

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



Richtlinie
DKD-R 3-13

Kalibrierung von
Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten


Blatt 1

Quasistatische Kalibrierung

Ausgabe 03/2024

<https://doi.org/10.7795/550.20240301>



	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	2 / 20

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

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	3 / 20

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-13 Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten – Blatt 1 Quasistatische Kalibrierung, Ausgabe 03/2024, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20240301

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



Autoren:

Dr. Thomas Bruns, PTB;

Dr. Heiko Müller, VW;

Philipp Begoff, Spektra;


Dr. Andreas Marroquin, mg sensor;

Oliver Derichs, DSA;

Dr. Marcus Winter, Polytec

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.

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	4 / 20

Vorwort

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


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

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

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	6
2	Begriffsbestimmungen.....	6
3	Symbole	7
4	Ziel der Kalibrierung	8
5	Anforderungen an die Kalibrierfähigkeit.....	8
6	Umgebungsbedingungen	8
7	Referenzempfänger.....	8
8	Kalibriereinrichtung und Signalübertragung.....	8
9	Kalibrierverfahren	10
9.1	Alternierendes Stufenverfahren.....	10
9.2	Monotones Stufenverfahren	10
10	Signalerfassung	11
11	Auswertung.....	11
12	Messunsicherheit.....	13
13	Kalibrierschein	15
14	Literaturverzeichnis.....	16
	Anhang A: Rotationslaservibrometer	17

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	6 / 20

1 Zweck und Geltungsbereich

Die Richtlinie geht auf Kalibrierverfahren ein, mit denen Winkelgeschwindigkeitsmessgeräte (mit analogen und digitalen Ausgangssignalen) kalibriert werden können. Dieses Blatt 1 behandelt statische oder quasistatische Kalibrierverfahren.

Die statischen Verfahren erlauben eine Aussage über die Güte der Linearität des Winkelgeschwindigkeitsmessgeräts, sie ermöglichen aber keine Aussage über das dynamische Übertragungsverhalten der Messgeräte.

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


2 Begriffsbestimmungen

Abkürzungen	Erläuterung
ADU	Analog/Digital-Umsetzer
MG	Messgerät
BN	Bezugsnormal
KE	Kalibriereinrichtung
KG	Kalibriergegenstand
RLV	Rotationslaservibrometer

3 Symbole

Für die Anwendung dieser DKD-Richtlinie gelten die in folgender Tabelle genannten Symbole.

Formelzeichen	typische Einheit	Erläuterung
Ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit; andere mögliche Einheit: °/s
U_{Ref}	mV	Ausgangssignal eines Winkelgeschwindigkeits-Referenzempfängers
$U_{\text{Ref},0}$	mV	Nullsignal (Offset- Signal) der Referenz
$S_{u\Omega,\text{Ref}}$	mV/(rad/s)	Übertragungskoeffizient eines Winkelgeschwindigkeits-Referenzempfängers
j		Laufindex für verschiedene Winkelgeschwindigkeiten
Φ_{Mittel}	rad	mittlere Winkelauflösung eines (inkrementalen) Winkel-Referenzempfängers
f_{Osz}	Hz	Oszillatorfrequenz (eines Schwingquarzes zur Zeitbestimmung)
n		Anzahl der Quarzschwingungen während des Durchfahrens einer Teilungsperiode des Winkel- Referenzempfängers
$S_{u\Omega}$	mV/(rad/s)	Übertragungskoeffizient; andere mögliche Einheiten: mV/(°/s), LSB/(rad/s), LSB/(°/s)
U_A	mV	Messwert des KG-Ausgangssignals, z.B. in mV oder LSB
$U_{A,0}$	mV	Nullsignal (Offset- Signal) des Kalibriergegenstandes
K_{IA}		Einflussfaktor; zeitliche Instabilität
K_{Vgl}		Einflussfaktor; Vergleichspräzision inkl. Montage
K_Q		Einflussfaktor; Querempfindlichkeit
K_{TK}		Einflussfaktor; Temperaturabhängigkeit
K_L		Einflussfaktor; Linearitätsabweichung
K_R		Einflussfaktor; residuale Einflüsse

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	8 / 20

4 Ziel der Kalibrierung

Das Ziel der Kalibrierung ist die Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines Winkelgeschwindigkeitsmessgerätes.

Bei den statischen Verfahren wird ein Übertragungskoeffizient bestimmt, indem das Ausgangssignal des Kalibriergegenstands (KG) auf eine eingestellte, konstante Winkelgeschwindigkeit bezogen wird. In der Regel wird dies bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten ausgeführt, so dass eine Aussage über die Linearität des KG getroffen werden kann.

5 Anforderungen an die Kalibrierfähigkeit

Anforderungen an die Kalibrierfähigkeit von Beschleunigungsmessgeräten sind in der DKD-R 3-1, Blatt 1 ausführlich beschrieben. Sie gelten für die Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten in gleicher Weise.

6 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.

7 Referenzempfänger

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die eingestellte Winkelgeschwindigkeit zu bestimmen. Wird ein (inkrementaler) Winkel-Referenzempfänger eingesetzt, müssen die gemessenen Winkel in Bezug zur Zeit gebracht werden, um die resultierende Winkelgeschwindigkeit zu berechnen.

Wird ein Winkelgeschwindigkeits-Referenzempfänger eingesetzt, ist darauf zu achten, dass er konstante Winkelgeschwindigkeiten messen kann, also kein Hochpassverhalten aufweist. Darüber hinaus ist sein Messergebnis direkt als Referenz geeignet.

Die Anwendung von Winkelbeschleunigungsaufnehmern als Referenz für die (quasi-)statische Winkelgeschwindigkeit ist aufgrund der stets auftretenden Integrationsfehler auszuschließen.

In jedem Fall sind die Referenzmessgrößen in metrologisch rückgeführter Form zu messen.

8 Kalibriereinrichtung und Signalübertragung

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Kalibriereinrichtung (KE). Die KE besteht aus einem Antrieb, der über eine Verbindungswelle die Rotation einer ebenen und zur Welle rechtwinkligen Aufspannfläche erzeugt. Die Rotation der Aufspannfläche wird über einen Referenzempfänger erfasst. Liefert der Referenzempfänger eine Winkelgröße als Ausgangssignal, so ist dieses über eine rückgeführte Zeitmessung in die Winkelgeschwindigkeit umzurechnen.

Das Kalibriersystem wertet die Referenzwinkelgeschwindigkeit kontinuierlich aus. Sobald gewisse Stabilitätskriterien erfüllt sind, wird das Ausgangssignal des KGs gemessen.

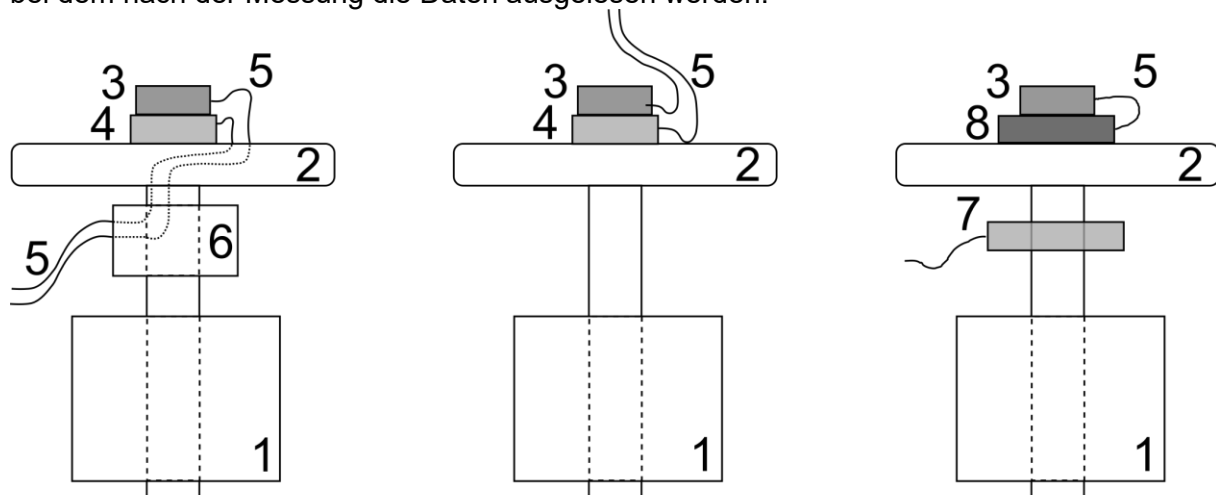
Die KE kann sowohl mit vertikal als auch mit horizontal ausgerichteter Drehachse ausgeführt sein.

Normalerweise wird von den Herstellern von Winkelgeschwindigkeitsaufnehmern die Drehrichtung mit positivem Ausgangssignal auf dem Aufnehmergehäuse und/oder im Datenblatt angegeben. Diese Richtungsdefinition durch den KG wird für die Definition der

positiven Winkelgeschwindigkeit der KE für den Zweck der Kalibrierung übernommen. Wird der KG in positiver Richtung gedreht, so sollte er ein positives Ausgangssignal erzeugen, so dass sich gemäß Gl. 3 ein positiver Übertragungskoeffizient ergibt. Ist das Ausgangssignal des KGs trotz positiver Drehrichtung negativ, ergibt sich entsprechend ein negativer Übertragungskoeffizient.

Wird der KG (ohne Entkopplung) direkt mit einer stationären Datenerfassungsanlage verbunden, ist die Anzahl an Umdrehungen um die eigene Achse durch das Kalibriersystem begrenzt (mittlere Darstellung). Die Drehrichtung muss dann regelmäßig umgekehrt werden. Aufgrund des Mitdrehens des Anschlusskabels muss auch die Kabelführung mit einer entsprechenden Schlaufe sorgsam gewählt werden. Eine mögliche Beschädigung des Anschlusskabels begrenzt die maximal mögliche Winkelgeschwindigkeit und Anzahl an Umdrehungen. Die gewünschte Winkelgeschwindigkeit kann nicht beliebig lang konstant aufrecht erhalten bleiben.

Übersteigt die Anzahl an Umdrehungen die Flexibilität der Sensoranschlussleitung und muss diese deshalb von der Drehbewegung entkoppelt werden, kann die Entkopplung über einen Schleifringübertrager (Darstellung links) oder ein Telemetriesystem erfolgen. Alternativ kann auch ein sich mitdrehendes Datenerfassungssystem (Darstellung rechts) verwendet werden, bei dem nach der Messung die Daten ausgelesen werden.



- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1 Antrieb | 5 Aufnehmeranschlusskabel |
| 2 Drehteller | 6 Schleifringübertrager |
| 3 Kalibriergegenstand (KG) | 7 Referenz-Winkelaufnehmer |
| 4 Referenzaufnehmer | 8 Datenerfassungssystem |

Abbildung 1: Prinzipdarstellung von Aufbau und Signalübertragung einer Winkelgeschwindigkeits-KE; links über einen Schleifringübertrager, in der Mitte über die flexible Anschlussleitung, rechts über eine sich mitbewegende Datenerfassungsanlage

Die untere Grenze der realisierbaren Winkelgeschwindigkeit hängt vom Signal-/Rausch- bzw. Auflösungsverhältnis sowie ggf. der Stabilität des Nullsignals (Offsets) der Referenz ab. Das maximal einstellbare Winkelgeschwindigkeitsniveau an der KE hängt stark vom Erreger und den mechanischen Komponenten ab. Die rotierende Masse und Unwucht sowie das Mitdrehen des Anschlusskabels können die maximal mögliche Winkelgeschwindigkeit begrenzen.

Die obere Grenze für KEen ohne Schleifringübertrager bekannter Anlagen liegt derzeit bei maximal 4800 °/s.

Marktübliche Systeme mit Schleifringübertrager können derzeit maximal Winkelgeschwindigkeiten von bis 50 000 °/s realisieren.

9 Kalibrierverfahren

9.1 Alternierendes Stufenverfahren

Der Erreger dreht im Wechsel in die eine, anschließend in die andere Richtung. Dies wird bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten wiederholt. In der Regel wird dieses Verfahren angewandt, wenn die KE aufgrund einer fehlenden Entkopplung des Sensoranschlusskabels nur eine begrenzte Anzahl an Umdrehungen zerstörungsfrei zulässt.

Abbildung 2 zeigt einen typischen Signalverlauf beim alternierenden Stufenverfahren. Hier dreht der Erreger zunächst mit der kleinsten negativen Winkelgeschwindigkeit, anschließend dreht er zurück mit kleinster positiver Winkelgeschwindigkeit; dies setzt sich mit der gewünschten Anzahl von Winkelgeschwindigkeitsniveaus bis zur größten Winkelgeschwindigkeit der Kalibrierung fort. Da die Datenaufnahme hier jeweils bei konstanter Abtastfrequenz über einen bestimmten Winkel (z. B. eine Umdrehung) erfolgt, nimmt die Anzahl der Messwerte pro Winkelgeschwindigkeitsniveau mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit ab.

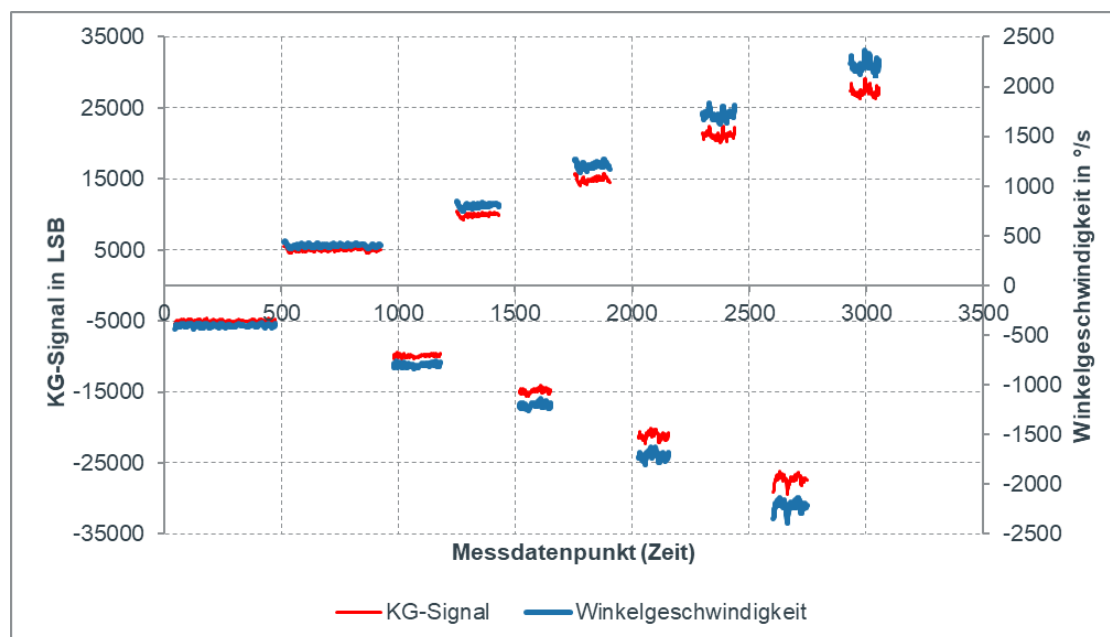


Abbildung 2: Signalverlauf von Kalibriergegenstand und Normal beim Stufenverfahren ohne Schleifringübertragung

9.2 Monotones Stufenverfahren

Beim monotonen Stufenverfahren wird der Drehteller durch den Erreger auf eine konstante Winkelgeschwindigkeit gebracht, die für eine gewünschte Mittelwertbildung über eine beliebige Anzahl an Umdrehungen konstant gehalten werden kann.

Nach der Messung erfolgt eine Veränderung der Winkelgeschwindigkeit auf ein neues Niveau, um so sukzessive den gesamten Kalibrierbereich abzudecken. Abbildung 3 zeigt einen möglichen Ablauf.

In der Regel wird dieses Verfahren angewandt, wenn das Sensoranschlusskabel über einen Schleifringübertrager, über ein Telemetriesystem oder über eine mitdrehende Datenerfassungsanlage entkoppelt ist.

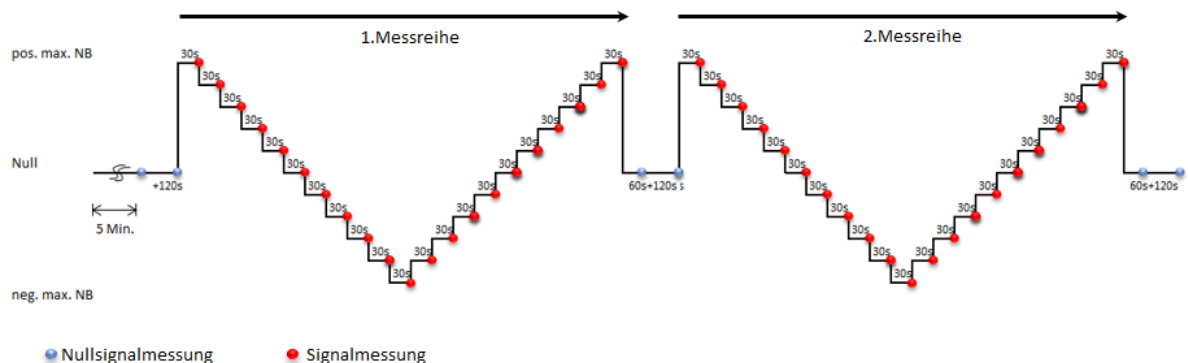


Abbildung 3: Signalverlauf von Kalibrierggegenstand und Normal beim monotonen Stufenverfahren

10 Signalerfassung

Bei beiden beschriebenen Verfahren werden zur Kommunikation und Signalanpassung verschiedene Elektronikkomponenten benötigt, welche die Signale verstärken, analog/digital umsetzen und/oder in gewünschter Weise an einen Rechner weitergeben können. Die Einstellungen sollten so gewählt werden, dass eine hinreichende Aussteuerung des AD-Umsetzers entsteht.

Bei mehrkanaligen Aufnehmern können über die parallele Messung der jeweils orthogonalen Richtungen die Querempfindlichkeiten bestimmt werden.

Um eine Aussage des Aufnahmeverhaltens über den gesamten Kalibrierbereich zu erhalten, sollten die Anzeigewerte des KG bei mindestens ± 5 ($\cong 10$) annähernd äquidistant verteilt, positiven und negativen Winkelgeschwindigkeiten bestimmt werden.


Vor der Kalibrierung sollte das Nullsignal des KGs bestimmt und dokumentiert werden. Signifikante Änderungen des Nullsignals im Vergleich zu dem bei der vorhergehenden Kalibrierung bestimmten Nullsignal lassen Rückschlüsse auf eine Veränderung des KG-Verhaltens seit der letzten Kalibrierung zu.

Aufgrund von Temperaturdrift können Messwerte eines KGs (z. B. MEMS-Gyroskope) je nach Umgebungsbedingung zum Teil deutlich variieren, wenn der KG in Ruhelage ist. Die Hersteller solcher Messgeräte empfehlen daher vor einer Messung das Tarieren des Messgerätes, um auf diese Weise Abweichungen der Messwerte durch Temperaturunterschiede bzw. Temperaturdrift zu eliminieren. In solchen Fällen ist auch vor der Kalibrierung ein Tarieren des KG durchzuführen und dies im Kalibrierschein zu vermerken.

11 Auswertung

Nach der Datenaufnahme ergibt sich der Übertragungskoeffizient des Messgeräts, indem das Ausgangssignal des KGs auf die durch den Referenzaufnehmer bestimmte Winkelgeschwindigkeit bezogen wird.

Zu Beginn der Messung sind die Nullsignale (Offset-Spannungen) der Referenz sowie des KGs zu erfassen ($U_{Ref,0}$; $U_{A,0}$). Dazu müssen beide Aufnehmer in Ruhe gelagert und die Nullsignale über einen ausreichend langen Zeitraum ermittelt werden. Diese sind zu protokollieren und für die weitere Berechnung der Winkelgeschwindigkeit Ω_j und des Übertragungskoeffizienten $S_{u\Omega}(\Omega_j)$ zu verwenden. Werden die Nullsignale nicht für die Berechnung in den Ansatz gebracht, ist ein zusätzlicher Beitrag in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	12 / 20

Unter Einbeziehung des Nullsignals $U_{\text{Ref},0}$ kann die bereitgestellte Winkelgeschwindigkeit Ω_j wie folgt berechnet werden, wenn der Referenzaufnehmer ein Winkelgeschwindigkeitsaufnehmer ist:

$$\Omega_j = \frac{U_{\text{Ref},j} - U_{\text{Ref},0}}{S_{u,\Omega,\text{Ref}}} \quad (1)$$

Ist der Referenzaufnehmer ein inkrementaler Winkelaufnehmer, ergibt sich:

$$\Omega_j = \frac{\Phi_{\text{Mittel,Ref}} \cdot f_{\text{Osz,Ref}}}{n_j} \quad (2)$$

Die Winkelgeschwindigkeit muss in den SI-konformen Einheiten rad/s oder °/s angegeben werden; ergänzend sind andere kundenspezifische Angaben möglich, z.B. deg/s.

Die Ausgangsgrößen von Referenz und KG sind in der Regel elektrische Spannungen. Wenn andere Ausgangsgrößen vorliegen (z. B. Digitalwerte in LSB bei digitalen Sensoren), sind die Spannungen in den aufgeführten Gleichungen durch diese Größen zu ersetzen.

Bei anzeigenden Geräten oder einem Digitalwert als Ausgangssignal muss kein Anpasser/Anzeiger vom Laboratorium beigestellt werden, daher entfällt die entsprechende Messunsicherheit des Anpassers/Anzeigers, mit der die Spannungen $U_{A,j}$ und $U_{A,0}$ bestimmt werden. In diesem Fall ist besonders darauf zu achten, einen Messunsicherheitsanteil aufgrund der Auflösung / Schwankungsbreite des Ausgangssignals zu berücksichtigen.

Als Übertragungskoeffizient des KGs für die Winkelgeschwindigkeit Ω_j folgt:

$$S_{u,\Omega}(\Omega_j) = \frac{U_{A,j} - U_{A,0}}{\Omega_j} \quad (3)$$

Indem bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeitsniveaus die Ausgangssignale des KGs bestimmt werden, kann durch eine Regressionsrechnung ein einzelner Wert für das Übertragungsverhalten in dem betrachteten Winkelgeschwindigkeitsbereich bestimmt werden (Einwertangabe). Die verschiedenen Methoden sind in der DKD-R 3-1, Blatt 2, Abschnitt 6 *Auswertung* beschrieben.


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

Hier wird vorzugsweise die Bestimmung einer Geradengleichung mit Angabe des Ordinatenabschnittes empfohlen (Toleranzbandmethode).

Sind $\Delta U_{A,j} = U_{A,j} - U_{A,0}$ die um das Nullsignal korrigierten Ausgangswerte des KG bei den zugehörigen (mittels Referenz ermittelten) Winkelgeschwindigkeiten Ω_j , so folgt nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate für die gesuchte Steigung \tilde{S}_Ω der Geraden von $\Delta U_{A,j}$ über Ω_j :

$$\tilde{S}_\Omega = \frac{n \sum \Omega_j \cdot \Delta U_{A,j} - \sum \Omega_j \cdot \sum \Delta U_{A,j}}{n \sum \Omega_j^2 - (\sum \Omega_j)^2} \quad (4)$$

Der Ordinatenabschnitt berechnet sich gemäß

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	13 / 20

$$\Delta U_{A,0} = \frac{\sum \Omega_j^2 \cdot \sum \Delta U_{A,j} - \sum \Omega_j \cdot \sum \Omega_j \cdot \Delta U_{A,j}}{n \sum \Omega_j^2 - (\sum \Omega_j)^2} \quad (5)$$

Wenn die Ausgangswerte bereits im Vorfeld um das Nullsignal korrigiert wurden, sollte der Ordinatenabschnitt nur noch einen kleinen Betrag haben.

Soll (z. B. auf Kundenwunsch) bei der Auswertung eine Geradengleichung durch den Ursprung bestimmt werden, berechnet sich die Geradensteigung nach:

$$\tilde{s}_\Omega = \frac{\sum \Omega_j \cdot \Delta U_{A,j}}{\sum \Omega_j^2} \quad (6)$$

Für die Gleichungen wurden hier vereinfachend gleiche Messunsicherheiten bei den eingehenden Messgrößen angenommen (sonst wäre noch eine entsprechende Gewichtung notwendig).

12 Messunsicherheit

Als mathematisches Modell zur Bestimmung des Übertragungskoeffizienten eines Winkelgeschwindigkeits-MG kann ein Produktmodell verwendet werden. Bei Einsatz eines Winkelgeschwindigkeits-Referenzaufnehmers ergibt sich:

$$S_{u\Omega} = \frac{U_{A,j} - U_{A,0}}{\Omega_j} \cdot \prod_{i=1}^N K_{i,j} = \frac{(U_{A,j} - U_{A,0}) \cdot S_{u\Omega,Ref}}{(U_{Ref,j} - U_{Ref,0})} \cdot \prod_{i=1}^8 K_{i,j} \quad (7)$$

Bei Einsatz eines inkrementalen Winkel-Referenzaufnehmers zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit sieht das Modell folgendermaßen aus:


$$S_{u\Omega} = \frac{U_{A,j} - U_{A,0}}{\Omega_j} \cdot \prod_{i=1}^N K_{i,j} = \frac{(U_{A,j} - U_{A,0}) \cdot n_j}{\Phi_{Mittel} \cdot f_{Osz}} \cdot \prod_{i=1}^8 K_{i,j} \quad (8)$$

mit

$$\prod_{i=1}^8 K_{i,j} = K_{IA,j} \cdot K_{Vgl,j} \cdot K_{Q,j} \cdot K_{Vib,j} \cdot K_{TK,j} \cdot K_{L,j} \cdot K_{Geo,j} \cdot K_{R,j} \quad (9)$$

Ergebnisgröße:

$S_{u\Omega}$ Ergebnis, Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstandes

	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeits- messgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	14 / 20

Eingangs-/ Bestimmungsgrößen:

Ω	(durch die Kalibriereinrichtung erzeugte) Winkelgeschwindigkeit
$U_{A,Ref}$	(gemittelt) Ausgangssignal des Winkelgeschwindigkeits-Referenzaufnehmers
$U_{Ref,0}$	Nullsignal (Offset-Signal) des Referenzaufnehmers
$S_{u\Omega,Ref}$	Übertragungskoeffizient des Winkelgeschwindigkeits-Referenzaufnehmers
Φ_{Mittel}	mittlere Winkelauflösung (eines inkrementalen) Winkel-Referenzaufnehmers
f_{Osz}	Oszillatorfrequenz (eines Schwingquarzes zur Zeitbestimmung)
U_A	Messwert des KG-Ausgangssignals
$U_{A,0}$	Nullsignal (Offset-Signal) des Kalibriergegenstandes

Einflussgrößen:

K_{IA}	Korrektionsfaktor; zeitliche Instabilität
K_{Vgl}	Korrektionsfaktor; Vergleichspräzision inkl. Montage
K_Q	Korrektionsfaktor; Querrichtungsempfindlichkeiten (bspw. gegenüber Zentripetalbeschleunigung)
K_{Vib}	Korrektionsfaktor; Empfindlichkeit gegenüber parasitären Vibrationen (bspw. Gleichlaufschwankungen des Antriebs oder Unwuchten)
K_{TK}	Korrektionsfaktor; Temperaturabhängigkeit
K_L	Korrektionsfaktor; Linearitätsabweichung
K_{Geo}	Korrektionsfaktor; Einfluss der Erdrotation (bspw. bei Sensoren mit hoher Empfindlichkeit)
K_R	Korrektionsfaktor; residuale Einflüsse

Hinweis zur Querrichtungsempfindlichkeit gegenüber einer Zentripetalbeschleunigung:

Manche KG zeigen konstruktionsbedingt einen Störeinfluss bei der Einwirkung einer Zentripetalbeschleunigung. Solche KGs sind so zu montieren, dass das seismische Element des KGs möglichst nah oder direkt auf der zentralen Drehachse des Erregers positioniert wird. Bei einer außermittigen Montage wird eine Zentripetalbeschleunigung a_z wirksam, deren Betrag das Produkt aus dem Abstand (Radius r) zur zentralen Drehachse und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ist. Diese Zentripetalbeschleunigung wird als Querbeschleunigung in Richtung der zentralen Drehachse wirksam; ihr Einfluss muss innerhalb der Messunsicherheitsbilanz abgeschätzt und als Beitrag eingerechnet werden.

Je nach Konstruktionsprinzip der Einrichtung, Art des Sensors oder individuellen Umgebungsbedingungen können weitere signifikante Messunsicherheitskomponenten auftreten, die nicht in der obigen Auflistung enthalten sind. Es obliegt dem Labor, diese dann entsprechend in die Messunsicherheitsbilanz zu integrieren.

Die Einwertangabe aus der Regressionsrechnung als Kalibrierergebnis dient in der Anwendung zur Bestimmung eines Übertragungskoeffizienten bei Drehzahlen, für die kein explizites Kalibrierergebnis vorliegt. Dabei sind im Rahmen der Regression mehrere Vereinfachungen und Einschränkungen zu beachten.

1. Die Regressionsgleichungen im vorangegangenen Abschnitt gehen davon aus, dass alle Ausgangswerte mit gleicher Messunsicherheit ermittelt wurden (ungewichtete Regression)
2. Für den Fall der Nutzung einer gewichteten, einfachen linearen Regression (hier nicht beschrieben) werden nur Messunsicherheiten der Ausgangsmesswerte berücksichtigt, nicht aber die immer auch vorhandenen Messunsicherheiten der Eingangs- oder Referenzmesswerte.
3. Die in der Literatur zu findenden Angaben zu Bestimmtheits- oder Gütemaßen des Fits (wie beispielsweise „ r^2 “) sind hier generell ungeeignet, da sie nur die Güte der Anpassung an die Messwerte, aber nicht die Unsicherheit der Messwerte berücksichtigen.

Aus der Überlegung heraus, dass man im Falle einer Winkelgeschwindigkeit mit Kalibrierergebnis, die Messunsicherheit aus den diskreten Ergebnissen der Einzelmesspunkte übernehmen würde, liegt es für die geschätzte Messunsicherheit eines beliebigen Punktes auf der Regressionsgeraden nahe, ebenfalls die Information aus den diskreten Kalibrierergebnissen zu übernehmen.

Liegt die Winkelgeschwindigkeit im Intervall $\Omega_i < \Omega < \Omega_{i+1}$, wobei für Ω_i und Ω_{i+1} diskrete Kalibrierergebnisse vorliegen, so ist die Messunsicherheit von $S(\Omega)$ als das Maximum der Messunsicherheiten von $S(\Omega_i)$ und $S(\Omega_{i+1})$ anzusetzen.


13 Kalibrierschein

Die Kalibrierscheine sollten die Anforderungen der aktuell gültigen DIN EN ISO/IEC 17025 einhalten.

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

Alle Bedingungen, die signifikanten Einfluss auf das Kalibrierergebnis haben, müssen angegeben werden. Beispiele:

- Elektrische Versorgung
- Verwendete Hilfsmessgeräte mit Einstellungen
- Bauartbedingte Messbedingungen, z. B. Kabellänge, Art der Befestigung des Kalibriergegenstandes; verwendete Schnittstellen bei Digitalsensoren
- Drehmoment bei der Montage
- Bauartbedingte Kenngrößen, z. B. Nullsignal
- Kenngrößen und Charakteristik von Filtern
- Ggf. Einwertangabe mit Gültigkeitsbereich, Auswertungsalgorithmus
- Durchgeführte Tarierung

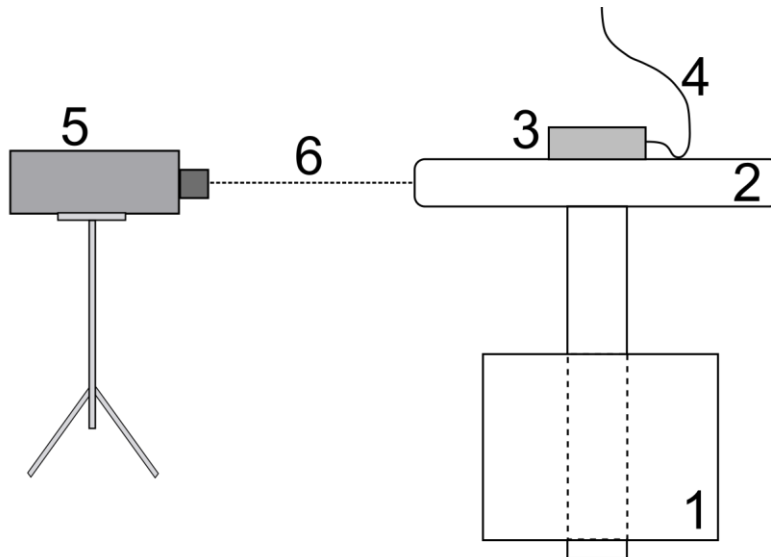
	Kalibrierung von Winkelgeschwindigkeitsmessgeräten – Quasistatische Kalibrierung https://doi.org/10.7795/550.20240301	DKD-R 3-13, Blatt 1	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	16 / 20

14 Literaturverzeichnis

- [1] ISO Guide 98-3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) 2008, ISO, Geneva, CH
- [2] EA-4/02 M: 2022, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, European Accreditation, 04. April 2022 rev. 03;
EA-4/02 M: 2022, Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (deutsche Übersetzung vom 31.08.2022), DAkkS
- [3] DIN EN ISO/IEC 17025:2018; Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien; Beuth-Verlag, März 2018
- [4] DKD-R 3-1 Blatt 1; Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Grundlagen; Deutscher Kalibrierdienst, April 2019
- [5] DKD-R 3-1 Blatt 2; Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung; Deutscher Kalibrierdienst, April 2019

Anhang A: Rotationslaservibrometer

Als Alternative zu elektro-mechanischen Winkelgeschwindigkeitsaufnehmern können auch Rotationslaservibrometer (RLV) Kalibriergegenstand oder Referenz sein.



1 Antrieb
2 Drehteller
3 Kalibriergegenstand (KG)

4 Aufnehmeranschlusskabel
5 Rotationslaservibrometer
6 Laserstrahlen (zwei hintereinander)

Abbildung 4: Prinzipaufbau, hier für die Nutzung eines RLV als Referenz an einer Kalibriereinrichtung

Grundlegende Unterschiede entstehen dadurch, dass ein RLV die Messgröße berührungslos erfasst. Es wird im Gegensatz zu anderen Aufnehmern typischerweise nicht mitbewegt und erzeugt keine Massebelastung auf der Kalibriereinrichtung. Allerdings müssen Relativbewegungen zur Messeinrichtung eingehend betrachtet werden.

Ist das Vibrometer der Kalibriergegenstand, dann gibt es keine mechanischen Einschränkungen durch das Sensoranschlusskabel. Ansonsten gelten die Hinweise aus Abschnitt 8.

Funktionsprinzip

Das optische Messprinzip für das RLV beruht auf der Laserinterferometrie. Sein Einsatz ist nicht auf zylindrische Teile beschränkt. Durch den Einsatz eines speziellen Differenzverfahrens mit zwei Messstrahlen wird, unabhängig von der Gestalt des Messobjekts, nur die rotatorische Bewegungskomponente erfasst, während translatorische Schwingungen weitestgehend unterdrückt werden, siehe auch *Grundlagen des Messverfahrens*.

Oberfläche

Aufgrund des optischen Messprinzips werden an die von den Laserstrahlen angetastete Oberfläche gewisse Mindestanforderungen bezüglich der Reflektivität gesetzt. In manchen Fällen ist es deshalb erforderlich, die genutzte Fläche entsprechend zu präparieren. Dafür kann beispielsweise eine retro-reflektierende Folie eingesetzt werden.

Entsprechende Hinweise sind typischerweise dem Handbuch des Gerätes zu entnehmen. Mit Hilfe der Signalintensitätsanzeige des Gerätes ist auf eine gute optische Aussteuerung für die Kalibriermessung zu achten.

Generell erzeugt ein besseres Reflexionsverhalten einen höheren Signal-Rausch-Abstand der Messung. Da dieser bei Rotationsmessungen, bedingt durch die Speckles des zurückgestreuten Lichts, ohnehin nicht sehr hoch ist, empfiehlt sich in den meisten Fällen eine möglichst sorgfältige Präparation des Messobjekts.

Ausrichtung

Für Rotationsmessungen muss der Sensor stets so montiert werden, dass die Ebene der beiden Laserstrahlen orthogonal zur Drehachse des Messobjekts liegt.

Das Messergebnis ist unabhängig von der Position der Laserstrahlen, solange die Ebene der Laserstrahlen orthogonal zur Drehachse liegt.

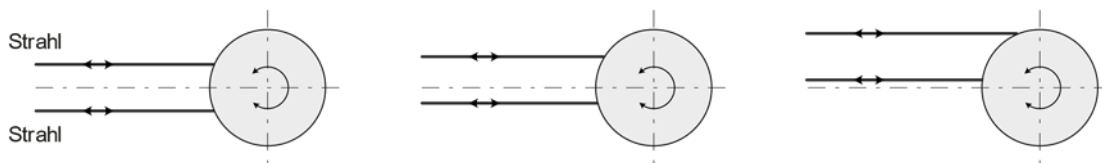


Abbildung 5: Zulässige Positionen der Laserstrahlen orthogonal zur Drehachse bei Messung mit einem RLV

Wichtig ist der Einfallswinkel des Laserstrahls zur Objektoberfläche, da immer die Bewegungskomponente in Richtung des Laserstrahls erfasst wird. Bei nicht orthogonaler Ausrichtung des Laserstrahls zur rotierenden Oberfläche erhält man daher in der Regel zu kleine Amplitudenwerte.

Grundlagen des Messverfahrens

Jedem Punkt am Umfang eines mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotatorisch bewegten Körpers lässt sich eine Tangentialgeschwindigkeit v_t zuordnen, die vom Rotationsradius R abhängt. Diese translatorische Geschwindigkeit kann in zwei beliebig orientierte, aber senkrecht aufeinander stehende, translatorische Geschwindigkeitskomponenten zerlegt werden. In der nachfolgenden Abbildung sieht man die Vektordarstellung einer solchen Geschwindigkeitszerlegung für zwei Punkte am Umfang eines rotierenden Körpers beliebiger Gestalt, wobei eine der Geschwindigkeitskomponenten jeweils in die Einfallsrichtung des Laserstrahls gelegt wurde.

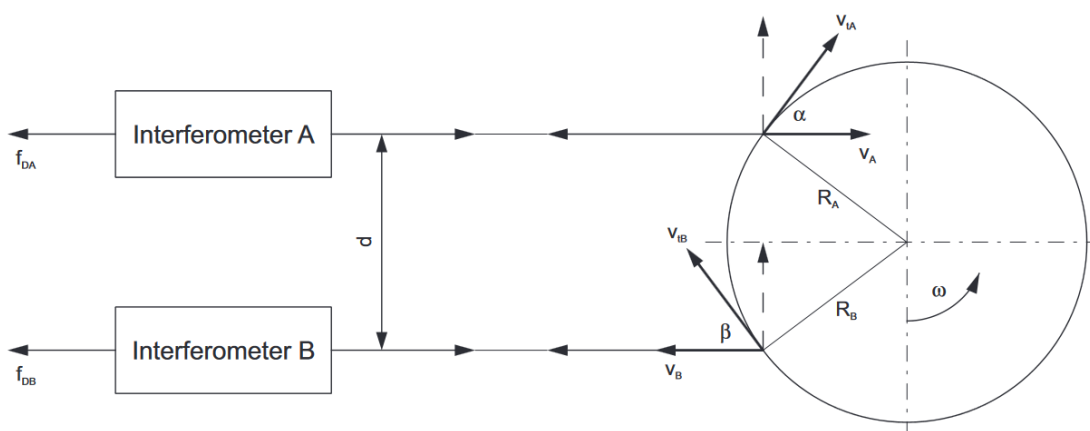


Abbildung 6: Geometrie der Messung und Zerlegung der tangentialen Geschwindigkeiten

Wie im Folgenden gezeigt wird, gelingt es, durch Messen zweier paralleler translatorischer Geschwindigkeitskomponenten die Winkelgeschwindigkeit ω zu berechnen. Eine aus zwei

Interferometern bestehende Messanordnung mit zwei parallel im Abstand d angeordneten Laserstrahlen erfasst die Geschwindigkeitskomponenten v_A und v_B . Wegen der vektoriellen Zerlegung gelten die beiden Beziehungen:

$$\begin{aligned} v_A &= v_{tA} \cdot \cos \alpha = \omega \cdot R_A \cdot \cos \alpha \\ v_B &= v_{tB} \cdot \cos \beta = \omega \cdot R_B \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (10)$$

Die in Richtung der Laserstrahlen wirkenden Geschwindigkeitskomponenten v_A und v_B erzeugen in den zurückgestreuten Laserstrahlen die Dopplereffrequenzverschiebungen f_{DA} und f_{DB} . Für diese gelten die beiden Beziehungen

$$\begin{aligned} f_{DA} &= \frac{2v_A}{\lambda} = \frac{2(\omega \cdot R_A \cdot \cos \alpha)}{\lambda} \\ f_{DB} &= \frac{2v_B}{\lambda} = \frac{2(\omega \cdot R_B \cdot \cos \beta)}{\lambda} \end{aligned} \quad (11)$$

Der geometrische Zusammenhang zwischen dem Abstand d der Laserstrahlen und den Winkeln α und β bei gegebenen Radien R_A und R_B lässt sich beschreiben durch:

$$d = R_A \cdot \cos \alpha + R_B \cdot \cos \beta \quad (12)$$

Aus dieser Beziehung erhält man für die Summe der Dopplereffrequenzverschiebungen:

$$f_D = f_{DA} + f_{DB} = \frac{2d \cdot \omega}{\lambda} \quad (13)$$

Damit ist die resultierende Dopplereffrequenzverschiebung nur von den Systemkonstanten d und λ und der Winkelgeschwindigkeit ω abhängig. Die aus der Dopplereffrequenzverschiebung ermittelte Winkelgeschwindigkeit und ggf. die Drehzahl werden als analoge Spannung oder digital vom RLV ausgegeben.

Berücksichtigt man die Vorzeichen der Winkelfunktionen und der Geschwindigkeitskomponenten, so lässt sich leicht zeigen, dass eine zusätzlich vorhandene translatorische Bewegungskomponente in der Richtung der Laserstrahlen keinerlei Einfluss auf die Größe der resultierenden Dopplereffrequenzverschiebung hat, da sie sich gleichsinnig den beiden Geschwindigkeiten v_A und v_B überlagern würde.

Eine senkrecht wirkende translatorische Komponente bliebe ebenfalls ohne Einfluss, da eine senkrecht zum Laserstrahl eines Interferometers gerichtete Bewegung keine Dopplereffrequenzverschiebung erzeugt.

Da jede translatorische Bewegung des zu messenden Körpers durch eine Komponente in Richtung der Laserstrahlen und eine dazu senkrecht stehende repräsentiert wird, ist das Verfahren prinzipiell unempfindlich für Translationsbewegungen.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de