

Richtlinie

Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten

Kalibrierung mit sinusförmiger Anregung

DKD-R 3-13, Blatt 2

<https://doi.org/10.7795/550.20260612>

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Der **Deutsche Kalibrierdienst** ist ein technisches Gremium unter Leitung der PTB. Mit seinen Mitgliedern, zu denen mehr als 500 Laboratorien und Unternehmen des Kalibrierwesens gehören, ist er **das Kalibriernetzwerk Deutschlands**. Der DKD stellt somit eine wichtige Plattform für den fachlichen Austausch seiner Mitglieder dar. Grundlegendes Ziel des DKD ist die Förderung der Einheitlichkeit im Messwesen.

Zu den Aufgaben des DKD zählt u.a. die Erstellung kalibrierrelevanter Dokumente. Diese werden von den Mitgliedern der DKD-Fachausschüsse gemeinsam mit Mitarbeitern der PTB erarbeitet. Die DKD-Dokumente repräsentieren jeweils den aktuellen Stand der Technik. Die Richtlinien und Leitfäden des DKD dienen zudem vielfach als Basis für den technischen Teil bei Begutachtungen zur Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS).

Die Kalibrierlaboratorien führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei ihrer Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine dienen als Nachweis für die Rückführung der Messungen auf nationale Normale. Neben der Erarbeitung messtechnischer Grundlagen im Kalibrierwesen fördert der DKD somit auch die Weitergabe der Maßeinheiten im Sinne der messtechnischen Rückführung.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

DKD-Richtlinien

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien bei der Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. Gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 sind die DKD-Richtlinien Normen gleichgestellt. Die in ihnen beschriebenen, validierten Verfahren spiegeln den aktuellen Stand der Technik wider und beschreiben technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe zur Durchführung von Kalibrierungen.

Die Richtlinien fördern die Gleichbehandlung zu kalibrierender Geräte in den unterschiedlichen Laboratorien sowie die Überprüfbarkeit der Kalibrierungen selbst, ohne jedoch die Entwicklung der Kalibrierverfahren einzuschränken. Abweichungen und neue Verfahren sind in Absprache mit der Akkreditierungsstelle zulässig, können jedoch die Validierung der eigenen Verfahren erforderlich machen. Kalibrierungen akkreditierter Laboratorien gewährleisten die Verlässlichkeit von Messergebnissen, stärken das Kundenvertrauen, und erhöhen die Wettbewerbsfähigkeit auf nationaler und internationaler Ebene.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss Kraft, Beschleunigung und Akustik erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

Kurzzusammenfassung

In der Richtlinie werden Mindestanforderungen für die dynamische Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten und Sensoren definiert. Beschrieben wird ein dynamisches Vergleichsverfahren mit sinusförmiger Anregung. Die Richtlinie ist auch für die Kalibrierung von Messgeräten und Sensoren für die abgeleiteten Messgrößen Winkelbeschleunigung und Drehwinkel anwendbar. Charakteristika wie Temperatureinfluss, Querempfindlichkeiten usw. werden in dieser Richtlinie nicht behandelt.

Zitervorschlag für die Quellenangabe:

*Richtlinie DKD-R 3-13, Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten – Blatt 2
Kalibrierung mit sinusförmiger Anregung, Ausgabe 05/2026, Revision 0, Physikalisch-
Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: doi.org/10.7795/550.20260612.*

Urheberrecht

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:

Philipp Begoff, Spektra Schwingungstechnik und Akustik GmbH, Dresden
Thomas Weiß, Porsche AG, Stuttgart
Dr. Thomas Bruns, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
Dr. Heiko Müller, Volkswagen AG, Wolfsburg
Oliver Derichs, DSA Daten-Systemtechnik GmbH, Aachen
Dr. Thomas Petzsche, CalZert Ingenieurbüro, Heidelberg
Dr. Marcus Winter, Polytec GmbH, Waldbronn

im Namen vieler weiterer, hier nicht genannter Kolleginnen und Kollegen.

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	5
2	Begriffsbestimmungen.....	5
3	Symbole und Indizes	6
4	Grundlagen	8
4.1	Rotatorische Messgrößen	8
4.2	Zentripetalbeschleunigung	8
4.3	Tangentialbeschleunigung	9
5	Ziel der Kalibrierung	10
6	Anforderungen an die Kalibrierfähigkeit.....	11
7	Umgebungsbedingungen	11
8	Referenzaufnehmer.....	12
8.1	Anforderungen	12
8.2	Rückführung der Messgröße.....	13
8.2.1	Bezugsnormale (BN), TransfERNormale (TN) und Gebrauchsnormale (GN).....	13
8.2.2	Bezugsrichtung des Phasenverschiebungswinkels	14
9	Kalibriereinrichtung und Signalübertragung	14
9.1	Winkelgeschwindigkeitserreger für eine sinusförmige Anregung.....	14
9.1.1	Aufstellung des Schwingungserregers	16
9.1.2	Störschwingungen und Querbewegungen.....	17
10	Kalibrierverfahren	18
10.1	Grundlagen	18
10.2	Signalformen zur Anregung	19
10.3	Messverfahren zur Ermittlung der Ausgangsgrößen	19
11	Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung	20
11.1	Vorbereitende Maßnahmen	20
11.1.1	Bestimmung der Kalibrierfähigkeit.....	20
11.1.2	Adaptierung der Aufnehmer	20
11.2	Ablauf der Kalibrierung.....	21
11.3	Einflussfaktoren und praktische Hinweise	21
11.4	Wartung und Kontrolle	22
12	Messunsicherheit.....	23
13	Kalibrierschein	26
14	Literaturverzeichnis.....	27
15	Änderungshistorie.....	27

1 Zweck und Geltungsbereich

Innerhalb dieser Richtlinie werden Mindestanforderungen für die dynamische Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten und Sensoren definiert. Beschrieben wird ein dynamisches Vergleichsverfahren mit sinusförmiger Anregung. Dies wird mit einem Rotations-schwingungserreger für Winkelgeschwindigkeiten erzeugt. Winkelgeschwindigkeits-sensoren sind im weitesten Sinne Messgrößenwandler, die ein elektrisches oder digitales Ausgangssignal proportional zu dem physikalischen Eingangssignal Winkelgeschwindigkeit zur Verfügung stellen. Abhängig vom Anwendungsgebiet werden diese Sensoren beispielsweise auch als Drehraten-, Angular Velocity oder AV-Sensoren bezeichnet. Weiterführend gilt diese Richtlinie auch für Messketten bestehend aus Sensor mit Verstärker, Signalwandler und einer Anzeigeeinrichtung. Diese Messketten werden innerhalb dieser Richtlinie als Winkelgeschwindigkeitsmessgeräte bezeichnet.

Diese Richtlinie ist auch für die Kalibrierung von Messgeräten und Sensoren für die abgeleiteten Messgrößen Winkelbeschleunigung und Drehwinkel anwendbar, da sich die entsprechenden Messgrößen bei sinusförmiger Anregung direkt ineinander umrechnen lassen.

Die Bestimmung anderer Charakteristika wie Temperatureinfluss, Querempfindlichkeiten usw. werden in dieser Richtlinie nicht behandelt.

2 Begriffsbestimmungen

Abkürzungen	Erläuterung
ADU	Analog/Digital-Umsetzer
AV	Angular Velocity (Winkelgeschwindigkeit)
MG	Messgerät
BN	Bezugsnormal
GN	Gebrauchsnormal
TN	TransfERNormal
KE	Kalibriereinrichtung
KG	Kalibriergegenstand
RLV	Rotationslaservibrometer
THD	Total Harmonic Distortion (Klirrfaktor)
MV	Messverstärker
LSB	Least Significant Bit
DTI	Digital Transducer Interface

3 Symbole und Indizes

Hinweis: Für die Anwendung dieser DKD-Richtlinie gelten die in den folgenden Tabellen genannten Symbole und Indizes. Symbole, die sich spezifisch auf Messunsicherheitsbetrachtungen beziehen, sind gesondert in Kapitel 12 aufgelistet.

Hinweis: Winkelgrößen sind in der nachfolgenden Tabelle mit der Einheit rad angegeben. Sie können äquivalent auch in Grad (°) angegeben werden, mit $1 \text{ rad} = (180^\circ/\pi)$.

Formelzeichen	Typische Einheiten	Erläuterung
Ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
α	rad/s ²	Winkelbeschleunigung
ϕ	rad	Drehwinkel
Y		Reelle Messgröße oder Signal
\tilde{Y}		Phasor der komplexen Darstellung von Y
\hat{Y}		Amplitude von Y bzw. Betrag des Phasors \tilde{Y}
φ_Y	rad	(Initial-) Phase von Y bzw. Phasenwinkel des Phasors \tilde{Y}
a_Z	m/s ²	Zentripetalbeschleunigung
a_T	m/s ²	Tangentialbeschleunigung
U_X	mV, LSB, mA	Amplitude (oder Effektivwert) des Ausgangssignals für X
$U_{X,0}$	mV, LSB, mA	Bias oder Offsetwert des Ausgangssignals für X . Konstanter Offset bei sinusförmiger Anregung, Nullsignal (ohne Anregung) bei Effektivwertmessung.
$\varphi_{U,X}$	rad	(Initial-) Phase des Ausgangssignals für X
\tilde{S}_X		Komplexer Übertragungskoeffizient des Sensors X
\hat{S}_X	mV/(rad/s), LSB/(rad/s), mA/(rad/s)	Betrag von \tilde{S}_X
$\varphi_{S,X}$	rad	Phasenverschiebung des Sensorsignals zwischen Eingangs- und Ausgangssignal von \tilde{S}_X
\tilde{G}_X		Komplexer Übertragungskoeffizient des Anpassers / Verstärkers / Filters in der Messkette von Sensor X
\hat{G}_X	mV/(rad/s), LSB/(rad/s), mA/(rad/s)	Betrag von \tilde{G}_X
$\varphi_{G,X}$	rad	Phasenverschiebung von \tilde{G}_X
$\Delta\Omega_{KG}$	rad/s	Anzeigeabweichung
$\delta\Omega_{KG}$		Relative Anzeigeabweichung

Anmerkung: Bei Angaben zu einer Phasendifferenz wird normativ in der Regel die Phasenverschiebung [1], [2], [3] verwendet. Dabei ist die Phasenverschiebung die Differenz aus der Phasenlage des Ausgangs- zum Eingangssignal. Sie ist beispielsweise positiv, wenn das elektrische Signal eines Aufnehmers dem mechanischen Eingangssignal vorausseilt.

In der folgenden Tabelle sind einige wichtige Indizes aufgeführt. Indizes, die bei der Messunsicherheitsbetrachtung angewendet werden, sind in dem Abschnitt Messunsicherheit aufgeführt und sind hier nicht aufgeführt.

Index	Erläuterung
<i>GN</i>	Gebrauchsnorm
<i>KG</i>	Kalibriergegenstand
<i>G</i>	Übertragungskoeffizient eines Messverstärkers
<i>S</i>	Übertragungskoeffizient eines Sensors
<i>U</i>	Ausgangsgröße eines Sensors
0	Offset eines Ausgangssignals

4 Grundlagen

4.1 Rotatorische Messgrößen

Für Frequenzgangmessungen werden vorzugsweise sinusförmige Signale mit der Frequenz f bzw. der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ verwendet.

Ausgehend von der Messgröße **Winkelgeschwindigkeit** Ω :

$$\Omega(t) = \hat{\Omega} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{\Omega}) \quad (1)$$

mit der Amplitude $\hat{\Omega}$, kann über die einfache Differenziation die **Winkelbeschleunigung** α :

$$\alpha(t) = \hat{\Omega} \cdot \omega \cdot \cos\left(\omega t + \varphi_{\Omega} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

sowie durch einfache Integration der Winkelgeschwindigkeit der **Drehwinkel** ϕ

$$\phi(t) = \frac{\hat{\Omega}}{\omega} \cdot \cos\left(\omega t + \varphi_{\Omega} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

bestimmt werden.

Für die spätere Berechnung der Übertragungskoeffizienten ist die Verwendung der komplexen Schreibweise hilfreich, in der sich z.B. Gleichung (1) wie folgt schreiben lässt:

$$\Omega(t) = \operatorname{Re}\{\tilde{\Omega} \cdot e^{i\omega t}\} = \operatorname{Re}\{\hat{\Omega} \cdot e^{i\varphi_{\Omega}} \cdot e^{i\omega t}\} = \hat{\Omega} \cdot \operatorname{Re}\{e^{i(\omega t + \varphi_{\Omega})}\} \quad (4)$$

Hierbei ist $\operatorname{Re}\{\}$ der Realteil der komplexen Größe. Für die differenzierte Messgröße Winkelbeschleunigung α sowie die integrierte Messgröße Drehwinkel ϕ können die Amplituden $\hat{\alpha}$ und $\hat{\phi}$ sowie die Phasenverschiebungswinkel φ_{α} und φ_{ϕ} wie folgt bestimmt werden:

$$\text{Winkelbeschleunigung:} \quad \hat{\alpha} = \hat{\Omega} \cdot \omega, \quad \varphi_{\alpha} = \varphi_{\Omega} + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

$$\text{Drehwinkel:} \quad \hat{\phi} = \hat{\Omega}/\omega, \quad \varphi_{\phi} = \varphi_{\Omega} - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

4.2 Zentripetalbeschleunigung

Wenn ein Massepunkt auf einer Kreisbahn um einen zentralen Drehpunkt bewegt wird, wird eine nach innen gerichtete Beschleunigung (in Richtung Kreismittelpunkt) wirksam. Diese Beschleunigung wird als Zentripetalbeschleunigung a_z bezeichnet. In Bezug auf die vorliegende Messaufgabe tritt die Zentripetalbeschleunigung als Störgröße (Querbeschleunigung) auf und kann das Kalibrierergebnis verfälschen.

Die Zentripetalbeschleunigung a_z kann aus dem Radius r (Abstand zum zentralen Drehpunkt) sowie aus dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit bestimmt werden:

$$a_z(t) = r \cdot \Omega^2(t) = r \cdot (\hat{\Omega} \cdot \cos(\omega t))^2 = \frac{1}{2} r \cdot \hat{\Omega}^2 (1 + \cos(2\omega t)) \quad (7)$$

Bei Anordnung der Sensoren im zentralen Drehpunkt der Kalibriereinrichtung ($r = 0$) tritt keine Zentripetalbeschleunigung a_z auf. Außerhalb des zentralen Drehpunkts ist diese Beschleunigung mit größer werdendem Radius r ansteigend. Gemäß dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit hat die Zentripetalbeschleunigung die doppelte Frequenz f der Modulation der Winkelgeschwindigkeit und ist einseitig in Richtung zentraler Drehpunkt gerichtet (Gleichanteil durch die Quadrierung).

4.3 Tangentialbeschleunigung

Eine weitere bedeutsame Beschleunigung ist die positionsabhängige Tangentialbeschleunigung $a_T(t)$. Diese Beschleunigung tritt ebenfalls außerhalb der zentralen Drehachse auf. Die Tangentialbeschleunigung ist die vektorielle Geschwindigkeitsänderung pro Zeit, die ein Massepunkt tangential zu dieser Kreisbahn erfährt. Die Tangentialbeschleunigung

$$a_T(t) = r \cdot \alpha(t) = r \cdot \hat{\Omega} \cdot \omega \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

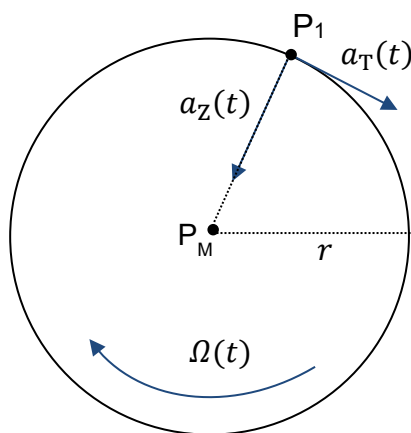
ist über den Radius r mit der Winkelbeschleunigung verknüpft. Für sinusförmige Anregungen kann gemäß Gleichung (8) die Amplitude der Winkelgeschwindigkeit

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{a}_T}{r \cdot \omega} \quad (9)$$

aus der Amplitude der Tangentialbeschleunigung, dem Radius sowie der Kreisfrequenz bestimmt werden.

Die Tangentialbeschleunigung ist insofern von Bedeutung, da sie als zusätzliche Kontrollgröße während der Kalibrierung verwendet werden kann. Im Falle einer Validierung oder Überprüfung der Messeinrichtung kann auf die Messung der Tangentialbeschleunigung zurückgegriffen werden. Die Messung der Tangentialbeschleunigung kann mit einem translatorischen Beschleunigungsaufnehmer ausgeführt werden. Als Referenzmessgröße für die Kalibrierung ist sie jedoch in Übereinstimmung mit dieser Richtlinie nicht zugelassen.

Abbildung 1 dient zur Verdeutlichung der auftretenden Bewegungsgrößen um eine zentrale Drehachse



- $\Omega(t)$... Winkelgeschwindigkeit, rad/s
- $a_T(t)$... Tangentialbeschleunigung, m/s²
- $a_z(t)$... Zentripetalbeschleunigung, m/s²
- r ... Radius, m
- P_M ... Zentraler Drehpunkt
- P_1 ... Messpunkt

Abbildung 1: Auftretende Bewegungsgrößen bei Drehbewegung

5 Ziel der Kalibrierung

Das Ziel der Kalibrierung ist die Bestimmung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von Winkelgeschwindigkeitssensoren oder -messgeräten. Die Anregung erfolgt sinusförmig bei verschiedenen Anregungsfrequenzen. Somit kann eine Aussage zum Frequenzgang des komplexen Übertragungskoeffizienten \tilde{S}_{KG} (Betrag und Phasenverschiebung) des KG getroffen werden.

Da die Bestimmungsgleichungen der Kalibrierergebnisse eines Sensors sowie eines anzeigenden Messgeräts unterschiedlich sind, sollte in der Messunsicherheitsbilanz für beide Kalibriergegenstandsarten eine gesonderte Betrachtung ausgeführt werden.

Die Referenz-Winkelgeschwindigkeit wird typischerweise mit Hilfe eines kalibrierten Gebrauchsnormals (GN) mit beigestelltem, kalibriertem Anpasser / Messverstärker erfasst. Die Ausgangsgröße der Messkette wird dann typischerweise durch eine sinusförmige Spannung $U_{GN}(t)$ mit dem Phasor \tilde{U}_{GN} beschrieben. In komplexer Phasor-Schreibweise lässt sich der Zusammenhang aus Winkelgeschwindigkeit, Übertragungskoeffizienten und Spannungen folgendermaßen darstellen:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{GN} &= \tilde{\Omega} \cdot \tilde{S}_{GN} \cdot \tilde{G}_{GN} \\ \hat{U}_{GN} e^{i\varphi_{U,GN}} &= \hat{\Omega} e^{i\varphi_{\Omega}} \cdot \hat{S}_{GN} e^{i\varphi_{S,GN}} \cdot \hat{G}_{GN} e^{i\varphi_{G,GN}} \end{aligned} \quad (10)$$

Dabei bezeichnet

$$\tilde{S}_{GN} = \hat{S}_{GN} e^{i\varphi_{S,GN}} \quad (11)$$

den aus seiner Kalibrierung bekannten komplexen Übertragungskoeffizienten des GN mit Betrag \hat{S}_{GN} und Phase $\varphi_{S,GN}$ und

$$\tilde{G}_{GN} = \hat{G}_{GN} e^{i\varphi_{G,GN}} \quad (12)$$

den entsprechenden komplexen Übertragungskoeffizienten des Messverstärkers.

Handelt es sich beim KG um einen Sensor mit beigestelltem Anpasser/Messverstärker, dann gilt für die Ausgangsspannung der KG-Messkette entsprechend

$$\tilde{U}_{KG} = \hat{U}_{KG} e^{i\varphi_{U,KG}} = \hat{\Omega} e^{i\varphi_{\Omega}} \cdot \hat{S}_{KG} e^{i\varphi_{S,KG}} \cdot \hat{G}_{KG} e^{i\varphi_{G,KG}} \quad (13)$$

Durch Kombination der Gleichungen (10) und (13) findet man für den als Kalibrierergebnis gesuchten Übertragungskoeffizienten \tilde{S}_{KG} des KG in komplexer Form:

$$\tilde{S}_{KG} = \hat{S}_{KG} e^{i\varphi_{S,KG}} = \tilde{S}_{GN} \cdot \frac{\tilde{G}_{GN}}{\hat{G}_{GN}} \cdot \frac{\tilde{U}_{KG}}{\tilde{U}_{GN}} \quad (14)$$

Für den Betrag folgt entsprechend

$$\hat{S}_{KG} = \hat{S}_{GN} \cdot \frac{\hat{G}_{GN}}{\hat{G}_{KG}} \cdot \frac{\hat{U}_{KG}}{\hat{U}_{GN}} \quad (15)$$

und für die Phasenverschiebung

$$\varphi_{S,KG} = \varphi_{S,GN} + \varphi_{G,GN} + \varphi_{U,KG} - \varphi_{U,GN} - \varphi_{G,KG} \quad (16)$$

Werden in den jeweiligen Messketten ergänzende Analog-/Digital-Umsetzer oder Filter verwendet, so werden diese wie (in Reihe geschaltete) Anpasser/Verstärker behandelt, d.h. sie müssen kalibriert sein und ihre komplexen Übertragungskoeffizienten werden als Faktoren in den Gleichungen ergänzt. Entsprechendes gilt für numerische Filter in der Auswertung, deren Übertragungskoeffizient ebenfalls in die Gleichungen eingefügt werden muss.

Ist der KG eine Messkette inklusive Anpasser/Verstärker, so entfällt der Faktor für G_{KG} .

Für die Bestimmung werden bedingt durch die Signalauswertung (z.B. Sinusapproximation) die ermittelten Amplituden und Phasen der Signale verwendet.

Es können jedoch auch die Effektivwerte der Signale (bei RMS-Messung) für die Berechnung verwendet werden. Dann gilt die Berechnung gemäß Gleichung (14) wie für den Betrag.

Sind konstante Offset-Spannungen bei GN ($U_{GN,0}$) oder KG ($U_{KG,0}$) bekannt, so sind diese vorher von den Effektivwerten abzuziehen, um eine bessere Approximation des AC-Anteils zu erhalten. Die Messunsicherheit der Bestimmung dieser Offsetspannungen ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Das Ergebnis der Kalibrierung eines **anzeigenden** Winkelgeschwindigkeitsmessgeräts ist eine Anzeigeabweichung $\Delta\Omega_{KG}$ als Differenz der Winkelgeschwindigkeitsanzeige Ω_{KG} des KG zur bereitgestellten Winkelgeschwindigkeit Ω_{GN} der Kalibriereinrichtung gemessen mit dem GN:

$$\Delta\Omega_{KG} = \Omega_{KG} - \Omega_{GN} \quad (17)$$

Häufig wird auch die relative Anzeigeabweichung $\delta\Omega_{KG}$ verwendet:

$$\delta\Omega_{KG} = \frac{\Delta\Omega_{KG}}{\Omega_{GN}} = \frac{\Omega_{KG} - \Omega_{GN}}{\Omega_{GN}} \quad (18)$$

6 Anforderungen an die Kalibrierfähigkeit

Anforderungen an die Kalibrierfähigkeit sind in der *DKD-R 3-1, Bl.1* [1] ausführlich beschrieben. Sie gelten in gleicher Weise für Winkelgeschwindigkeitssensoren und -messgeräte.

7 Umgebungsbedingungen

Die relevanten Umgebungsbedingungen müssen der Kalibrieraufgabe angepasst sein, rückführbar überwacht und dokumentiert werden. Die Einflüsse der Umgebungsbedingungen sind in der jeweiligen Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Während der Kalibrierung muss sich der Messaufbau im thermischen Gleichgewicht befinden. Die von den Herstellern angegebenen Warmlaufzeiten sind einzuhalten. Die Kalibrierung sollte bei einer Umgebungstemperatur von $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ ausgeführt werden.

Die relative Luftfeuchte sollte max. 75 % betragen.

8 Referenzaufnehmer

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, die Winkelgeschwindigkeit zu bestimmen. Innerhalb dieser Richtlinie werden jedoch nur Winkelgeschwindigkeitssensoren oder Winkelbeschleunigungssensoren als Referenzaufnehmer betrachtet. Inkrementale Winkelsensoren oder Varianten davon werden in diesem Richtlinienblatt nicht genauer behandelt.

8.1 Anforderungen

Als Bezugs- oder Transfornormale (BN oder TN), sollten nur Winkelgeschwindigkeits- oder Winkelbeschleunigungsaufnehmer einer gewissen Güte verwendet werden.

Die Eigenschaften der verwendeten Normale sollten bezüglich folgender Kenn- bzw. Störgrößen auf das Kalibrierergebnis im eingesetzten Kalibrierbereich beachtet werden:

1. Langzeitstabilität:
Die komplexen Übertragungskoeffizienten bzgl. Betrag und Phasenverschiebung sollten über das Kalibrierintervall hinaus eine ausreichende Konstanz aufweisen.
2. Nutzbarer Frequenzbereich:
Der für die Kalibrierung genutzte Frequenzbereich sollte innerhalb der Spezifikationen der Normalaufnehmer liegen. Die Abweichungen der maßgeblichen Koeffizienten sind über deren Frequenzbereich ausreichend reproduzierbar und stabil.
3. Amplitudenlinearität:
Die Übertragungseigenschaften bei den jeweiligen Messfrequenzen müssen bzgl. der verschiedenen, gemessenen Amplitudenwerte eine maximal mögliche Konstanz aufweisen.
4. Querempfindlichkeit:
Querbewegungen (rotatorisch und translatorisch) zur angeregten, gemessenen Bewegung sind unvermeidbar. Sie sollten einen ausreichend geringen Einfluss auf die Ausgangssignale der Normale haben.
5. Signalrauschen:
Das elektrische Eigenrauschen der Normale sollte über den Kalibrierbereich möglichst gering sein. Es kann ggf. durch geeignete Maßnahmen zusätzlich reduziert werden.
6. Verkabelung:
Triboelektrische Effekte an Leitungsisolationen und bezüglich der Leitungsführung sind zu beachten und auf ein vertretbares Minimum zu begrenzen.
Um Störungen und damit erhöhte Messunsicherheiten zu vermeiden, sollten immer rauscharme, flexible und möglichst kurze Sensorleitungen eingesetzt werden.
7. Schirmung/Gehäuse:
Die Schirmung und der elektrische Masseanschluss des Normals sollten so realisiert werden, dass sie einen minimalen Einfluss auf das Ausgangssignal haben.

Befinden sich starke akustische und/oder (elektro-)magnetische Felder in der Nähe der Kalibriereinrichtung, so ist deren Einfluss auf die verwendeten Normale zu berücksichtigen. Schnelle Temperaturänderungen, verursacht z.B. durch Zugluft oder Sonneneinstrahlung sind zu vermeiden. Die Eigenerwärmung der verwendeten Normale ist stets zu berücksichtigen. Nur so kann realisiert werden, dass die geforderten Bereiche für Temperatur und relative Luftfeuchte am Ort der Kalibrierung durch eine Klimatisierung/Temperierung eingehalten werden können. Montageflächen für Normale (und KG) müssen so beschaffen sein, dass durch deren mechanische Befestigung keine Verspannungen an den jeweiligen Aufnehmergehäusen entstehen. Die

nomielle Drehachse des verwendeten Normals sollte mit der Drehachse der erzeugten Drehbewegung übereinstimmen.

8.2 Rückführung der Messgröße

8.2.1 Bezugsnormale (BN), TransfERNormale (TN) und Gebrauchsnormale (GN)

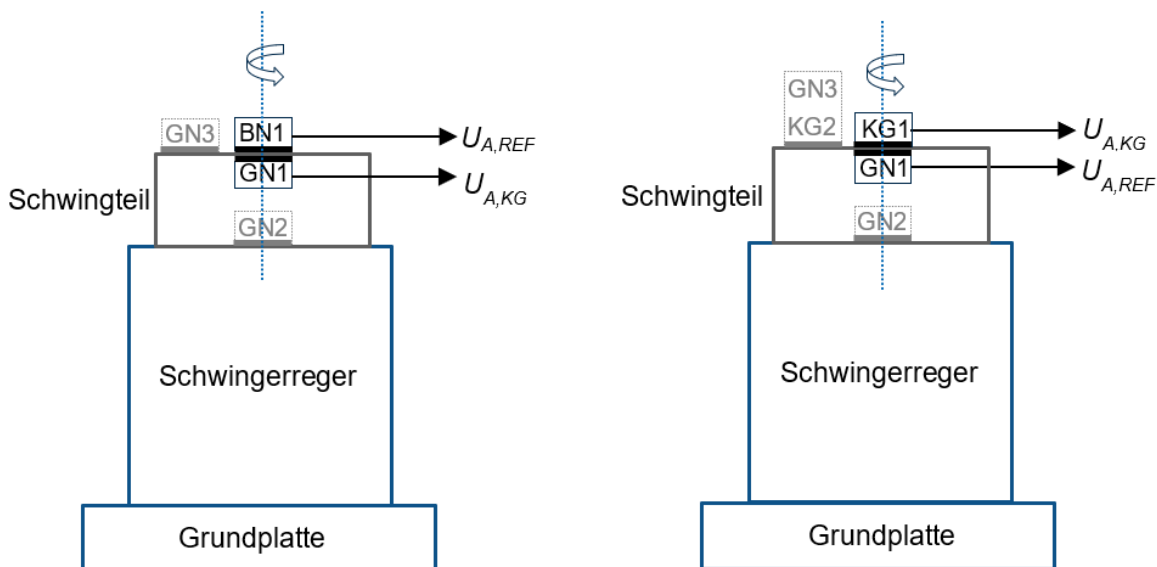
BN müssen mittels geeigneter und validierter Kalibrierverfahren auf das nationale Normal rückgeführt werden. Grundsätzlich stehen dazu zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. BN werden gemäß der Norm *ISO 16063-15 „Primary angular vibration calibration by laser interferometry“* [4] **primär** kalibriert
2. BN werden gemäß dieses Richtlinienblattes einer **Sekundärkalibrierung** unterzogen.

TN dienen in der Regel als BN. Diese werden zur Kalibrierung von GN gemäß einer Sekundärkalibrierung eingesetzt. In Schwingungserregern eingebaute Referenzaufnehmer sind in diesem Zusammenhang auch als GN anzusehen und müssen zyklisch über BN/TN rückgeführt werden (Bild a)). Die Kalibrierung von Kalibriergegenständen (KG) erfolgt dann unter Einsatz der rückgeführten (im Erreger eingebauten) GN (Bild b)).

a) Rückführung eines GN:

b) Kalibrierung eines KG:



BN1	Bezugsnormal in konzentrischer Anordnung mit GN1
GN1	Gebrauchsnormal in konzentrischer Anordnung mit BN1
GN2	Gebrauchsnormal an Alternativposition 1 (entfernte Position)
GN3	Gebrauchsnormal an Alternativposition 2 (exzentrische Anordnung zu BN1)
KG1	Kalibriergegenstand in konzentrischer Anordnung mit GN1
KG2	Kalibriergegenstand an Alternativposition 1 (exzentrische Anordnung)

Abbildung 2: Kalibrieresetup für die Rückführung (links) und (Kunden-) Kalibrierungen (rechts)

Empfohlen wird eine konzentrische Anordnung der Sensoren. Dabei werden die Messflächen von BN1 und GN1 sowie GN1 und KG1 unmittelbar übereinanderliegend am Schwingteil, möglichst in der zentralen Drehachse des Erregers befestigt.

In Einzelfällen, insbesondere bei der Kalibrierung von KG/Messgeräten mit großen Abmessungen und/oder unbekanntem internen Aufbau, ist eine konzentrische Anordnung nicht immer realisierbar.

Unter Beachtung der auftretenden Relativbewegung bei hohen Frequenzen innerhalb des Schwingteils ist auch eine exzentrische Anordnung wie bei GN3 und KG2 zulässig. Auch andere Anordnungen sind möglich. Allerdings müssen in solchen Fällen Zusatzuntersuchungen hinsichtlich Relativbewegung und deren Einfluss auf die Messunsicherheit ausgeführt werden.

Bei einer exzentrischen Anordnung außerhalb der Drehachse des Erregers tritt eine Zentripetalbeschleunigung auf, deren Einfluss auf die Messunsicherheit betrachtet werden muss.

Hinweis 1:

Der zusätzliche Schritt der Weitergabe der Einheit über die Gebrauchsnormale muss in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Werden die GN für eine externe Rückführung aus dem Schwingteil ausgebaut, so sollten sie möglichst mit der gleichen Koppelfläche und in gleicher Orientierung zum Erdschwerefeld rückgeführt werden.

Hinweis 2: Bei Einsatz eines TransfERNormals für die Rückführung wird empfohlen, das Gebrauchsnormal im eingebauten Zustand zu kalibrieren, dargestellt unter a).

8.2.2 Bezugsrichtung des Phasenverschiebungswinkels

Normalerweise wird von den Herstellern von Winkelgeschwindigkeitsaufnehmern die Drehrichtung mit positivem Ausgangssignal auf dem Aufnehmergehäuse (Pfeildarstellung) und/oder im Datenblatt angegeben. Diese Richtungsdefinition durch den KG wird für die Definition der positiven Winkelgeschwindigkeit der Kalibriereinrichtung für den Zweck der Kalibrierung übernommen. Der Phasenverschiebungswinkel liegt im Bereich Null Grad, wenn der KG in Pfeilrichtung gedreht wird und dabei ein positives Ausgangssignal ausgibt.

9 Kalibriereinrichtung und Signalübertragung

9.1 Winkelgeschwindigkeitserreger für eine sinusförmige Anregung

Für die Erzeugung einer sinusförmigen Winkelgeschwindigkeit kommen häufig rotatorische Antriebe zum Einsatz, bei denen ein Rotor von einem Magnetfeld angetrieben wird. Typische Vertreter sind der DC-Servomotor, bürstenloser Gleichstromantrieb und andere elektrodynamische Antriebe. Am besten geeignet sind Antriebe, die aufgrund ihres Aufbaus und eines geringen Massenträgheitsmoments des Rotors hohe Winkelbeschleunigungen erreichen können. Dadurch ist eine Kalibrierung bei hohen Frequenzen auch mit moderater Winkelgeschwindigkeit möglich.

Die axiale Führung dieses Rotors erfolgt über eine geeignete Lagerung (z.B. Kugellager, Gleitlager, Luftlager). Abhängig von der Qualität der Lagerung können Signalverzerrungen oder Störkomponenten auf dem Winkelgeschwindigkeitssignal auftreten. Der harmonische Klirrfaktor

(THD – Total Harmonic Distortion) sowie der Gesamtklirrfaktor (THD+N – THD+Noise) sollten kleiner sein als:

- Harmonischer Klirrfaktor (THD) bis einschließlich zur 5. Oberwelle: **5%** des Winkelgeschwindigkeitssignals
- Gesamtklirrfaktor (THD+N), ermittelt in einer sinnvollen Bandbreite, welche den Kalibrierumfang abdeckt: **7%** des Winkelgeschwindigkeitssignals

Dies ist insbesondere für breitbandige Effektivwertmessungen und deren Auswertung/Messunsicherheit zu beachten. Werden Winkelbeschleunigungssensoren als Referenz eingesetzt, ist der Klirrfaktor prinzipbedingt (Oberwellenverstärkung durch zusätzliche Differentiation) deutlich größer.

Es gibt keinen Schwingungserreger, der für alle Frequenzen und KG-Massen gleich gut geeignet ist. Je nach Kalibrieraufgabe können unterschiedliche Schwingerreger für die Kalibrierung zum Einsatz kommen. Die Erreger sollten dabei hinsichtlich folgender Merkmale ausgewählt werden:

1. Quer- und Taumelschwingungen möglichst gering
2. Magnetfeld an der Ankopplungsfläche des Schwingteils möglichst gering
3. Massenträgheitsmoment des Schwingteils möglichst klein
4. Geringe Eigenerwärmung des Erregerschwingteils während des Betriebs
5. Wahlweise vertikale oder horizontale Schwingungsrichtung (bauform-abhängig)
6. Ggf. Einsatz einer Positionsregelung anstelle von mechanischen Rückstellelementen mit dem Ziel einer Reduzierung von Verzerrungen

Die maximal erreichbare Winkelgeschwindigkeit des Erregers ist von dessen Drehmoment sowie vom Massenträgheitsmoment des Rotors sowie des KG abhängig. Das Massenträgheitsmoment des Rotors ist konstant und sollte im besten Fall bekannt sein. Das Massenträgheitsmoment des KG hingegen ist eine variable Größe, die von dessen Masse sowie Geometrie und dem inneren Aufbau (Massenverteilung) abhängig ist (siehe Hinweis auf der folgenden Seite).

Das gesamte Massenträgheitsmoment I (Rotor einschließlich KG) begrenzt die maximale erzeugbare Winkelbeschleunigung und damit auch die Winkelgeschwindigkeit. In Verbindung mit dem maximalen Drehmoment M des Erregers kann die maximal erzeugbare Winkelbeschleunigung gemäß

$$\alpha = \frac{M}{I} \quad (19)$$

berechnet werden. Zur Vereinfachung geben Hersteller von Winkelgeschwindigkeitserregern die maximalen Leistungsdaten der Erreger als Nomogramm an. In diesen Darstellungen können Grenzwerte für die Erreger unmittelbar abgelesen werden.

Zur besseren Verdeutlichung ist ein Nomogramm (beispielhaft) angegeben.

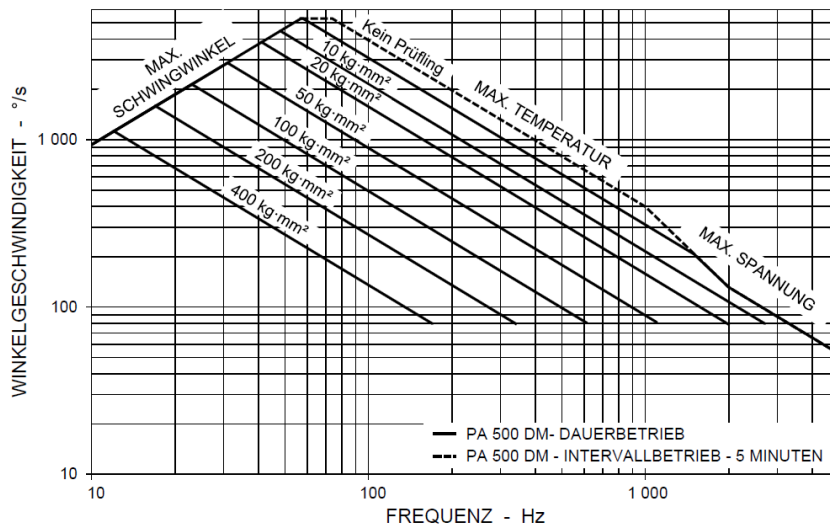


Abbildung 3: Nomogrammbeispiel für die maximalen Leistungsdaten eines Winkelgeschwindigkeitserregers

Hinweis:

Gemäß den folgenden Gleichungen kann das Massenträgheitsmoment I_{KG} eines Körpers geometrieabhängig abgeschätzt werden:

Kreisförmige Grundfläche des Körpers:

$$I_{KG} = \frac{1}{2} \cdot m_{KG} \cdot r_{KG}^2 \quad (20)$$

Rechteckige Grundfläche des Körpers:

$$I_{KG} = \frac{1}{12} \cdot m_{KG} \cdot (b_{KG}^2 + c_{KG}^2) \quad (21)$$

mit den Kenngrößen: Radius des kreisförmigen Körpers r_{KG} , Masse des Körpers m_{KG} sowie den Kantenlängen b_{KG} und c_{KG} einer rechteckigen Geometrie mit einer homogenen Masseverteilung. Die Gleichungen gelten für einen idealen, monolithischen Körper, der zentrisch in der Drehachse des Erregers angeordnet ist. Bei realen KG (Sensoren oder Messgeräte) kann das Massenträgheitsmoment aufgrund von inhomogenen Masseverteilungen deutlich abweichen.

Bei exzentrischer Montage relativ zur Drehachse ist zusätzlich ein weiteres Massenträgheitsmoment nach dem Satz von Steiner zu berücksichtigen.

9.1.1 Aufstellung des Schwingungserregers

Damit das antreibende Drehmoment vollständig für die Winkelbeschleunigung des Kalibriergegenstandes verfügbar ist, muss ein theoretisch unendlich großes Massenträgheitsmoment als „Gegenlager“ verfügbar sein. Dies gelingt näherungsweise, indem man den Schwingungserreger mit einem großen Masseblock (z.B. aus Beton) fest verbindet. Es können auch massive Metalltische eingesetzt werden. Um Kippbewegungen und Resonanzen auszuschließen, haben sich dreibeinige Metalltische mit Höhenverstellung bewährt.

Des Weiteren muss beachtet werden, dass alle Erreger auf einer möglichst planen Oberfläche verschraubt werden. Bei balligen Oberflächen kann eine Verbiegung der Erregergrundplatte zu unerwünschten Querschwingungen oder zu Fehlfunktionen der Erreger führen.

9.1.2 Störschwingungen und Querbewegungen

Im Wesentlichen gibt es drei verschiedene Arten von Querschwingungen, die auftreten und die Genauigkeit des Messergebnisses negativ beeinflussen können.

1. Störschwingungen:

Je nach konstruktiver Ausführung des Schwingungserregers entstehen frequenz- und belastungsabhängig Kipp- und/oder Taumelbewegungen des Schwingteils, die transversal oder in anderen Richtungen zur nominellen Schwingungsrichtung Querkomponenten erzeugen. Durch die Vibrationsempfindlichkeit von Winkelgeschwindigkeitssensoren entstehen so parasitäre Signalkomponenten. Um die Größenordnung der Störschwingung zu erfassen und einen Beitrag zur Messunsicherheit abzuschätzen, kann eine Messung mit einem triaxialen, translatorischen Beschleunigungsaufnehmer erfolgen. Die Anordnung des triaxialen Sensors sollte dabei im zentralen Drehpunkt (bei $r = 0$) erfolgen, da sonst die Zentripetal- und Tangentialbeschleunigung die Messung stark verfälschen können.

2. Zentripetalbeschleunigung:

Werden die Sensoren (BN und KG) außerhalb des zentralen Drehpunkts des Erregers montiert, können auftretende Zentripetalbeschleunigungen das Messergebnis negativ beeinflussen. Diese Signalanteile haben jedoch die doppelte Frequenz und können bei Einsatz eines geeigneten Messverfahrens (z.B. Sinusapproximation oder FFT-Messung) sehr gut gefiltert werden. In diesem Fall ist der Beitrag zur Messunsicherheit vernachlässigbar. Bei der Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten hingegen, die die Winkelgeschwindigkeit nach einem breitbandigen Messverfahren (RMS-Messung) ermitteln, ist der Einfluss nicht vernachlässigbar.

Bei Anordnung der Sensoren im zentralen Drehpunkt ist ein Beitrag durch die Zentripetalbeschleunigung nicht relevant.

3. Tangentialbeschleunigung:

Die Tangentialbeschleunigung tritt außerhalb des zentralen Drehpunktes tangential zur Drehbewegung auf. Die Tangentialbeschleunigung steigt proportional mit dem Abstand zum zentralen Drehpunkt an (Radius r multipliziert mit der Winkelbeschleunigung α). Im zentralen Drehpunkt ist die Tangentialbeschleunigung null.

Werden der KG und/oder die Referenz außerhalb des zentralen Drehpunkts montiert, wird eine Tangentialbeschleunigung wirksam, die als Querbeschleunigung in der Messunsicherheitsbilanz eingerechnet werden muss. Die Amplitude der Tangentialbeschleunigung kann aus dem Radius und der Winkelbeschleunigung bestimmt werden. In Verbindung mit der Querempfindlichkeit und der Beschleunigungsempfindlichkeit der verwendeten Sensoren kann ein Beitrag für die Messunsicherheitsbilanz (siehe Kapitel 12) abgeschätzt werden.

Bei Anordnung der Sensoren im zentralen Drehpunkt ist ein Beitrag durch die Tangentialbeschleunigung nicht relevant.

10 Kalibrierverfahren

10.1 Grundlagen

Abbildung 4 zeigt ein Blockschaltbild einer Kalibriereinrichtung zur Kalibrierung eines KG unter Verwendung einer Winkelgeschwindigkeitsreferenz.

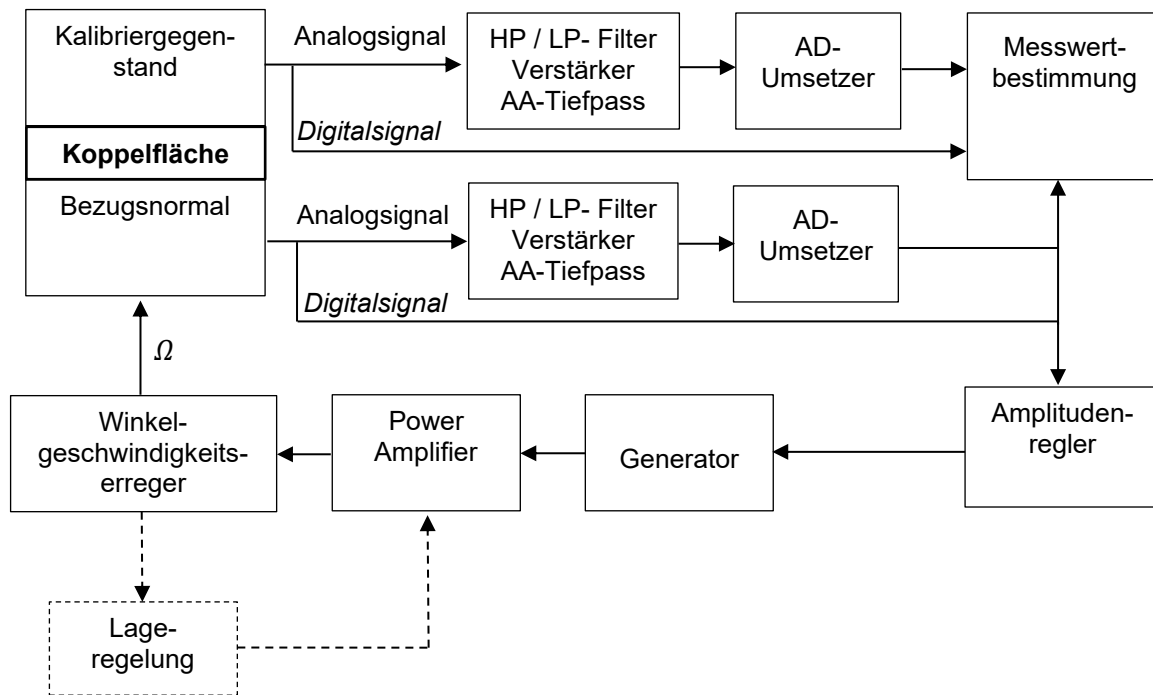


Abbildung 4: Blockschaltbild Kalibriersystem

Jeder der beiden Messkanäle besteht aus einem vom Funktionsprinzip des Sensors abhängigen Anpasser, ggf. einem Hochpass, einem Tiefpass, einem Anti-Aliasing-Tiefpass und einem A/D-Umsetzer, wobei die Eigenschaften dieser Komponenten (untere und obere Grenzfrequenz, Verstärkungskoeffizient, Taktfrequenz) variieren und somit an die Kalibrieraufgabe angepasst werden können (Parametrierung). Infolge der unvermeidbaren Bauelemente-Toleranzen weichen die tatsächlichen, komplexen Übertragungskoeffizienten sowie die frequenzabhängigen Betrags- und Phasengänge für jede der möglichen Verstärkungseinstellungen von den erwarteten Idealwerten ab. Aufgrund dieses Einflusses auf das Kalibrierergebnis ist das Übertragungsverhalten der Komponenten der Messkette zu kalibrieren und das Messergebnis entsprechend zu korrigieren.

Werden Sensoren mit einem „Digital Transducer Interface (DTI)“ eingesetzt, muss ggf. ein zusätzlicher Datenrekorder für die Kommunikation zwischen Sensor und Rechner verwendet werden.

Bei bestimmten Schwingerregern kann ein zusätzlicher Lageregler notwendig sein. Dieser Regler dient zur Stabilisierung des Erregerkopfes in einer definierten Nulllage.

10.2 Signalformen zur Anregung

Für die Anregung von Winkelgeschwindigkeitssensoren und -messgeräten sind in Übereinstimmung mit *DKD-R 3-1 Blatt 3* [2] folgende Signalformen zulässig:

1. **Sinusanregung** (gemäß *DKD-R 3-1 Blatt 3 Abschnitt 3.2* [2])
2. **Multisinusanregung** (gemäß *DKD-R 3-1 Blatt 3 Abschnitt 3.3* [2])

Weiterführend gilt auch der Abschnitt 3.4 der Richtlinie *DKD-R 3-1 Blatt 3* [2] für diese Richtlinie.

10.3 Messverfahren zur Ermittlung der Ausgangsgrößen

Auch die Messverfahren für die Ausgangsgrößen müssen konform zur Richtlinie *DKD-R 3-1 Blatt 3* [2] ausgeführt werden. Folgende Messverfahren sind zulässig:

1. Sinusapproximation (*DKD-R 3-1 Blatt 3 Abschnitt 3.5.2* [2])

Dabei ist zu beachten:

- Schmalbandige Messung mit hoher Störunterdrückung
- Rauschanteile und Klirrfaktor haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Messergebnisse
- Phasen-Frequenzgangkalibrierung möglich

2. Sinuskorrelation (*DKD-R 3-1 Blatt 3 Abschnitt 3.5.3* [2])

Dabei ist zu beachten:

- Schmalbandige Messung mit hoher Störunterdrückung
- Rauschanteile und Klirrfaktor haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Messergebnisse
- Phasen-Frequenzgangkalibrierung möglich

3. FFT-Messung

Dabei ist zu beachten:

- Schmalbandige Messung mit hoher Störunterdrückung
- Rauschanteile und Klirrfaktor haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Messergebnisse
- Phasen-Frequenzgangkalibrierung möglich
- Zusätzlicher Freiheitsgrad durch Fensterfunktion

4. Breitbandige Effektivwertmessung (*DKD-R 3-1 Blatt 3 Abschnitt 3.5.1* [2])

Dabei ist zu beachten:

- Bandbreite der Messung
- Rauschanteile, Klirrfaktor und Zentripetalbeschleunigungen haben einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Messergebnisse
- Keine Phasenmessung durchführbar

Empfohlen wird die Auswertung gemäß 1. mit der Sinusapproximation durchzuführen (vgl. *DKD-R 3-1 Blatt 3 Abschnitt 3.5.2* [2]).

11 Vorbereitung und Ablauf der Kalibrierung

11.1 Vorbereitende Maßnahmen

11.1.1 Bestimmung der Kalibrierfähigkeit

Obwohl wesentliche Maßnahmen in *DKD-R 3-1, Bl. 1, Abschnitt 4.2* [1] ausführlich dargestellt sind, sollen einige Punkte nochmals hervorgehoben werden:

Vor der eigentlichen Kalibrierung ist durch bestimmte Maßnahmen festzustellen, ob der Kalibriergegenstand kalibrierfähig ist. Dies kann durch seine äußere mechanische Beschaffenheit und innere mechanische und/oder elektrische Defekte eingeschränkt sein. Im ungünstigsten Fall stellt sich erst bei der Beurteilung des Kalibrierergebnisses heraus, dass der Kalibriergegenstand nicht kalibrierfähig war. Um dies zu vermeiden, sind die nachfolgend beschriebenen, vorgelagerten Prüfungen gewissenhaft durchzuführen.

1. Visuelle Prüfung (Zustand des Kalibriergegenstandes einschließlich der Koppelfläche, Lesbarkeit von Beschriftungen usw.)
2. Prüfung individueller elektrischer Parameter des Kalibriergegenstandes in Abhängigkeit von der Bauart des Aufnehmers (z.B. Eingangs- und Ausgangswiderstand, Isolationswiderstand, Nullsignal)
3. Eine Sweep-Betriebsart oder eine ausreichende Anzahl diskreter Frequenzen kann zur Beurteilung der Stetigkeit des Frequenzganges des KG eingesetzt werden.

11.1.2 Adaptierung der Aufnehmer

1. Die maximal zulässige Massenbelastung sowie das maximal zulässige Massenträgheitsmoment des Erregers dürfen nicht überschritten werden.
2. Die Ankopplungsflächen (Schwingungserreger und Aufnehmer) und die Adapterstiftschraube sind (z.B. mit Spiritus) zu reinigen.
3. Um die Haftreibung von KG und BN möglichst groß zu halten, sollten die Montageflächen möglichst fettfrei sein. Auf Vaseline oder andere Koppelfette ist unbedingt zu verzichten.
4. Die Adaptierung der Sensoren sollte vorzugsweise geschraubt erfolgen. Wenn eine Verschraubung nicht möglich ist, können Sensoren auch geklebt oder geklemmt werden. Folgende Klebeverbindungen sind geeignet:
 - Klebewachs
 - Cyanacrylat (Sekundenkleber), z.B. Loctite 454, HBM Z70

Hinweis: Sekundenkleber sollte nur in Ausnahmefällen (Kalibrierung bei höchsten Frequenzen) verwendet werden, da eine hohe Gefahr einer Beschädigung des Sensors beim Ablösen besteht. Die Schichtdicke ist so dünn wie möglich auszuführen. Sofern der Sensor keine Kunststoffgehäuseteile hat, kann die Klebung vorsichtig mit Aceton gelöst werden.
5. Empfohlen wird eine konzentrische Anordnung der Sensoren in der zentralen Drehachse des Erregers (Siehe Abschnitt 8.2).
6. Aufnehmerkabel sind möglichst rückwirkungsfrei und weit entfernt vom Magnetfeld des Schwingungserregers zu verlegen und zu fixieren. Aufnehmerkabel, die vom Kunden beigestellt werden, sollten gemeinsam mit dem Kalibriergegenstand kalibriert werden.

11.2 Ablauf der Kalibrierung

Der Ablauf der Kalibrierung hängt vom verwendeten Kalibriersystem ab. Beim heutigen Stand der Technik erfolgt dies von einem PC-gesteuerten Arbeitsplatz aus, wobei der Bediener über weite Strecken vom System geführt und zu bestimmten Handlungen aufgefordert wird. Der prinzipielle Ablauf einer Kalibrierung ist in der *DKD-R 3-1 Blatt 3* [2] ausführlich beschrieben und gilt ebenso für diese Richtlinie.

Die Auswahl der Winkelgeschwindigkeitsamplitude ist sorgfältig auszuführen. Entweder es werden Kunden- oder Normvorgaben angewendet oder die Vorgabe wird auf der Basis von Grundlagenwissen des Kalibrierlaboratoriums durchgeführt. Gibt es keine konkreten Vorgaben, hat sich für die Kalibrierung des Frequenzganges folgende Winkelgeschwindigkeitsamplitude etabliert:

Frequenzgangmessung: bei 50 – 70% des Messbereichsendwerts des KG

Zusätzlich ist es sinnvoll, sofern möglich, eine Amplitudenlinearitätsmessung bei einer festen Frequenz vorzugsweise aus der folgenden Wertefolge auszuführen:

1%, 2%, 5% 10% 20% 50% 100% des Messbereichsendwert des KG.

Zu beachten ist jedoch die maximal zulässige Winkelbeschleunigung für den KG und für das Normal. Eine Anregung mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeitsamplitude führt bei zunehmenden Frequenzen zu entsprechend hohen Winkelbeschleunigungen. Zu hohe Winkelbeschleunigungen können zu Beschädigungen des Kalibriergegenstands und/oder des Normals führen.

11.3 Einflussfaktoren und praktische Hinweise

Bei der praktischen Kalibriertätigkeit treten immer wieder Effekte auf, die das Messergebnis negativ beeinflussen. Im Folgenden sind einige Störgrößen und deren Ursachen aufgeführt:

1. Der Aufstellungsort des Schwingungserregers ist nicht ideal gewählt
→ Auftreten von Relativbewegung, Einwirkung durch Fremderschütterungen, Sonneneinstrahlung, Zugluft, Temperaturwechsel.
2. Zulässige Umgebungstemperatur überschritten
→ Systematische Abweichung der Kalibrierergebnisse, die nicht durch die Messunsicherheitsbilanz abgedeckt sind.
3. Zulässige Luftfeuchte unterschritten
→ Schädigungsrisiko der Sensoren durch elektrostatische Entladung (ESD).
4. Kabel sind ungünstig geführt bzw. befestigt oder nicht ausreichend flexibel
→ Auftreten von triboelektrischen Effekten und parasitären Kräften.
5. Kabel sind elektrisch ungeeignet
→ Auftreten von Kontaktproblemen (Impedanzänderungen).

6. Die Koppelflächen des Normals und des Kalibriergegenstands weisen unzulässige Unebenheiten oder Verschmutzungen auf
→ Auftreten von Relativbewegung, eventuell Schädigung durch Montage.
7. Mangelhafte Konstruktion, Oberflächengüte und Materialwahl der Adaptionen
→ Zusätzliche Resonanzen und Unstetigkeiten im Kalibrierergebnis, Resonanzerscheinung im Messaufbau.
8. Rasche Temperaturänderungen
→ Auftreten von pyroelektrischen Effekten.
9. Es wurden Erdschleifen gebildet oder Masseverbindungen fehlen (z.B. bei Aufnehmern, bei denen das Gehäuse nicht mit dem Schirm des Steckverbinders verbunden ist)
→ Auftreten von elektrischen Störungen oder 50 Hz-Brummen.
10. Starke akustische oder elektro-magnetische Felder in der Nähe
→ Auftreten von parasitären elektrischen Störsignalen.

Um einige dieser Einflussfaktoren bereits während der Kalibrierung beurteilen zu können, sind die grafische Anzeige der Signale beider Messkanäle oder zumindest die Klirrfaktoren und die Anzeige der Standardabweichungen der arithmetischen Mittelwerte der beiden Ausgangsgrößen von großer Bedeutung (Stabilität der Ausgangssignale). Beispielsweise kann nach der Signalisierung einer Übersteuerung, einer schlechten Kabelführung oder einer falschen Montage die Wirkung von Gegenmaßnahmen sofort beobachtet werden. Auch starke Unterschiede zwischen den beiden Standardabweichungen sind ein Indiz für bestimmte Mängel. So kann ein hoher Wert im Kalibriergegenstandskanal bei niedrigem Wert der Standardabweichung im Normalkanal ein Hinweis auf Mängel im Kalibriergegenstandskanal oder auf einen minderwertigen Kalibriergegenstand sein. Ebenso kann ein erhöhtes, dem Nutzsignal überlagertes Rauschen zu einer erhöhten Standardabweichung führen. In diesem Fall ist das Nutz-Störsignal Verhältnis ungünstig. Eine Verbesserung könnte durch einen zusätzlichen Filter oder wenn möglich durch Erhöhung der Winkelgeschwindigkeitsamplitude erreicht werden.

11.4 Wartung und Kontrolle

Beispiele für präventive Wartungsmaßnahmen (planmäßig):

1. Kabel und Kabelhalterungen prüfen.
2. Güte der Aufspannflächen prüfen und Flächen ggf. läppen.

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

3. Durchführung von Vergleichsmessungen.
4. Regelmäßige laborinterne Überprüfung der Kalibriereinrichtung durch Kalibrierung eines geeigneten Referenzaufnehmers.
5. Test der signalführenden Komponenten mit verschiedenen Testsignalen.

12 Messunsicherheit

Die grundlegende Vorgehensweise zur Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz ist in Blatt 1 [5] dieser Richtlinie erläutert. Im Folgenden sollen Aspekte beleuchtet werden, die für die Kalibrierung mit Sinusanregung nach dem Vergleichsverfahren relevant sind. Eine für die Messgröße Winkelgeschwindigkeit aufgestellte Messunsicherheitsbilanz lässt sich nicht direkt auf abgeleitete Messgrößen wie Drehwinkel oder Winkelbeschleunigung übertragen. In solch einem Fall müssen typischerweise Anpassungen vorgenommen werden.

Für die hier durchgeführte Kalibrierung mittels Vergleich zu einem Winkelgeschwindigkeits-GN gilt für den Betrag des Übertragungskoeffizienten in Anlehnung an Gleichung (15) die Modellgleichung (Produktmodell):

$$\hat{S}_{\text{KG}} = \hat{S}_{\text{GN}} \cdot \frac{\hat{G}_{\text{GN}}}{\hat{G}_{\text{KG}}} \cdot \frac{\hat{U}_{\text{KG}}}{\hat{U}_{\text{GN}}} \cdot \prod_{i=1}^N K_i(f, \hat{\Omega}) \quad (22)$$

mit

$$\prod_{i=1}^N K_i(f, \hat{\Omega}) = K_{\text{IA}}(f, \hat{\Omega}) \cdot K_{\text{Vgl}}(f, \hat{\Omega}) \cdot K_{\text{Q}}(f, \hat{\Omega}) \cdot K_{\text{Vib}}(f, \hat{\Omega}) \cdot \dots \quad (23)$$

$$\cdot K_{\text{TK}}(f, \hat{\Omega}) \cdot K_{\text{L}}(f, \hat{\Omega}) \cdot K_{\text{R}}(f, \hat{\Omega}) \cdot \dots$$

Ergebnisgröße:

\hat{S}_{KG} Ergebnis, Betrag des Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes

Eingangs-/ Bestimmungsgrößen:

$\hat{\Omega}$ Durch die Kalibriereinrichtung erzeugte Amplitude der Winkelgeschwindigkeit

\hat{U}_{GN} Amplitude des Ausgangssignals der Messkette des GN

$U_{\text{GN},0}$ Nullsignal (Offset-Signal) des GN (bei Effektivwertmessung relevant)

\hat{U}_{KG} Amplitude des Ausgangssignals der Messkette des KG

$U_{\text{KG},0}$ Nullsignal (Offset-Signal) des KG (bei Effektivwertmessung relevant)

\hat{S}_{GN} Betrag des Übertragungskoeffizienten des GN

\hat{G}_{GN} Betrag des Übertragungskoeffizienten der dem GN beigestellten Verstärker/Anpasser und/oder Filter

\hat{G}_{KG} Betrag des Übertragungskoeffizienten der dem KG beigestellten Verstärker/Anpasser und/oder Filter

Einflussgrößen:

K_{IA}	Korrektionsfaktor; zeitliche Instabilität (GN, Anpasser/Verstärker und Filter)
K_{Vgl}	Korrektionsfaktor; Vergleichspräzision inkl. Montage
K_Q	Korrektionsfaktor; Querempfindlichkeit (Zentripetalbeschleunigung, Tangentialbeschleunigung)
K_{Vib}	Korrektionsfaktor; Vibrationsempfindlichkeit
K_{TK}	Korrektionsfaktor; Temperaturabhängigkeit
K_L	Korrektionsfaktor; Linearitätsabweichung
K_R	Korrektionsfaktor; residuale Einflüsse (bspw. Erdrotation)

Bei Bestimmung der Spannungen mittels Effektivwertmessung sind die Spannungsamplituden (\hat{U}_X) von GN und KG in Gl. (22) durch die jeweilige Differenz des gemessenen Effektivwertes und einer evtl. vorhandenen Offsetspannungen ($U_X - U_{X,0}$) zu ersetzen.

Sowohl Eingangs-/Bestimmungsgrößen als auch Einflussgrößen sind typischerweise in der Messunsicherheitsbilanz zu betrachten. Die Einflussgrößen haben dabei im Produktmodell (22) typischerweise einen Erwartungswert von 1.

Für die Phasenverschiebung des frequenzabhängigen Übertragungskoeffizienten findet bei der Messunsicherheitsbetrachtung ein Summenmodell in Ergänzung zu Gleichung (16) für die Modellgleichung Anwendung:

$$\varphi_{S,KG} = \varphi_{S,GN} + \varphi_{G,GN} + \varphi_{U,KG} - \varphi_{U,GN} - \varphi_{G,KG} + \sum_{i=1}^N \varphi_i(f, \hat{\Omega}) \quad (24)$$

mit

$$\sum_{i=1}^N \varphi_i(f, \hat{\Omega}) = \varphi_{IA}(f, \hat{\Omega}) + \varphi_{Vgl}(f, \hat{\Omega}) + \varphi_Q(f, \hat{\Omega}) + \varphi_{Vib}(f, \hat{\Omega}) + \dots \quad (25)$$

$$\varphi_{TK}(f, \hat{\Omega}) + \varphi_L(f, \hat{\Omega}) + \varphi_R(f, \hat{\Omega}) + \dots$$

Ergebnisgröße:

$\varphi_{S,KG}$	Ergebnis, Phasenverschiebung des Übertragungskoeffizienten des Kalibriergegenstandes
------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Eingangs-/ Bestimmungsgrößen:

$\hat{\Omega}$	Durch die Kalibriereinrichtung erzeugte Amplitude der Winkelgeschwindigkeit
$\varphi_{S,GN}$	Phasenverschiebung des GN (aus dessen Kalibrierung)
$\varphi_{G,GN}$	Phasenverschiebung von Anpasser/Verstärker und/oder Filter in der Messkette des GN
$\varphi_{U,KG}$	(Initial-)Phase der Ausgangsspannung des KG
$\varphi_{U,GN}$	(Initial-)Phase der Ausgangsspannung des GN
$\varphi_{G,KG}$	Phasenverschiebung von Anpasser/Verstärker und/oder Filter in der Messkette des KG

Einflussgrößen:

φ_{IA}	Korrektion; zeitliche Instabilität (GN, Anpasser/Verstärker und Filter)
φ_{Vgl}	Korrektion; Vergleichspräzision inkl. Montage
φ_Q	Korrektion; Querempfindlichkeit (Zentripetalbeschleunigung, Tangentialbeschleunigung)
φ_{Vib}	Korrektion; Vibrationsempfindlichkeit
φ_{TK}	Korrektion; Temperaturabhängigkeit
φ_L	Korrektion; Linearitätsabweichung
φ_R	Korrektion; residuale Einflüsse

Die Indizes der Korrektursummanden bezeichnen hier die gleichen Effekte wie bereits in der Liste für den Betrag des Übertragungskoeffizienten weiter oben aufgeführt. Der Erwartungswert der Korrekturen ist im Summenmodell typischerweise 0.

Die aufgeführten Listen von Einflussgrößen sind nicht notwendigerweise vollständig und müssen gegebenenfalls je nach KG, Messeinrichtung und Verfahrensdetails ergänzt werden.

13 Kalibrierschein

Die Kalibrierscheine sollten die Anforderungen der aktuell gültigen DIN EN ISO/IEC 17025 [6] einhalten und um folgende Punkte erweitert werden, sofern diese für die durchgeführte Kalibrierung relevant sind:

1. Messbedingungen:

Grundsätzlich sind alle Messbedingungen, die einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben können, im Kalibrierschein zu dokumentieren. Dazu gehören beispielsweise:

- Lage des Kalibriergegenstands im Erdschwerefeld und Achsbezeichnung bei einem mehrachsigen Kalibriergegenstand
- Befestigung (bei Verschraubung Angabe des Drehmoments)
- Anschlusskabel (Hersteller, Typ, Länge, Kapazität, Steckverbinder)
- Anregungsdaten bei Bezugsfrequenz (Bezugsfrequenz, Amplitude oder Effektivwert der Winkelgeschwindigkeit in rad/s oder °/s)
- Temperatur des Kalibriergegenstandes während der Kalibrierung (wenn sie gemessen wurde) oder deren Abschätzung
- Art der elektrischen Versorgung
- Verwendete Hilfsmessgeräte mit Einstellungen
- Bauartbedingte Messbedingungen, z. B. Kabellänge, Art der Befestigung des Kalibriergegenstandes; verwendete Schnittstellen bei Digitalsensoren
- Bauartbedingte Kenngrößen, z. B. Nullsignal
- Kenngrößen und Charakteristika von Anpassern, Filtern u.ä.

2. Messergebnisse:

- Übertragungskoeffizient und Standardabweichung bei der Bezugsfrequenz
- Tabellierte Angaben von: Frequenz / Winkelgeschwindigkeitsamplitude oder - Effektivwert / komplexer Übertragungskoeffizient nach Betrag und ggf. Phasenverschiebungswinkel / Abweichung zur Bezugsfrequenz in %, ggf. in dB bzw. in rad oder °. Bei Linearitätsmessungen ist die Tabelle entsprechend abzuändern, ggf. ist eine Einwertangabe innerhalb eines definierten Gültigkeitsbereichs zu bestimmen.

Daneben können optional Fakten und Begleitumstände eingetragen werden, falls diese einen Bezug zum Kalibriervorgang haben, z. B. "dritte Wiederholung", "turnusmäßige Rekalibrierung", "Überprüfung nach Stoßbeanspruchung" usw.

Auch können zusätzliche Ergebnisse in die Ergebnis-Tabelle eingefügt werden, wie z. B. Standardabweichungen, Anzahl der Mittelungen und Klirrfaktoren.

Es wird empfohlen, die Ergebnisse einschließlich der Messunsicherheit tabellarisch und grafisch darzustellen.

14 Literaturverzeichnis

- [1] DKD-R 3-1 Bl.1; Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen; Deutscher Kalibrierdienst, April 2019
- [2] DKD-R 3-1 Bl.3; Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Sinus- und Multisinusanregung; Deutscher Kalibrierdienst, Mai 2020
- [3] DIN ISO 16063-21; Verfahren zur Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern – Teil 21: Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger, August 2016
- [4] ISO 16063-15; Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry, August 2006
- [5] DKD-R 3-13 Bl.1; Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten - Quasistatische Kalibrierung, März 2024
- [6] DIN EN ISO/IEC 17025:2018; Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien; Beuth-Verlag, März 2018

Weitere dieser Richtlinie zugrundeliegende Literatur, auf die nicht explizit im Text verwiesen wird:

- [7] ISO Guide 98-3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), September 2008
- [8] EA-4/02 M: 2022; Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, European Accreditation, rev. 03, 04 April 2022
- [9] ISO 2041; Mechanical vibration, shock and condition monitoring – Vocabulary, Oktober 2018
- [10] ISO 16063-15; Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry, August 2006

15 Änderungshistorie

Revision	Datum	Änderungen
0	05/2026	Erstversion



DKD-Geschäftsstelle
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100

38116 Braunschweig
Tel.: +49 531 592-8021

E-Mail: dkd@ptb.de

Für weitere Informationen wenden
Sie sich bitte an unsere Geschäftsstelle
oder besuchen Sie unsere Website:

<https://www.ptb.de/cms/metrologische-dienstleistungen/dkd.html>



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut