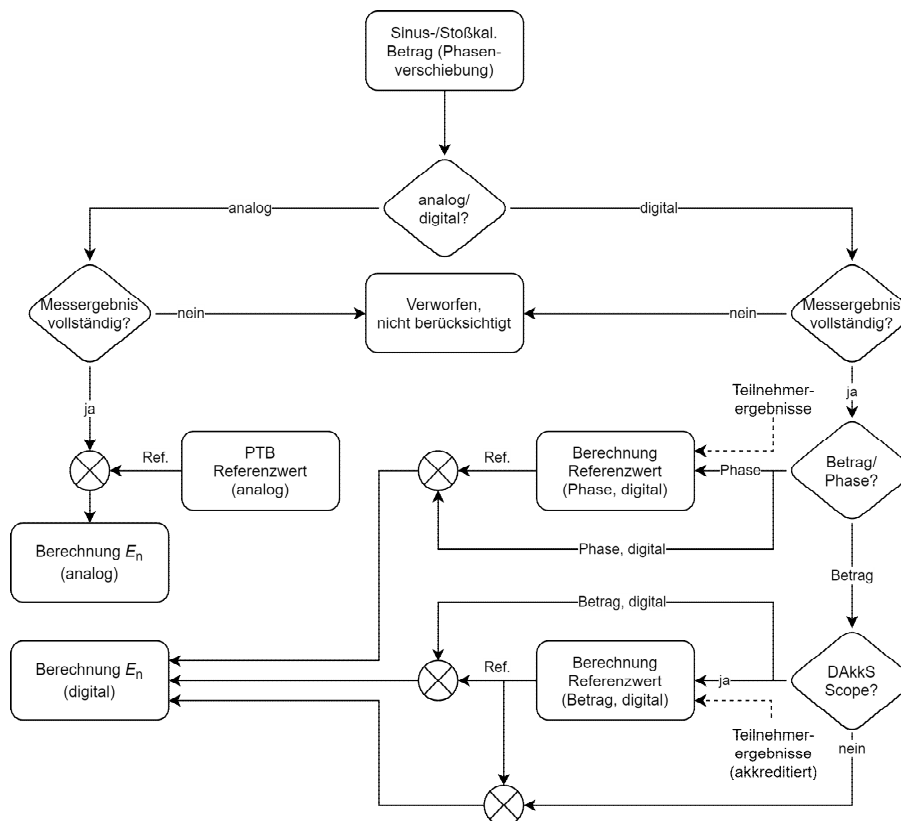



Abbildung 2: Flussdiagramm zur Messdatenverarbeitung.

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	11 / 24

Bevor die Messergebnisse zur Datenverarbeitung verwendet werden können, werden diese auf ihre Integrität überprüft (z. B. auf eine einheitliche Datenstruktur, offensichtliche Fehler etc.). Sobald die Daten für die Verarbeitung mit *Python* vorbereitet sind, werden die Messergebnisse durch den Algorithmus eingelesen und in einen „analogen“ und „digitalen“ Verarbeitungszweig unterteilt (vgl. Abbildung 2).

Die Messergebnisse im „analogen“ Verarbeitungszweig werden auf ihre Vollständigkeit (d. h. Angabe eines Messergebnisses mit Messunsicherheit) und Scope des Ringvergleichs geprüft. Unvollständige Messergebnisse oder Messergebnisse außerhalb des Scopes werden gegebenenfalls verworfen. Anhand der nun vorliegenden Messergebnisse und eines bereitgestellten Referenzwerts für Sinus- und Stoßkalibrierung können die  $E_n$ -Werte gemäß [3] berechnet werden.

Für Sinus- und Stoßkalibrierungen des TransfERNORMALS im analogen Betrieb werden die Referenzwerte durch die PTB bereitgestellt. Das TransfERNORMAL wurde auf den Normalmesseinrichtungen der PTB (nationale Normale) gemäß ISO 16063-11:1999 und ISO 16063-13:2001 primär kalibriert.

Im „digitalen“ bzw. DiMod-Verarbeitungszweig werden die Messergebnisse auf ihre Vollständigkeit geprüft und ggf. verworfen. Anschließend erfolgt eine Trennung der Messergebnisse nach Betrag und Phasenverschiebung, damit die benötigten Referenzwerte bestimmt werden können.

Die Berechnung der DiMod-Referenzwerte (Betrag und Phasenverschiebung) erfolgt mithilfe der Teilnehmerergebnisse und der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Gleichungen. In die Berechnung des Referenzwerts für den Betrag des Übertragungskoeffizienten fließen nur jene Messergebnisse ein, die dem DAkkS-Akkreditierungsumfang des am Ringvergleich teilnehmenden Kalibrierlaboratoriums entsprechen. Damit soll sichergestellt werden, dass der Referenzwert durch akkreditierte Teilnehmer bereitgestellt wird. Der Betrags-Referenzwert für digitale Sensoren (DiMod) wird anschließend für die Berechnung der  $E_n$ -Werte aller Teilnehmer herangezogen.

Der Referenzwert der Phasenverschiebung wird anhand aller Teilnehmermessergebnisse berechnet. Hier wird davon ausgegangen, dass es zum Zeitpunkt der Durchführung des Ringvergleichs keine akkreditierten Kalibrierlaboratorien für die Messgröße der Phasenverschiebung von digitalen Sensoren gab und somit alle Messergebnisse gleichberechtigt sind. Anhand des Referenzwerts für die Phasenverschiebung (DiMod) und der Teilnehmermesswerte werden die  $E_n$ -Werte berechnet.

## 5.2 Ermittlung des DiMod-Referenzwerts, Berechnung der $E_n$ -Werte

Für Sinus- und Stoßkalibrierungen des TransfERNORMALS im digitalen Betrieb (DiMod) wurde der Referenzwert als gewichteter Mittelwert gemäß Gleichungen (1) und (2) ermittelt. Für dessen Berechnung wurden die Messergebnisse der Teilnehmer des Ringvergleichs herangezogen.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad \text{mit} \quad g_i = \frac{1}{u_i^2} \quad (1)$$

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i}} \quad (2)$$

Symbol	Bedeutung
$\bar{x}$	Gewichteter Mittelwert, berechneter Referenzwert
$u$	Standardmessunsicherheit des gewichteten Mittelwerts bzw. Referenzwerts
$i$	Laufindex, Beitrag des $i$ -ten Teilnehmers
$n$	Gesamtanzahl der Beiträge zum gewichteten Mittelwert
$g_i$	Gewichtungsfaktor, berechnet aus $u_i$
$x_i$	Messwert des Teilnehmers $i$
$u_i$	Standardmessunsicherheit des Teilnehmers $i$

Die Berechnung der  $E_n$ -Werte für den Betrag und die Phasenverschiebung des Übertragungskoeffizienten erfolgte mittels Gleichungen (3) und (4):

$$E_n = \frac{|S_{\text{Lab}} - S_{\text{Ref}}|}{\sqrt{U_{\text{Lab}}^2 \cdot S_{\text{Lab}}^2 \pm U_{\text{Ref}}^2 \cdot S_{\text{Ref}}^2}} \quad (3)$$

$$E_n = \frac{|\varphi_{\text{Lab}} - \varphi_{\text{Ref}}|}{\sqrt{U_{\varphi, \text{Lab}}^2 \pm U_{\varphi, \text{Ref}}^2}} \quad (4)$$

Symbol	Bedeutung
$S_{\text{Lab}}, S_{\text{Ref}}$	Übertragungskoeffizient des Labors Lab und des Referenzwerts Ref
$U_{\text{Lab}}, U_{\text{Ref}}$	Erweiterte relative Messunsicherheit des Betrags des Übertragungskoeffizienten
$\varphi_{\text{Lab}}, \varphi_{\text{Ref}}$	Phasenverschiebung des Übertragungskoeffizienten
$U_{\varphi, \text{Lab}}, U_{\varphi, \text{Ref}}$	Erweiterte Messunsicherheit der Phasenverschiebung

Hinweise: Die Bestimmung von  $S_{\text{Ref}}$  (DiMod) erfolgte gemäß Gleichungen (1) und (2). Das Plusminuszeichen im Wurzelterm in den Gleichungen (3) und (4) ist positiv, wenn  $S_{\text{Lab}}$  und  $S_{\text{Ref}}$  unabhängig sind [2, 3]. Im Falle der Berechnung eines Referenzwerts aus Teilnehmerwerten, d. h. wenn  $S_{\text{Lab}}$  und  $S_{\text{Ref}}$  abhängig sind, wird das Plusminuszeichen negativ [2].

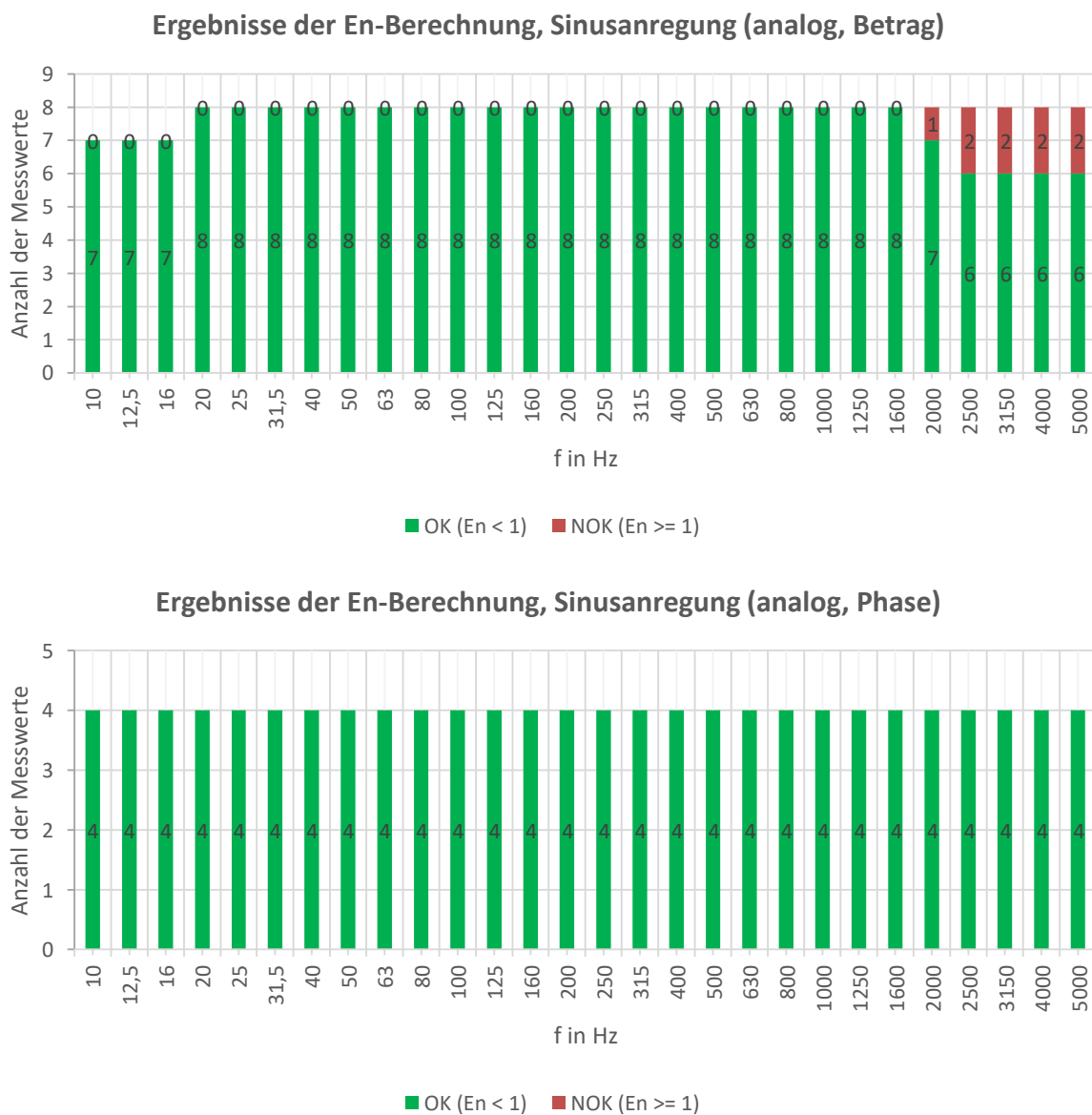
### 5.2.1 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zur Berechnung der  $E_n$ -Werte werden wie folgt bewertet:

- $E_n < 1$ : Das Ergebnis ist gut bzw. zufriedenstellend (OK)
- $E_n \geq 1$ : Das Ergebnis ist nicht gut bzw. nicht zufriedenstellend (nicht OK, kurz: NOK)

## 6 Ergebnisse des Ringvergleichs

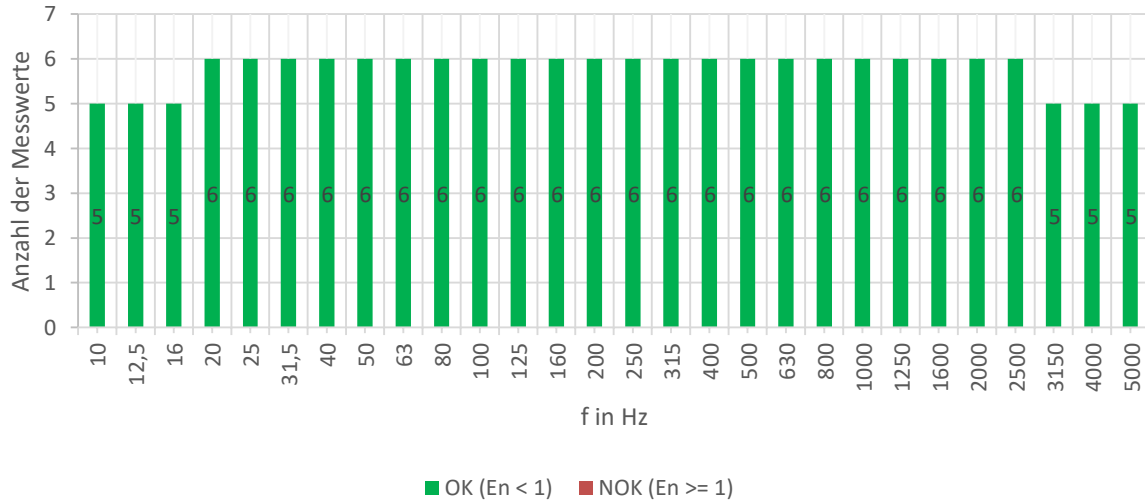
Die Ergebnisse des Ringvergleichs sind im Nachfolgenden als anonymisierte kumulierte Bewertungen über den gemessenen Frequenz- bzw. Stoßintensitätsbereich dargestellt.



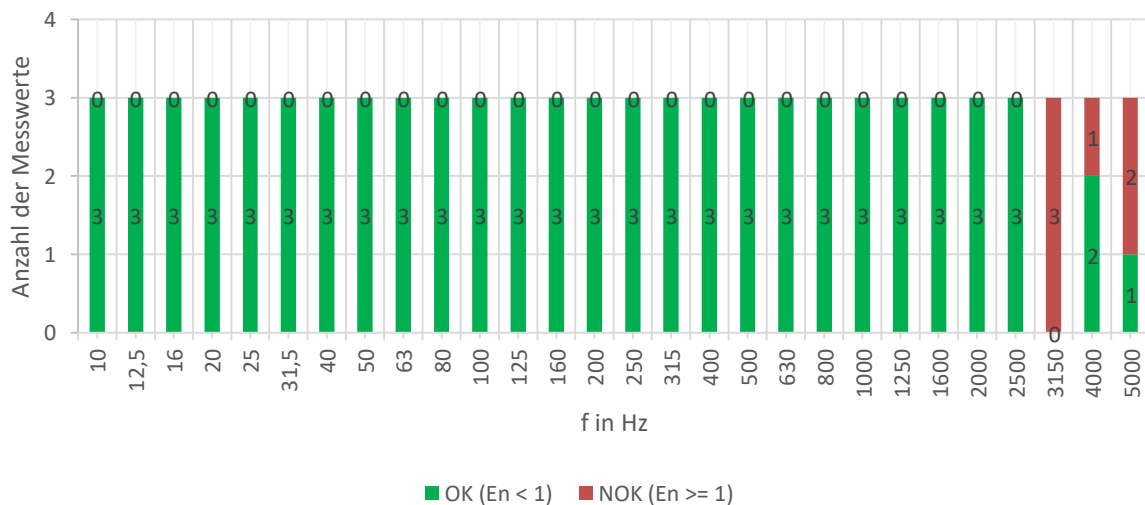
**Abbildung 3: Ergebnisse der analogen Kalibrierung (Betrag und Phasenverschiebung) mit Sinusanregung.**

Die Kalibrierung des TransfERNORMALS im Analogbetrieb (Betrag und Phasenverschiebung) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Teilnehmerwerten und der Referenz. Bei zwei Teilnehmern konnte bei der Betragskalibrierung im Frequenzbereich von etwa 2 kHz bis 4 kHz eine systematische Abweichung des Frequenzgangs des Übertragungskoeffizienten (Betrag) beobachtet werden. Die relative Abweichung zum Referenzwert betrug bis zu 6%.

### Ergebnisse der En-Berechnung, Sinusanregung (DiMod1, Betrag)



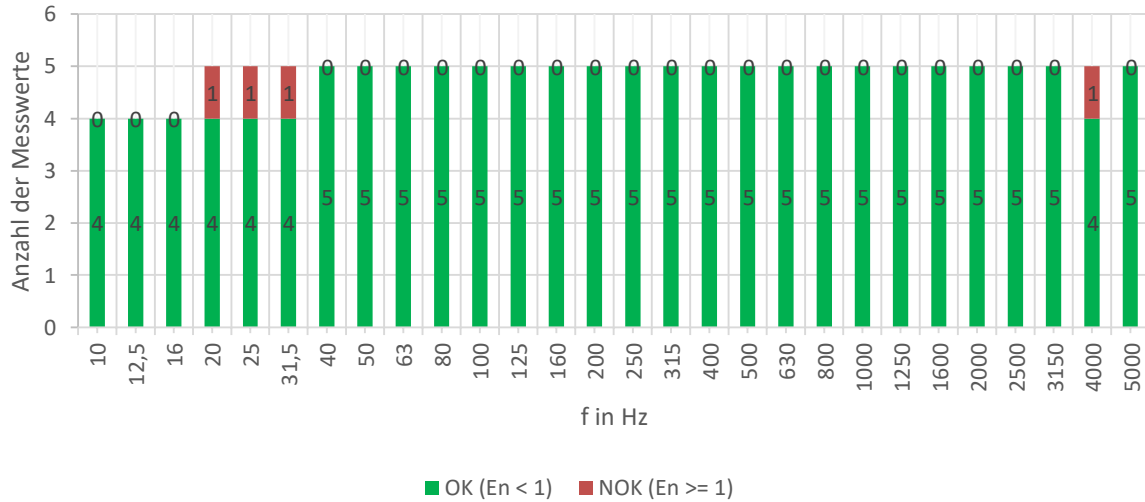
### Ergebnisse der En-Berechnung, Sinusanregung (DiMod1, Phase)



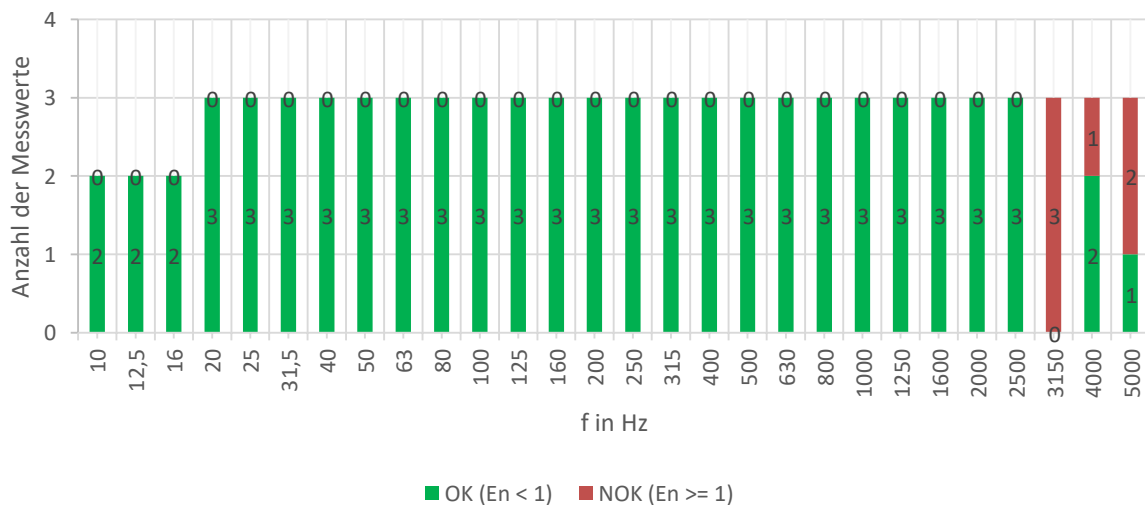
**Abbildung 4: Ergebnisse der DiMod1-Kalibrierung.**

Die Ergebnisse der DiMod1-Kalibrierung zeigen eine hervorragende Übereinstimmung der Teilnehmerwerte mit dem Referenzwert. Bei der Betragskalibrierung sind 100 % der Ergebnisse OK. Bei der Bestimmung der Phasenverschiebung tritt im Bereich von 3,15 kHz bis 5 kHz ein Phasensprung von 360° auf. Da die Messdatengrundlage in diesem Bereich gering ist ( $N = 3$ ), konnte keine gute Übereinstimmung zwischen dem Referenzwert und den Teilnehmerwerten bestimmt werden. Diese Abweichungen konnten bei den anderen DiMod-Kalibrierungen ebenfalls beobachtet werden.

**Ergebnisse der En-Berechnung, Sinusanregung (DiMod2, Betrag)**



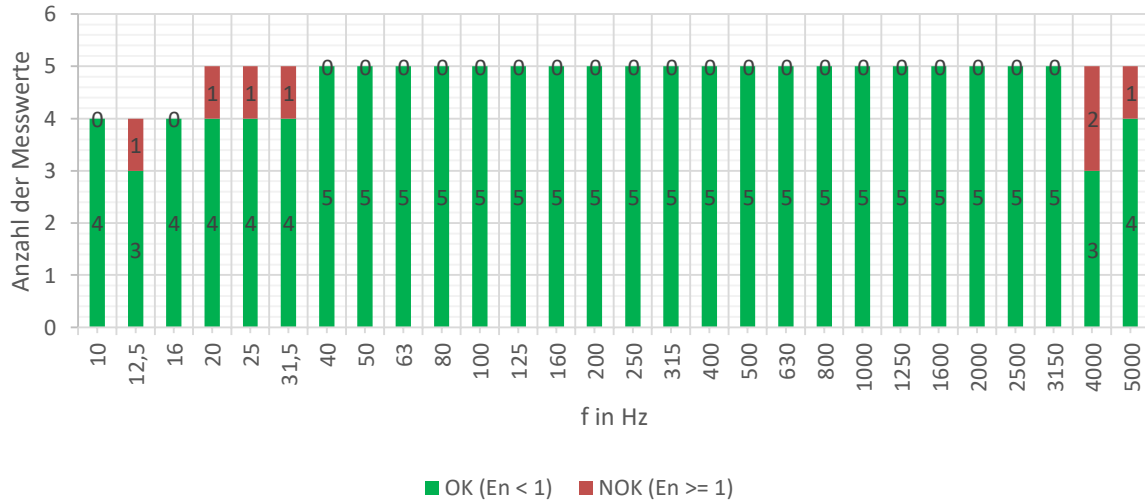
**Ergebnisse der En-Berechnung, Sinusanregung (DiMod2, Phase)**



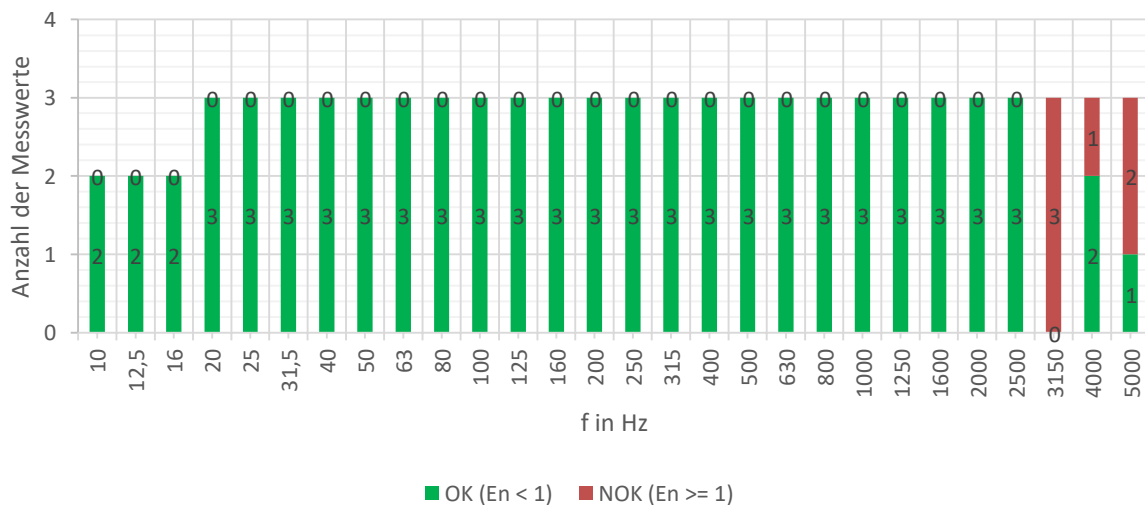
**Abbildung 5: Ergebnisse der DiMod2-Kalibrierung.**

Im Messbereich DiMod2 nimmt der Übertragungskoeffizient um Faktor 5 gegenüber dem Übertragungskoeffizienten der Messkette mit DiMod1 ab. Dieser beträgt nur noch etwa 3,1 LSB/(m/s<sup>2</sup>) gegenüber 15 LSB/(m/s<sup>2</sup>) bei DiMod1 (Frequenzbereich von 10 Hz bis 2 kHz). Bei niedrigen Frequenzen ( $f < 40$  Hz) können prinzipbedingt nicht beliebig hohe Beschleunigungsamplituden generiert werden – entsprechend gering ist das Signal-Rausch-Verhältnis. Dies ist möglicherweise eine Ursache für die erhöhte Anzahl von Abweichungen.

### Ergebnisse der En-Berechnung, Sinusanregung (DiMod3, Betrag)



### Ergebnisse der En-Berechnung, Sinusanregung (DiMod3, Phase)



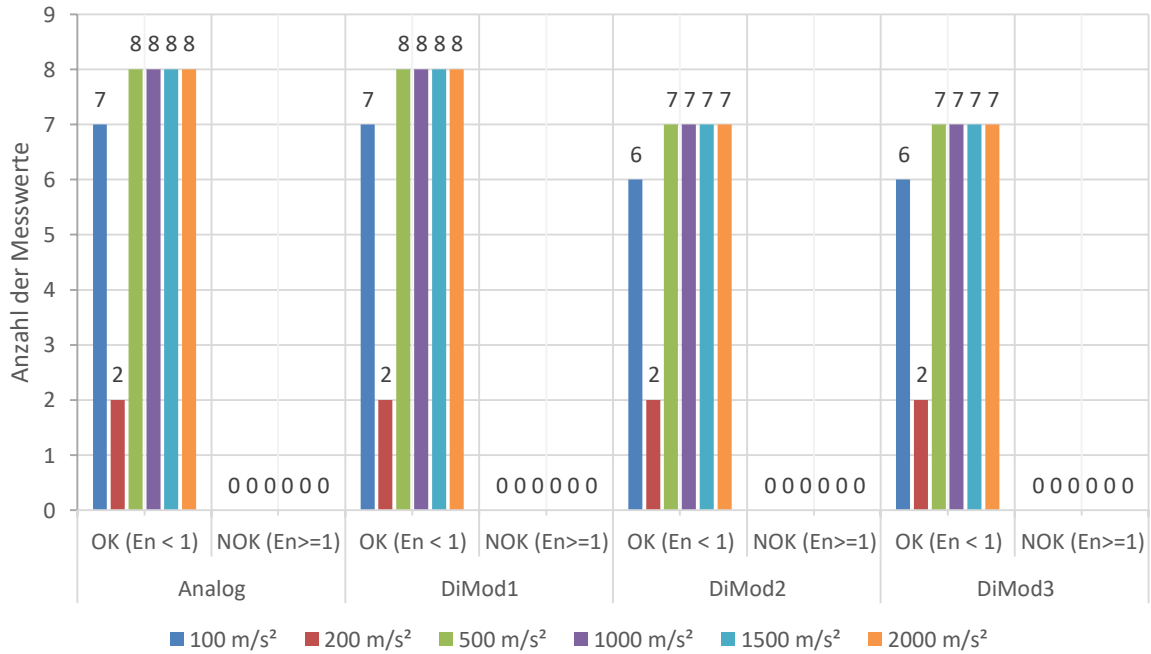
**Abbildung 6: Ergebnisse der DiMod3-Kalibrierung.**

Der DiMod3-Übertragungskoeffizient beträgt im Frequenzbereich von 10 Hz bis ca. 2 kHz etwa 1,5 LSB/(m/s<sup>2</sup>), bei 5 kHz fällt dieser auf 0,67 LSB/(m/s<sup>2</sup>) ab. Die Messungen bei Frequenzen unterhalb von 40 Hz bzw. oberhalb von 2,5 kHz finden mit einem ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis statt. Dies ist möglicherweise ein Grund für eine erhöhte Anzahl von Abweichungen.



Die Ergebnisse der Stoßkalibrierungen zeigen eine vollständige Übereinstimmung der Ergebnisse: 100 % der Messergebnisse waren OK. Hierbei gab es keine Auffälligkeiten, die Kalibrierungen wurden sowohl von den akkreditierten als auch von den nicht-akkreditierten Laboratorien erfolgreich durchgeführt.

**Ergebnisse der En-Berechnung, Stoßanregung (Betrag)**



**Abbildung 7: Ergebnisse der Stoßkalibrierung (analog und digital).**

## 7 Zusammenfassung

Der DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ konnte erfolgreich durchgeführt werden. Am Ringvergleich nahmen sieben Kalibrierlaboratorien teil – davon waren sechs im Bereich der Messgröße der Beschleunigung DAkKS-akkreditiert. Etwa 96,8 % der Teilnehmerergebnisse wurden mit OK und ca. 3,2 % der Ergebnisse mit NOK bewertet. Die Ergebnisse aller Teilnehmer sind in Abbildung 8 und Tabelle 4 zusammengefasst.

Eine Rückführung von digitalen Sensoren auf nationale Normale ist derzeit nicht möglich und aktueller Gegenstand der Forschung. Ein Vergleich unter den Kalibrierlaboratorien zeigt jedoch, dass digital arbeitende Messketten an bestehenden Kalibriereinrichtungen erfolgreich kalibriert werden können.

Ergebnisse aller Teilnehmer des DKD-Ringvergleichs 2019  
 "Beschleunigung-digital"

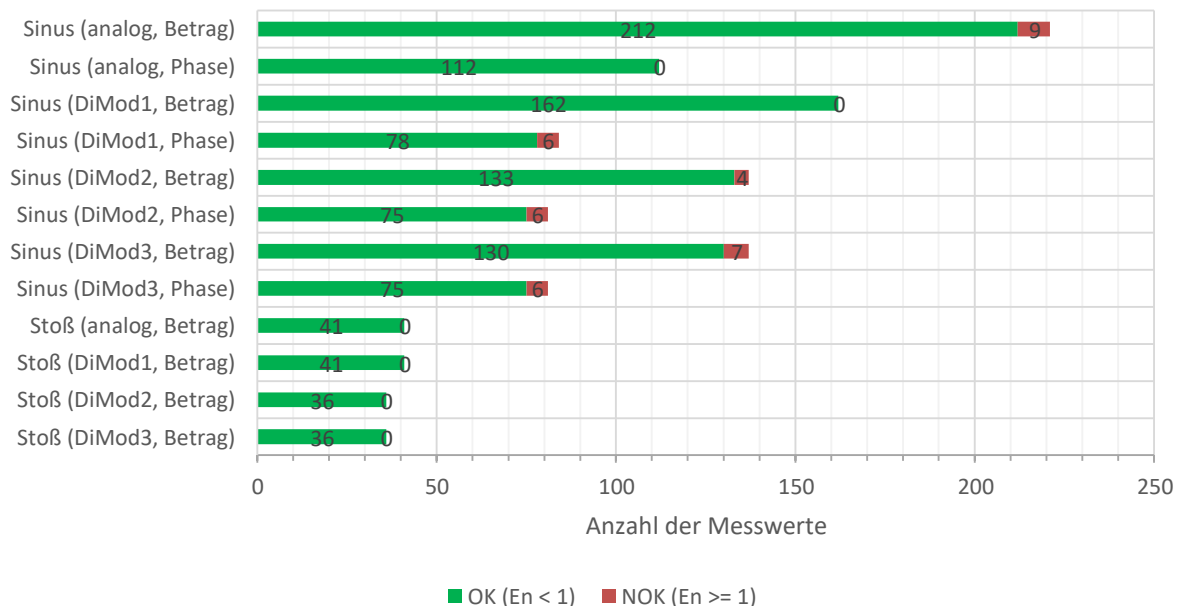



Abbildung 8: Ergebnisse aller Teilnehmer des DKD-Ringvergleichs 2019  
 "Beschleunigung-digital".

**Tabelle 4: Zusammenfassung zum Ringvergleich.**

Durchgeführte Kalibrierung	Anzahl der Messwerte	Bewertung der Ergebnisse			
		OK ( $E_n < 1$ )	NOK ( $E_n \geq 1$ )	OK (in %)	NOK (in %)
Stoß (DiMod3, Betrag)	36	36	0	100,00	0,00
Stoß (DiMod2, Betrag)	36	36	0	100,00	0,00
Stoß (DiMod1, Betrag)	41	41	0	100,00	0,00
Stoß (analog, Betrag)	41	41	0	100,00	0,00
Sinus (DiMod3, Phase)	81	75	6	92,59	7,41
Sinus (DiMod3, Betrag)	137	130	7	94,89	5,11
Sinus (DiMod2, Phase)	81	75	6	92,59	7,41
Sinus (DiMod2, Betrag)	137	133	4	97,08	2,92
Sinus (DiMod1, Phase)	84	78	6	92,86	7,14
Sinus (DiMod1, Betrag)	162	162	0	100,00	0,00
Sinus (analog, Phase)	112	112	0	100,00	0,00
Sinus (analog, Betrag)	221	212	9	95,93	4,07

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Model 7264-D Piezoresistive Accelerometer Specifications, Endevco Corporation, San Juan Capistrano, USA, 08/2005
- [2] M. G. Cox, „The evaluation of key comparison data“, 2002 Metrologia **39** 589
- [3] DIN EN ISO/IEC 17043:2010 Konformitätsbewertung – Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen (ISO/IEC 17043:2010); Deutsche und englische Fassung EN ISO/IEC 17043:2010
- [4] DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	20 / 24

## Anhang A – Technisches Protokoll

Dr. H. Müller  
Volkswagen AG  
EGEM/K  
BF 011-17820  
D-38436 Wolfsburg  
Tel.: 05361-930900

2019-10-15

### Technisches Protokoll zu einem DKD-Ringvergleich für die Stoß- und Sinuskalibrierung eines „digitalen“ Beschleunigungsaufnehmers

#### 1. Allgemeine Informationen über den Ringvergleich

Auf der 27. Sitzung der AG Beschleunigung des DKD-Fachausschusses „Kraft, Beschleunigung und Akustik“ am 02. und 03. April 2019 in Oberaula wurde beschlossen, einen DKD-Ringvergleich bei Stoß- und Sinusanregung für die Kalibrierung eines Beschleunigungsaufnehmers mit digitalem Ausgangssignal durchzuführen. Das Digitalisierungsmodul soll dabei von der Fa. Hentschel bzw. Kistler oder mg sensor stammen. Die Kalibrierungen erfolgen nach den Normen/Richtlinien ISO 16063-21 und -22 oder den entsprechenden Blättern der DKD-R 3-1.

Ziel des Ringvergleiches (RV) soll es sein, die Ergebnisse und die Kalibrierscheine für die Kalibrierung eines digitalen Beschleunigungsaufnehmers zu vergleichen. Werden Abweichungen festgestellt, sollen daraus Korrekturmaßnahmen abgeleitet werden.

#### 2. Transfer-Normal, Anregung und Kalibrierbereich

Als Transfernormal wird von Spektra ein Beschleunigungsaufnehmer des Herstellers Endevco, Typ 7264D-2K, SN 14596 bereit gestellt. Dieser Sensor ist mit einem 15 poligen Sub-D-Stecker ausgestattet. Über diesen Stecker kann der Sensor direkt an die PR-Box PR 13.5 an ein CS18 Kalibriersystem angeschlossen werden. Alternativ liegt der Lieferung ein passender Kabeladapter, für offene Kabelenden bei. Wird der Sensor als Digitalsensor (Dimod) betrieben, können über den 15 poligen Sub-D Stecker auch die Dimod-Module angeschlossen werden. Das Drehmoment bei der Montage beträgt **0,3 N m** (**Achtung: Größere Drehmomente können das Gehäuse zerstören!**)

Der analoge Sensor wird über einen Stecker an ein Digitalmodul (DiMod) angeschlossen. Es werden drei DiMods mitgeliefert, das erste kann in Verbindung mit dem Sensor bis ca. 2000 m/s<sup>2</sup> genutzt werden, das zweite bis 10 000 m/s<sup>2</sup> und das dritte bis 20 000 m/s<sup>2</sup>. Es sollten möglichst alle drei Messketten kalibriert werden.

Um bei möglichen Abweichungen einfacher analysieren zu können, ob die Abweichungen mit dem DiMod zusammenhängen, sollte die gleiche Kalibrierung für den analogen Sensor allein (ohne DiMod) wiederholt werden. Dafür ist ein laboreigener Verstärker beizustellen, die Speisespannung sollte auf 5 V eingestellt werden; der jeweilige Übertragungskoeffizient ist dann in (mV/V)/(m/s<sup>2</sup>) oder in mV/(m/s<sup>2</sup>) mit Angabe der Speisespannung anzugeben.

Maximal resultieren daraus vier verschiedene Stoß- und vier verschiedene Sinus-Kalibrierungen.

### 2.1 Stoßanregung

Als Messergebnis ist der Übertragungskoeffizient in LSB/(m/s<sup>2</sup>) bei folgenden Stoßspitzenwerten zu bestimmen: 100 m/s<sup>2</sup>, 500 m/s<sup>2</sup>, 1000 m/s<sup>2</sup>, 1500 m/s<sup>2</sup>, 2000 m/s<sup>2</sup>.

Bei jedem Stoßspitzenwert soll der Übertragungskoeffizient als Mittelwert aus ca. 15 Wiederholungen berechnet werden. Die einzelnen Stoßspitzenwerte sollten den angestrebten Spitzenwert auf ± 10 % treffen.

Als Messergebnis ist für jede Kalibrierung anzugeben, Tabelle 1:

Spitzenwert der Beschl.	Stoßdauer $t_{1,10\%}$	Stoß-Übertragungskoeffizient	Relative Standardabweichung (aus xx Werten)	Relative erw. Messunsicherheit
in m/s <sup>2</sup>	in ms	in LSB/(m/s <sup>2</sup> )	in %	in %
2000				
1500				
1000				
500				
100				

### 2.1 Sinusanregung

Als Messergebnis ist der Betrag in LSB/(m/s<sup>2</sup>) und ggf. die Phasenverschiebung in 1° des Übertragungskoeffizienten innerhalb des vom Labor vorgesehenen Leistungsangebotes in einer Terzreihe zu bestimmen (Maximal sinnvoller Frequenzbereich: 3 Hz ≤ f ≤ 5 kHz).

Als Messergebnis ist anzugeben, Tabelle 2:

Frequenz (Terzreihe)	Beschleunigungsamplitude	Betrag des Übertragungskoeffizient (Mittelwert aus xx Messwerten)		Phasenverschiebungswinkel des Übertragungskoeffizient (Mittelwert aus xx Messwerten)	
		Wert	Relative erw. Messunsicherheit	Wert	Erw. Messunsicherheit
in Hz	in m/s <sup>2</sup>	in LSB/(m/s <sup>2</sup> )	in %	in 1°	in 1°
10					
12,5					
16					
20					
25					
31,5					
...					

### 3. Teilnehmer und Umfang der Teilnahme

Den Teilnehmern ist freigestellt, in welchem Umfang, sie an dem Ringvergleich teilnehmen.

Tabelle 3: Teilnehmer und Umfang des DKD-RVs

Firma	Ansprechpartner und Kontaktdaten
SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH	Philipp Begoff; Heidelberger Str. 12, 01189 Dresden Tel. 0351-40024-728; Philipp.Begoff@spektra-dresden.de
Volkswagen AG	Dr. Heiko Müller; EGEM/K, Brieffach 011/17820, 38436 Wolfsburg Tel.: 05361-9-30900; Heiko.Mueller@volkswagen.de
mg-sensor GmbH	Dr. Andreas Marroquin; Airport Boulevard B 210, 77836 Rheinmünster, Tel.: 07229-69969-0; andreas.marroquin@mg-sensor.de
Porsche AG	Thomas Weiß, EEX5, Porschestraße, 71287 Weissach Tel.: 0711-911-83334; thomas.weiss@porsche.de
Kistler Instrumente GmbH	Robert Bausch; TC, Umberto-Nobile-Str. 14, 71063 Sindelfingen Tel.: 07031-3090-146; robert.bausch@kistler.com
Ford Werke GmbH	Peter Hüskes; MK-1/L11, Spessartstr., 50769 Köln Tel.: 0221/903-7628; phueskes@ford.com
Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)	Stefan Clausnitzer; Abteilung Fahrzeugtechnik, Referat F2; Brüderstraße 53, 51427 Bergisch Gladbach; Tel.: 02204 43-5204; Clausnitzer@bast.de
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Pilotlabor)	Dr. Thomas Bruns; Fachbereich 1.7, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig; Tel.: 0531-592-1700; thomas.bruns@ptb.de

### 4. Zeitplan

Tabelle 4: Detaillierter Zeitplan des DKD-RVs

Teilnehmer	Messung (Kalenderwoche)	Transport (Kalenderwoche)
<b>Spektra</b>	41/2019 <small>(ab 2019-10-07)</small>	42/2019
<b>mg-Sensor</b>	43/2019	44/2019
<b>Volkswagen</b>	45/2019	46/2019
<b>Ford</b>	47/2019	48/2019
<b>Porsche</b>	49/2019	50/2019
<b>Kistler</b>	51/2019	01/2020
<b>BAST</b>	02/2020	03/2020
<b>Spektra</b>	04/2020	05/2020
<b>PTB</b>	06/2020	

Der Ringvergleich erfolgt kreisförmig über die Fa. SPEKTRA, d.h. am Anfang und am Ende wird von SPEKTRA eine Kalibrierung ausgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse wird von der PTB durchgeführt.


**SPEKTRA → Teilnehmer 1 → Teilnehmer X → SPEKTRA;**  
**Ergebnisse → PTB**

Für den Transport zwischen den Teilnehmern ist eine Arbeitswoche vorgesehen. Jeder Teilnehmer hat maximal eine Woche Zeit zur Durchführung der Messungen. Der Zeitplan ist in Tabelle 4 angegeben.

Wenn ein Teilnehmer seinen Termin aus technischen Gründen nicht einhalten kann, dann setzt er aus und kann nach Rücksprache mit der Fa. SPEKTRA an das Ende des Vergleichs geschoben werden.

### 5. Transport der Messgeräte

Für alle Geräte werden Transportboxen für den Versand zur Verfügung gestellt. Die Teilnehmer sorgen dafür, dass die Messgeräte zum jeweils nächsten Teilnehmer gelangen. Die Details des Transports

	DKD-Ringvergleich 2019 „Beschleunigung-digital“ <a href="https://doi.org/10.7795/550.20210621">https://doi.org/10.7795/550.20210621</a>	DKD-V 3-3	
		Ausgabe:	06/2021
		Revision:	0
		Seite:	23 / 24

klären die Teilnehmer untereinander. Längere Verzögerungen oder Beschädigungen beim Transport sind bei Spektra anzuzeigen. Der Warenwert der Messkette beträgt ca. 2000,-€. Jeder Absender ist für den Abschluss einer entsprechenden Transportversicherung selbst verantwortlich. Tritt der Verlust oder die Beschädigung des Sensors auf dem Postweg ein, muss der Absender bzw. die Versicherung des Absenders für den Schaden haften.

#### 6. Anleitung für die Messungen

Die Messungen sind entsprechend dem Akkreditierungsumfang nach gültigem QMH auszuführen und zu dokumentieren.

#### 7. Ergebnisse und Informationspolitik

Die im Teilnehmerlabor erzeugten Kalibrierscheine und -ergebnisse sind innerhalb von zwei Wochen in digitaler Form (PDF, ausgefüllte Excelauswertungsvorlage) der PTB zuzusenden. Die PTB wird die Ergebnisse bewerten, die  $E_n$ -Werte bestimmen und das Resultat in anonymisierter Form in der AG Beschleunigung und ggf. bei einer Fachausschuss-Sitzung vorstellen. Die Teilnehmer erhalten einen individualisierten Bericht für ihr QM-System.

#### 8. Finanzielle Aspekte

Alle mit den Messungen verbundenen Kosten einschließlich des Transports der Messgeräte sind vom jeweiligen Teilnehmer zu tragen. Ebenso ist der Transport vom Teilnehmer zu organisieren. Die Auswertung der Messergebnisse bei der PTB erfolgt kostenneutral.

Sollte ein Sensor durch unsachgemäße Nutzung unbrauchbar werden, trägt der Verursacher die Kosten für Ersatz.

#### 9. Verschiedenes

Die PTB stellt ein Template zur Auswertung zur Verfügung

## Anhang B – Teilnehmerergebnisse (nicht Teil des öffentlichen Berichts)



Herausgeber:

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

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