

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



## DKD

---

**Richtlinie  
DKD-R 4-4**

**Kalibrieren von  
Normalen und Messgeräten für  
die Formmesstechnik**

---

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180828AB>



	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2/23

## Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

### Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
DKD-Geschäftsstelle  
Bundesallee 100      38116 Braunschweig  
Postfach 33 45      38023 Braunschweig  
Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-8021  
Internet:              [www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3/23

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 4-4, Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.*

*DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180828AB>*

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



Autoren:

Mitglieder des Fachausschusses *Länge* des DKD in der Zeit bis 2009.

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Länge* des DKD.

	<b>Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik</b>  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	4/23

## Vorwort

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

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

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Länge* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2009 erstellt.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 4-4 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 4-4 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 01/2009, veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage

## Inhaltsverzeichnis

1	Geltungsbereich.....	6
2	Begriffe, Definitionen.....	6
3	Normale / Normalmesseinrichtungen .....	6
4	Umgebungsbedingungen .....	6
5	Kalibrierung.....	6
5.1	Kalibrierfähigkeit .....	6
5.2	Kalibrierverfahren.....	6
5.3	Kalibrierumfang / Durchführung der Kalibrierung.....	7
5.3.1	Kalibrierung Rundheitsnormal.....	7
5.3.2	Kalibrierung Vergrößerungsnormale: Flicknormal und unrunde Kugel.....	7
5.3.3	Kalibrierung Geradheitsnormal: Zylinder .....	8
5.3.4	Kalibrierung Geradheitsnormal: Geradheitslineal .....	8
6	Messunsicherheit.....	8
6.1	Beschreibung der Messungen.....	8
6.2	Mathematisches Modell der Messungen .....	9
6.2.1	Modell eines Profilpunktes .....	9
6.2.2	Parameter der Formabweichung.....	9
6.3	Ermittlung der Messunsicherheit .....	10
6.3.1	Unsicherheit der Eingangsgrößen.....	10
6.3.2	Unsicherheit eines einzelnen Profilpunktes .....	11
6.3.3	Unsicherheit des Parameters der Formabweichung .....	11
6.3.4	Bestimmung des Korrelationskoeffizienten.....	12
6.3.5	Erweiterte Messunsicherheit .....	13
6.4	Messunsicherheitsbudget .....	13
6.5	Unsicherheit der Eingangsgrößen.....	13
6.5.1	Standardabweichung .....	13
6.5.2	Formabweichungen des Messobjektes .....	14
6.5.3	Reinigung.....	14
6.5.4	Rauschen, Auflösung, Schwingungen.....	15
6.5.5	Tastersignal .....	15
6.5.6	Ausrichtung und Deformation des Messobjektes.....	16
6.5.7	Führungsabweichungen.....	20
6.5.8	Thermische Drift.....	21
7	Dokumentation der Messergebnisse .....	21
8	Symbole und Abkürzungen .....	22
9	Zitierte Normen und weitere Unterlagen.....	23

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	6/23

## 1 Geltungsbereich

Dieses Blatt gilt für die Kalibrierung von folgenden Normalen mit Formmessgeräten:

**Tab. 1** Geltungsbereich

Normal	Beispiele	Merkmal
Rundheitsnormal	Kugel Halbkugel Zylinder	Rundheitsabweichungen
Vergößerungsnormal	Zylinder mit Abflachung (Flick) Mehrwellennormal Unrunde Kugeln	Rundheitsabweichungen
Geradheitsnormal	Zylinder Geradheitslineal	Geradheitsabweichungen

## 2 Begriffe, Definitionen

Die in dieser Richtlinie verwendeten Begriffe entsprechen den in

- DIN / ISO TS 12181-1 für Rundheit
- DIN / ISO TS 12780-1 für Geradheit
- DIN EN ISO 11562 für messtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern.

Es gelten die Begriffserklärungen und Festlegungen in DIN EN ISO 1101, VDI/VDE 2631 sowie VIM und darin zitierte Normen.

## 3 Normale / Normalmesseinrichtungen

Für die verwendeten Normale / Normalmesseinrichtungen muss die Rückführung durch Kalibrierung sichergestellt werden. Der Anschluss dieser Normale an die nationalen Normale in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) muss nachgewiesen sein.

## 4 Umgebungsbedingungen

Die Mindestanforderungen hinsichtlich der einzuhaltenden Temperatur für das Geräteensemble und die Umgebung betragen  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .

## 5 Kalibrierung

### 5.1 Kalibrierfähigkeit

Zur Ermittlung der Kalibrierfähigkeit sind die gereinigten Normale und die entsprechenden Auflageflächen auf funktionell und messtechnisch relevante Beeinträchtigungen (z.B. Kratzer, Deformation, Rost) zu untersuchen und zu bewerten.

### 5.2 Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich der Form des zu kalibrierenden Normals mit der Form einer im Messaufbau vorhandenen Formverkörperung (z.B. Drehführung, Geradheitslineal).

Die Kalibrierung / Einmessung des verwendeten Formmessgerätes orientiert sich an den in VDI/VDE 2631 beschriebenen Verfahren.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	7/23

### 5.3 Kalibrierumfang / Durchführung der Kalibrierung

Im Folgenden werden die Mess- und Auswertebedingungen für die Kennwertermittlung an verschiedenen Normalen beschrieben. Entsprechend der Kenngrößendefinition in ISO 1101 ist die Richtung der Antastung senkrecht zur Drehachse bzw. zur Geradföhrung zu wählen. Abweichungen hiervon sind zu dokumentieren und bei der Messunsicherheitsermittlung zu berücksichtigen.

#### 5.3.1 Kalibrierung Rundheitsnormal

Antastrichtung:	senkrecht zur Oberfläche <sup>1</sup>
Tastkugel:	∅ 1 mm
Zentrierung:	≤ 1 µm
Messdrehzahl:	≤ 6,0 min <sup>-1</sup>
Messkraft:	≤ 0,03 N
Messwertaufnahme:	in 3 Ebenen im Abstand von ± 0,5 mm
Messpunktzahl:	≥ 3.500
Auswertung mit Filter:	Gauß 50 %, 50 / 150 UPR
Auswertung:	MZCI / LSCI
Zu ermittelnde Kennwerte:	Rundheitsabweichungen

#### 5.3.2 Kalibrierung Vergrößerungsnormale: Flicknormal und unrunde Kugel

Tastkugel:	∅ 1 mm
Zentrierung:	≤ 1 µm
Nivellierung:	≤ 10 µm / 10 mm
Messdrehzahl:	≤ 2,0 min <sup>-1</sup>
Messkraft:	≤ 0,03 N
Messwertaufnahme:	in 3 Ebenen im Abstand von ± 1 mm
Messpunktzahl:	≥ 3.500
Auswertung mit Filter:	Gauß 50 %, 15 UPR Gauß 50 %, 50 UPR Gauß 50 %, 150 UPR Gauß 50 %, 500 UPR
Auswertung:	MZCI / LSCI <sup>2</sup>
Zu ermittelnde Kennwerte:	Rundheitsabweichungen

<sup>1</sup> Erfolgt die Antastung auf einer Kugel nicht am Äquator, ist die Antastrichtung in Übereinstimmung mit der Rundheitsdefinition aus ISO 1101 senkrecht zur Drehachse zu wählen. Wird davon abgewichen, ist es zu dokumentieren und im Messunsicherheitsbudget entsprechend zu berücksichtigen.

<sup>2</sup> Bei Mehrwellennormalen gibt es als weiteres Auswerteverfahren die Fourieranalyse.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8/23

### 5.3.3 Kalibrierung Geradheitsnormal: Zylinder

Tastkugel:	∅ 1 mm
Zentrierung:	≤ 1 µm
Nivellierung:	2 µm / 100 mm
Messgeschwindigkeit:	≤ 5,0 mm/s
Messkraft:	≤ 0,03 N
Messpunktabstand:	≤ 0,1 mm
Messwertaufnahme:	in 4 Mantellinien
Auswertung mit Filter:	Gauß 50 %, $\lambda_c = 0,8$ mm
Auswertung:	MZLI / LSLI
Zu ermittelnde Kennwerte:	Geradheitsabweichungen

### 5.3.4 Kalibrierung Geradheitsnormal: Geradheitslineal

Tastkugel:	∅ 1 mm
Zentrierung:	≤ 0,5 µm
Nivellierung:	2 µm / 100 mm <sup>3</sup>
Messgeschwindigkeit:	≤ 5,0 mm/s
Messkraft:	≤ 0,03 N
Messpunktabstand:	≤ 0,1 mm
Messwertaufnahme:	in 3 Schnitten im Abstand von ±1 mm
Auswertung mit Filter:	Gauß 50 %, $\lambda_c = 0,8$ mm
Auswertung:	MZLI / LSLI
Zu ermittelnde Kennwerte:	Geradheitsabweichungen

## 6 Messunsicherheit

### 6.1 Beschreibung der Messungen

Die Beschreibung der Messungen umfasst:

- Beschreibung des Messgerätes
- Beschreibung des Verfahrens zum Einmessen des Messgerätes (vgl. VDI/VDE 2631 Blätter 2, 4, 5, 6)
- Beschreibung der Messverfahren und Messparameter (vgl. VDI/VDE 2631 Blatt 9)
- Angabe zusätzlicher Informationen, z.B. Reinigungsverfahren, Besonderheiten bei der Aufspannung

<sup>3</sup> Das Geradheitslineal muss auch in den beiden zur Messrichtung senkrechten Richtungen ausgerichtet werden. Die Lage der Messlinien ist zu markieren.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik	DKD-R 4-4	
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AB	Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9/23

## 6.2 Mathematisches Modell der Messungen

Die Aufstellung eines mathematischen Modells ist auf verschiedene Art möglich. Zur Vereinfachung der Berechnungen und zur Verbesserung der Übersichtlichkeit ist es sinnvoll, ein Modell vom Allgemeinen zum Speziellen zu entwickeln und nach Möglichkeit Summen statt Produkte zu verwenden.

Die Ausgangsgröße  $Y$  (Messgröße) ist abhängig von  $1, \dots, N$  Eingangsgrößen  $X_i$ , Gl. (1). Jede dieser Eingangsgrößen  $X_i$  kann als Ausgangsgröße wieder von  $1, \dots, M$  Eingangsgrößen  $Z_j$  abhängig sein, Gl. (2) usw.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

$$X_i = f(Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{iM}) \quad (2)$$

### 6.2.1 Modell eines Profilpunktes

Der Messwert eines Profilpunktes  $P_i$  kann als Summe aus dem Anzeigewert  $P_j^*$  und einem Korrekturwert  $\delta P_j$  dargestellt werden ( $j = 1, \dots, m$  Profilpunkte). Zur Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen werden  $i = 1, \dots, n$  Wiederholmessungen ausgeführt. Dabei wird angenommen, dass für alle Wiederholmessungen <sup>4</sup> ein und derselbe Korrekturwert  $\delta P_j$  gilt.

$$P_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ij}^* + \delta P_j \quad (3)$$

Die Eingangsgrößen des Korrekturwertes  $\delta P_j$  können in Bezug auf das Verhältnis ihrer Wellenlänge  $\lambda$  zur Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  der Filterung unterschieden werden:

Kurzwellige Eingangsgrößen mit  $\lambda \leq \lambda_c$ , Symbol  $\delta K_{lj}$  Ursachen sind z.B. Rauschen, Schwingungen des Messgerätes und Schwankungen des Messwertes bei Variation der Messhöhe bzw. Orientierung auf dem Messobjekt infolge von Formabweichungen.

Langwellige Eingangsgrößen mit  $\lambda \gg \lambda_c$ , Symbol  $\delta L_{hj}$  Ursache sind z.B. thermische Driften oder konstante Abweichungen der Empfindlichkeit der Signalübertragung.

Beide Gruppen von Eingangsgrößen stammen aus unterschiedlichen Quellen und sind voneinander unabhängig. Für das Modell eines Profilpunktes  $P_j$  folgt daher

$$P_j = \bar{P}_j + \sum_{l=1}^p \delta K_{lj} + \sum_{h=1}^q \delta L_{hj} \quad (4)$$

### 6.2.2 Parameter der Formabweichung

Zur Bestimmung der Formabweichung können verschiedene Auswerteverfahren angewendet werden: Least-Square (LS) oder Minimum Zone (MZ) nach ISO 1101.

In Abhängigkeit vom Auswerteverfahren treten Differenzen der entsprechenden Parameter (z.B.  $RON_t$  oder  $STR_t$ ) auf. Diese Differenzen werden hier nicht betrachtet, d.h. die Parameter der Formabweichung, die unter Verwendung verschiedener Auswerteverfahren aus ein und demselben Profil ermittelt wurden, sind nicht unmittelbar miteinander vergleichbar.

<sup>4</sup> Wiederholmessungen in kurzem Zeitabstand mit identischen Bedingungen in Bezug auf: Messverfahren, Beobachter, Messeinrichtung, Messort, Aufspannung.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik	DKD-R 4-4	
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AB	Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	10/23

Bei der Auswertung nach LS ist der Parameter der Formabweichung der radiale bzw. senkrechte Abstand zwischen dem kleinsten und dem größten Profilpunkt in Bezug auf den Ausgleichskreis bzw. die Ausgleichsgerade (Abstand zwischen zwei Profilpunkten). Mit  $y = RON_t$  bzw.  $y = STR_t$  gilt allgemein

$$y_{LS} = P_{\max} - P_{\min} \quad (5)$$

Bei der Auswertung nach MZ ist der Parameter der Formabweichung der minimale radiale Abstand zwischen zwei konzentrischen Kreisen bzw. der minimale senkrechte Abstand zwischen zwei parallelen Linien, die das Profil beidseitig einschließen. Daher wird folgend nicht zwischen  $u(y_{LS})$  und  $u(y_{MZ})$  unterschieden.

### 6.3 Ermittlung der Messunsicherheit

#### 6.3.1 Unsicherheit der Eingangsgrößen

##### 6.3.1.1 Eingangsgrößen $X_i$

In Tab. 2 sind die Eingangsgrößen  $X_i$  von Geradheits- bzw. Rundheitsmessungen entsprechend Gl. (1) zusammengefasst<sup>5</sup>. Für einige dieser Eingangsgrößen können z.T. wieder mathematische Modelle entsprechend Gl. (2) entwickelt werden. Die beispielhafte Ermittlung der Unsicherheit der Eingangsgrößen ist im Kap. 6.5 dargestellt.

**Tab. 2** Eingangsgrößen von Geradheits- bzw. Rundheitsmessungen.  $u(x_i)$  Standardunsicherheit,  $w(x_i)$  relative Standardunsicherheit,  $r$  geschätzter Korrelationskoeffizient, Typ Methode zur Ermittlung der Standardunsicherheit

Eingangsgröße $X_i$	Symbol	Typ	$r$	
empirische Standardabweichung des Mittelwertes der Anzeige	$s(\bar{P}_j)$	A	$u(x_i)$	
Formabweichungen des Messobjektes	$\delta K_1$	B	$u(x_i)$	0
Reinigung	$\delta K_2$	B	$u(x_i)$	0
Rauschen, Auflösung, Schwingungen	$\delta K_3$	B	$u(x_i)$	0
Tastersignal (kurzweiliger Anteil)	$\delta K_4$	B	$w(x_i)$	0
Ausrichtung, Deformation Messobjekt	$\delta L_1$	B	$u(x_i)$	1
Führungsabweichungen	$\delta L_2$	B	$u(x_i)$	0 ... 1
Tastersignal (langweiliger Anteil)	$\delta L_3$	B	$w(x_i)$	1
Thermische Drift	$\delta L_4$	B	$u(x_i)$	1

Die Korrelationskoeffizienten  $r$  für die angegebenen Eingangsgrößen können aus dem Verhältnis der Wellenlänge der Eingangsgröße zur Filtergrenzwellenlänge abgeschätzt werden

$$r \propto \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad (6)$$

Eine Abschätzung nach den folgenden Kriterien ist in den meisten Fällen hinreichend genau:

Bei  $\lambda \ll \lambda_c$  folgt  $r \rightarrow 0$ : die Eingangsgröße ändert sich stochastisch in Bezug auf  $\lambda_c$ , daher besteht keine Korrelation zwischen benachbarten Profilpunkten.

Bei  $\lambda \gg \lambda_c$  folgt  $r \rightarrow 1$ : die Eingangsgröße ist konstant in Bezug auf  $\lambda_c$ , daher besteht eine vollständige Korrelation.

<sup>5</sup> Die Gruppierung der Eingangsgrößen folgt der Vorgehensweise in [Neug01]. Prinzipiell ist auch eine andere Gruppierung möglich.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik	DKD-R 4-4	
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AB	Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11/23

Der Korrelationskoeffizient der Führungsabweichungen  $\delta L_2$  ist abhängig von der Art der verwendeten Führung, siehe Kap. 6.5.7.

### 6.3.1.2 Einfluss der Filterung auf die Unsicherheit der Eingangsgrößen

Die Unsicherheit von Eingangsgrößen nach einer Filterung beträgt nach [Krys 01] für unkorrelierte (kurzwellige) Eingangsgrößen  $\delta K_{lj}$  mit  $\lambda \leq \lambda_c$

$$u(\delta K^*) = \sqrt{\frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_c \sqrt{2}}} \cdot u(\delta K) \quad (7)$$

mit  $\lambda_c$  Grenzwellenlänge,  $\Delta x$  Abstand zwischen zwei benachbarten Profilpunkten,  $\alpha \approx 0,4697$   
korrelierte (langwellige) Eingangsgrößen  $\delta L_{hj}$  mit  $\lambda \gg \lambda_c$

$$u(\delta L^*) = u(\delta L). \quad (8)$$

### 6.3.2 Unsicherheit eines einzelnen Profilpunktes

Für die Ermittlung der Unsicherheit eines einzelnen Profilpunktes werden folgende Annahmen getroffen:

Kurzwellige und langwellige Eingangsgrößen sind prinzipiell voneinander unabhängig.

Die kurzwelligen Eingangsgrößen  $\delta K_l$  sind voneinander unabhängig.

Die langwelligen Eingangsgrößen  $\delta L_h$  sind voneinander unabhängig.

Die Standardunsicherheit eines einzelnen Profilpunktes  $u(P_j)$  beträgt dann:

$$u(P_j) = \sqrt{s^2(\bar{P}_j) + \frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_c \sqrt{2}} \cdot \sum_{l=1}^p u^2(\delta K_{lj}) + \sum_{h=1}^q u^2(\delta L_{hj})}, \quad (9)$$

mit  $s(\bar{P}_j) = s(P_j) / \sqrt{n}$ .

Bei nicht korrigierten systematischen Eingangsgrößen (meist nicht korrigierte Führungsabweichung) ergibt sich nach [Lira 98] ein Sonderfall, der in Kap. 6.5.7.1 behandelt wird.

Die Sensitivitätskoeffizienten  $c_i$  werden nach DAkkS-DKD-3 Kap. 4.1 berechnet und betragen für die verschiedenen Gruppen von Eingangsgrößen aus Gl. (9):

**Tab. 3** Sensitivitätskoeffizienten  $c_i$

$X_i$	$c_i$
$\bar{P}_j$	1
$\delta K_{lj}$	$\frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_c \sqrt{2}}$
$\delta L_{hj}$	1

### 6.3.3 Unsicherheit des Parameters der Formabweichung

Bei der Bestimmung des Parameters der Formabweichung nach Gl. (5), ergibt sich für die Unsicherheit

$$u(y) = \sqrt{u^2(P_{\max}) + u^2(P_{\min}) + 2 \cdot u(P_{\max}) \cdot u(P_{\min}) \cdot r(P_{\max}, P_{\min})}. \quad (10)$$

Unter bestimmten Voraussetzungen kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheiten der Profilpunkte  $u(P_j)$  für  $j = 1, \dots, m$  gleich groß sind:

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik	DKD-R 4-4	
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AB	Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	12/23

- Das verwendete Messgerät hat innerhalb des verwendeten Bereiches der Führung und des Tasters identische Eigenschaften.
- Die Umgebungsbedingungen ändern sich innerhalb der Messzeit stetig.
- Das Messobjekt hat keine signifikanten, lokal begrenzten Formabweichungen.

Unter den genannten Voraussetzungen gilt

$$u(P_j) = u(P_{\max}) = u(P_{\min}) = u(P), \quad (11)$$

und es folgt aus Gl. (10)

$$u(y) = \sqrt{2u^2(P) \cdot [1 + r(P_{\max}, P_{\min})]}. \quad (12)$$

#### 6.3.4 Bestimmung des Korrelationskoeffizienten

Nach DAkkS-DKD-3 Anhang D1 gilt für den Korrelationskoeffizienten  $r(P_{\max}, P_{\min})$

$$r(P_{\max}, P_{\min}) = \frac{u(P_{\max}, P_{\min})}{u(P_{\max}) \cdot u(P_{\min})} \quad (13)$$

Analog zu Gl. (1) gelten für die Ermittlung von  $P_{\max}$  und  $P_{\min}$  die Funktionen  $f_1$  und  $f_2$ ,

$$P_{\max} = f_1(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (14)$$

$$P_{\min} = f_2(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (15)$$

wobei nicht alle Variablen  $X_l$  mit  $(l = 1, 2, \dots, L)$  in beiden Funktionen gleichzeitig auftreten müssen (vgl. DAkkS-DKD-3 Anhang D4). Die Kovarianz wird nach Gl. (13) ermittelt.

$$u(P_{\max}, P_{\min}) = \sum_{l=1}^L c_{1l} \cdot c_{2l} \cdot u^2(x_l) \quad (16)$$

Zu der Summe tragen nur Glieder bei, deren Sensitivitätskoeffizienten von Null verschieden sind, d.h. die Kovarianz ist Null, wenn die Funktionen  $f_1$  und  $f_2$  keine gemeinsamen Variablen besitzen. Gilt für den lateralen Abstand  $\Delta x(P_{\max}, P_{\min}) > 2 \cdot \lambda_c$ , folgt daraus, dass nur die korrelierten Eingangsgrößen  $\delta L$  in beiden Funktionen auftreten<sup>6</sup>. Weiterhin wurden folgende Annahmen getroffen:

Die Unsicherheit aller Profilpunkte ist gleich groß  $u(P_{\max}) = u(P_{\min}) = u(P)$  (vgl. Kap. 6.3.3)

Die Eingangsgrößen sind entweder vollständig oder gar nicht korreliert (vgl. Kap. 6.3.1.1).

Daraus folgt für die korrelierten Eingangsgrößen  $c_{1i} = c_{2i} = 1$  (vgl. Tab. 3).

Unter den genannten Voraussetzungen wird der Korrelationskoeffizient  $r(P_{\max}, P_{\min})$  wie folgt bestimmt:

$$r(P_{\max}, P_{\min}) = \frac{\sum_{h=1}^q u^2(\delta L_h)}{u^2(P)}. \quad (17)$$

<sup>6</sup> Rauschen beeinflusst z. B. die Messung beider Punkte, jedoch ändert sich die Richtung und der Betrag. Formal muss daher unterschieden werden zwischen den Eingangsgrößen Rauschen<sub>1</sub> und Rauschen<sub>2</sub>. Folglich sind diese Eingangsgrößen in den Funktionen  $f_1$  und  $f_2$  nicht identisch. Dasselbe gilt für alle andere unkorrelierten Eingangsgrößen.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	13/23

### 6.3.5 Erweiterte Messunsicherheit

Nach DAkkS-DKD-3 wird die erweiterte Messunsicherheit  $U(y)$  durch Multiplikation der Standardunsicherheit  $u(y)$  mit dem Erweiterungsfaktor  $k$  bestimmt. Kann eine Normalverteilung der Ausgangsgröße  $Y$  angenommen werden, gilt  $k = 2$ .

Als Voraussetzungen für die näherungsweise Annahme einer Normalverteilung werden in DAkkS-DKD-3 Kap. 5.2 angegeben:

- Die Anzahl  $n$  der Unsicherheitsbeiträge  $u(x_i)$  ist  $> 3$ .
- Die Eingangsgrößen  $X_i$  sind voneinander unabhängig.
- Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind Normal- oder Rechteckverteilungen.
- Die Unsicherheitsbeiträge  $u(x_i)$  sind vergleichbar groß.

Die Voraussetzungen (a) - (c) sind in den meisten Fällen gegeben. Voraussetzung (d) ist dann nicht gegeben, wenn eine dominierende Eingangsgröße existiert (meist die unkorrigierte Führungsabweichung, vgl. Kap. 6.5.7).

Wird die Führungsabweichung mit Hilfe eines Normals bei einer hinreichenden Anzahl von Wiederholmessungen bestimmt ( $n > 10$ ), kann für die Verteilung der Eingangsgröße Führungsabweichung eine Normalverteilung angenommen werden. Daraus folgend ist die Ausgangsgröße  $Y$  ebenfalls normalverteilt und es gilt ebenfalls  $k = 2$ . Bei wesentlichen Abweichungen von den o.g. Voraussetzungen ist der Erweiterungsfaktor nach DAkkS-DKD-3 Anhang E zu bestimmen.

### 6.4 Messunsicherheitsbudget

In DAkkS-DKD-3 Kap. 4.8 ist festgelegt, welche Informationen ein Messunsicherheitsbudget enthalten soll:

- Messgröße bzw. Eingangsgröße  $X_i$
- Formelzeichen
- Art der Ermittlung der Messunsicherheit (Typ A oder Typ B)
- Anzahl  $n$  der Beobachtungen
- Erwartungswert der Messgröße  $E[x_i]$
- Standardunsicherheit  $u(x_i)$
- Sensitivitätskoeffizient  $c_i$
- Unsicherheitsbeitrag  $u_i(y)$
- Zusätzlich sollten folgende Informationen im Messunsicherheitsbudget enthalten sein:
- Verteilung der Eingangsgröße  $X_i$
- Informationen zum Messobjekt: Ident-Nr., Kalibrierzeichen
- Informationen zur Messung: Durchmesser bzw. Messlänge, Anzahl der Messpunkte, Filtergrenzwellenlänge bzw. -zahl

Beispiele für Messunsicherheitsbudgets sind in DAkkS-DKD-3-E1 enthalten.

### 6.5 Unsicherheit der Eingangsgrößen

#### 6.5.1 Standardabweichung

Für jeden Profilpunkt  $P_j$  mit  $j = 1, \dots, m$  wird die Standardabweichung des Mittelwertes  $s(\bar{P}_j)$  aus  $i = 1, \dots, n$  Messungen entsprechend DAkkS-DKD-3 Kap. 3.2.2. bestimmt. Bei den meisten Messgeräten kann  $s(\bar{P}_j)$  mit den implementierten Auswerteverfahren nicht bestimmt werden.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik	DKD-R 4-4	
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AB	Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	14/23

In diesen Fällen kann der stochastische Einfluss bei der Ermittlung des Parameters der Formabweichung berücksichtigt werden. Dies führt zu einer Änderung der Gl. (9) zu

$$u_B^2(P_j) = \frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_c \sqrt{2}} \cdot \sum_{l=1}^p u^2(\delta K_{lj}) + \sum_{h=1}^q u^2(\delta L_{hj}). \quad (18)$$

und entsprechend von Gl. (10) zu

$$u^2(y) = \frac{s^2(P_{\max} - P_{\min})}{n} + u_B^2(P_{\max}) + u_B^2(P_{\min}) + 2 \cdot u_B(P_{\max}) \cdot u_B(P_{\min}) \cdot r(P_{\max}, P_{\min}) \quad (19)$$

mit  $u_B$  Unsicherheitsanteil nur mit Typ-B Eingangsgrößen.

### 6.5.2 Formabweichungen des Messobjektes

Formabweichungen des Messobjektes beeinflussen das Messergebnis, da die definierte Messlinie nur mit einer bestimmten Unsicherheit eingestellt werden kann. Um diesen Einfluss zu bestimmen, werden zusätzliche Messungen um einen Bereich der definierten Messlinie ausgeführt. Die Größe des Bereiches entspricht der Einstellunsicherheit und ist im Wesentlichen abhängig von der Definition und der Beschaffenheit der Bezugsэлеmente.

Der Unsicherheitsbeitrag kann entweder aus den Spannweiten  $S(\bar{y})$  der ermittelten Formabweichungen oder aus deren Standardabweichungen  $s(\bar{y})$  ermittelt werden. Insgesamt sind dabei mindestens fünf Messungen auszuführen:

- a) mindestens drei Messungen der definierten Messlinie, mit  $S_1(\bar{y})$  bzw.  $s_1(\bar{y})$ ,
- b) mindestens je eine Messung an den Grenzen des festgelegten Bereiches oberhalb und unterhalb der Messlinie der definierten Messlinie sowie der definierten Messlinie mit  $S_2(\bar{y})$  bzw.  $s_2(\bar{y})$ .

Bei einem signifikanten Einfluss der Formabweichungen ergibt sich eine entsprechende Differenz zwischen den unter a) und b) ermittelten Streubreiten bzw. Standardabweichungen. Diese Differenz kann verwendet werden, um den Einfluss der Formabweichungen des Messobjektes abzuschätzen. Der entsprechende Unsicherheitsbeitrag  $u(\delta K_1)$  wird dabei entweder aus der Differenz der Streubreiten mit Hilfe einer Rechteckverteilung

$$u(\delta K_{1j}) = 0,5 \cdot [S_2(\bar{y}_2) - S_1(\bar{y}_1)] / \sqrt{3} \quad (20)$$

oder aus der Differenz der Standardabweichungen selbst ermittelt

$$u(\delta K_{1j}) = s_2(\bar{y}_2) - s_1(\bar{y}_1). \quad (21)$$

Bei geringer Anzahl der durchgeführten Wiederholmessungen sollte der Unsicherheitsbeitrag vorzugsweise aus der Differenz der Spannweiten nach Gl. 21 bestimmt werden. Die Messung nach b) kann insofern erweitert werden, dass zusätzlich zu den Messungen an den Grenzen auch weitere Messungen innerhalb des festgelegten Bereiches ausgeführt werden.

### 6.5.3 Reinigung

Partikel oder Reinigungsrückstände führen in den meisten Fällen zu signifikant größeren Standardabweichungen der entsprechenden Profilverpunkte bei Wiederholmessungen. Aus diesen Ergebnissen oder auf Grund von Erfahrung ist ein entsprechender Unsicherheitsbeitrag abzuschätzen.

### 6.5.4 Rauschen, Auflösung, Schwingungen

Um den Einfluss durch Rauschen, Auflösung und Schwingungen zu ermitteln, wird das ungefilterte Profil der Messungen an einem Normal mit sehr glatter Oberfläche analysiert. Die Streubreite  $S(P_j)$  der Profilpunkte erlaubt eine Aussage über den Einfluss dieser Eingangsgrößen. Da prinzipiell von einem Linienspektrum ausgegangen werden kann, ist die Eingangsgröße  $\delta K_3$  U-verteilt und für den Unsicherheitsbeitrag gilt

$$u(\delta K_3) = \frac{S(P_j)}{2\sqrt{2}}. \quad (22)$$

### 6.5.5 Tastersignal

#### 6.5.5.1 Eingangsgrößen

Die Empfindlichkeit der Signalübertragungskette (folgend Tastsystem) wird entsprechend VDI/VDE 2631-2 mit Hilfe eines Vergrößerungsnormales bestimmt, mit  $y_{VN} = RON_i(VN)$ . Die Eingangsgrößen werden wie in Kap. 0 in kurzweilige und langweilige Eingangsgrößen unterteilt (Tab. 4). Die Unsicherheitsbeiträge sind abhängig vom Betrag der Messgröße, daher werden die relativen Unsicherheitsbeiträge  $w(x_i) = u(x_i) / |y_{VN}|$  angegeben.

**Tab. 4** Eingangsgrößen bei der Bestimmung der Empfindlichkeit des Tastsystems

Nr.	Eingangsgröße $X_i$	Symbol
1.	Dynamische Eigenschaften	$\delta K_{41}$
2.	Rauschen	$\delta K_{42}$
3.	Antastverhalten	$\delta K_{43}$
4.	Messwert Flick	$\delta L_{31}$
5.	Spindelfehler	$\delta L_{32}$
6.	Ausrichtung Flick	$\delta L_{33}$
7.	Linearität, Hysterese	$\delta L_{34}$
8.	Änderung der Empfindlichkeit	$\delta L_{35}$

#### 6.5.5.2 Unsicherheit der Eingangsgrößen

Die Unsicherheit der Eingangsgrößen wird wie folgt bestimmt.

Die dynamischen Eigenschaften des Tastsystems können aus separaten Untersuchungen abgeschätzt werden (z.B. Messung Mehrwellennormal, Untersuchungen mit Oberflächensimulator). Dieser Einfluss ist zu beachten, wenn höherfrequente Formabweichungen bestimmt werden.

Der Einfluss von Rauschen, Auflösung und Schwingungen ist identisch mit dem Einfluss aus Kap. 6.5.4, d.h.

$$w(\delta K_{42}) = \frac{u(\delta K_3)}{y_{VN}} \quad (23)$$

Liegen keine separaten Untersuchungen vor, wird der Unsicherheitsbeitrag durch das Antastverhalten aus wiederholten Messungen über die Standardabweichung des Mittelwertes der Empfindlichkeit bestimmt.

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik	DKD-R 4-4	
	<a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	16/23

$$w(\delta K_{43}) = \frac{s(\bar{y}_{VN}^*)}{y_{VN}} \quad (24)$$

Der Unsicherheitsbeitrag für den Messwert des Vergrößerungsnormalen ist die relative Standardunsicherheit  $u = U/k$  entsprechend dem Kalibrierschein.

$$w(\delta L_{31}) = \frac{U(y_{VN})}{k \cdot y_{VN}} \quad (25)$$

Der unkorrigierte Spindelfehler ist in dem gemessenen Profil enthalten. Die maximal mögliche Abweichung beträgt

$$\delta L_{32} = \delta L_2^\# + u(\delta L_2^\#) \quad (26)$$

und der Unsicherheitsbeitrag bei einer angenommenen Rechteckverteilung

$$w(\delta L_{32}) = \frac{\delta L_{32}}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{y_{VN}} \quad (27)$$

Der Einfluss der Ausrichtung des Vergrößerungsnormalen ist durch separate Untersuchungen abzuschätzen (z.B. Messung der Geradheits- und Parallelitätsabweichungen an einem Flick). Der Unsicherheitsbeitrag durch Linearität und Hysterese des Tastsystems ist aus separaten Untersuchungen abzuschätzen.

Wird die Empfindlichkeit nicht vor jeder Formmessung bestimmt, muss die Langzeitstabilität des Tastsystems berücksichtigt werden. Die Änderung der Empfindlichkeit bezieht sich auf den Zeitraum zwischen zwei wiederholten Messungen zur Bestimmung der Empfindlichkeit. Durch Langzeituntersuchungen kann eine mögliche Änderung innerhalb bestimmter Grenzen mit einer Rechteckverteilung angegeben werden.

Liegen keine weiteren Informationen vor, kann davon ausgegangen werden, dass die Eingangsgrößen aus Tab. 4 voneinander unabhängig sind. Für die Unsicherheitsbeiträge  $w(\delta K_4)$  und  $w(\delta L_3)$  aus Tab. 2 folgt daraus

$$w(\delta K_4) = \sqrt{w^2(\delta K_{41}) + w^2(\delta K_{42}) + w^2(\delta K_{43})} \quad (28)$$

bzw.

$$w(\delta L_3) = \sqrt{w^2(\delta L_{31}) + w^2(\delta L_{32}) + w^2(\delta L_{33}) + w^2(\delta L_{34}) + w^2(\delta L_{35})} \quad (29)$$

Die Verteilung der Ausgangsgrößen  $\delta K_4$  und  $\delta L_3$  kann entsprechend Kap. 6.3.5 abgeschätzt werden. Beide Ausgangsgrößen können i. A. als normalverteilt angenommen werden, da die in der Regel dominierenden Eingangsgrößen  $\delta K_{43}$  und  $\delta L_{31}$  ebenfalls normalverteilt sind.

## 6.5.6 Ausrichtung und Deformation des Messobjektes

### 6.5.6.1 Einfluss der Zentrierung der Zylinderachse auf Rundheitsmessungen

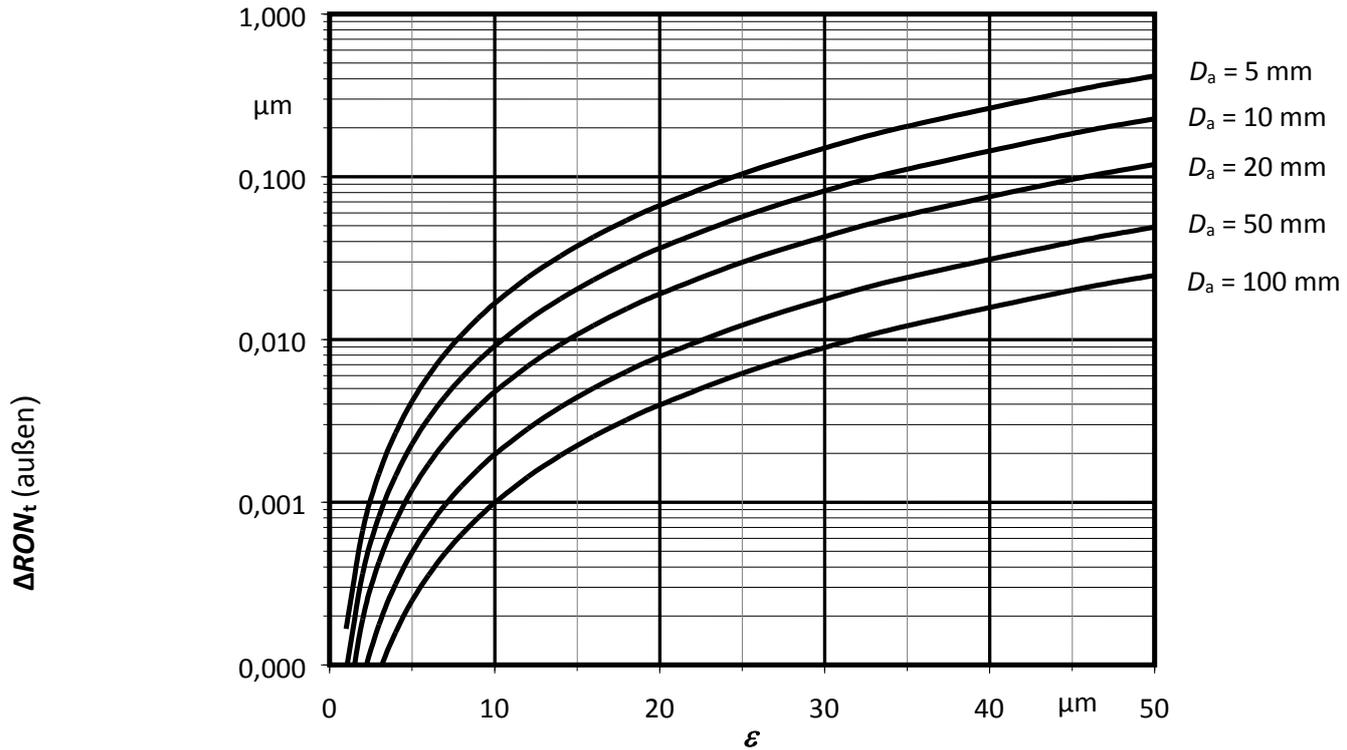
Eine exzentrische Lage der Prüflingsachse zur Drehachse führt zu systematischen Abweichungen der Rundheitsmessung [Bart 94]. Die Abweichung beträgt bei der Außenmessung

$$\Delta RON_t(\varepsilon) \approx \frac{\varepsilon^2}{D_a + d} \quad (30)$$

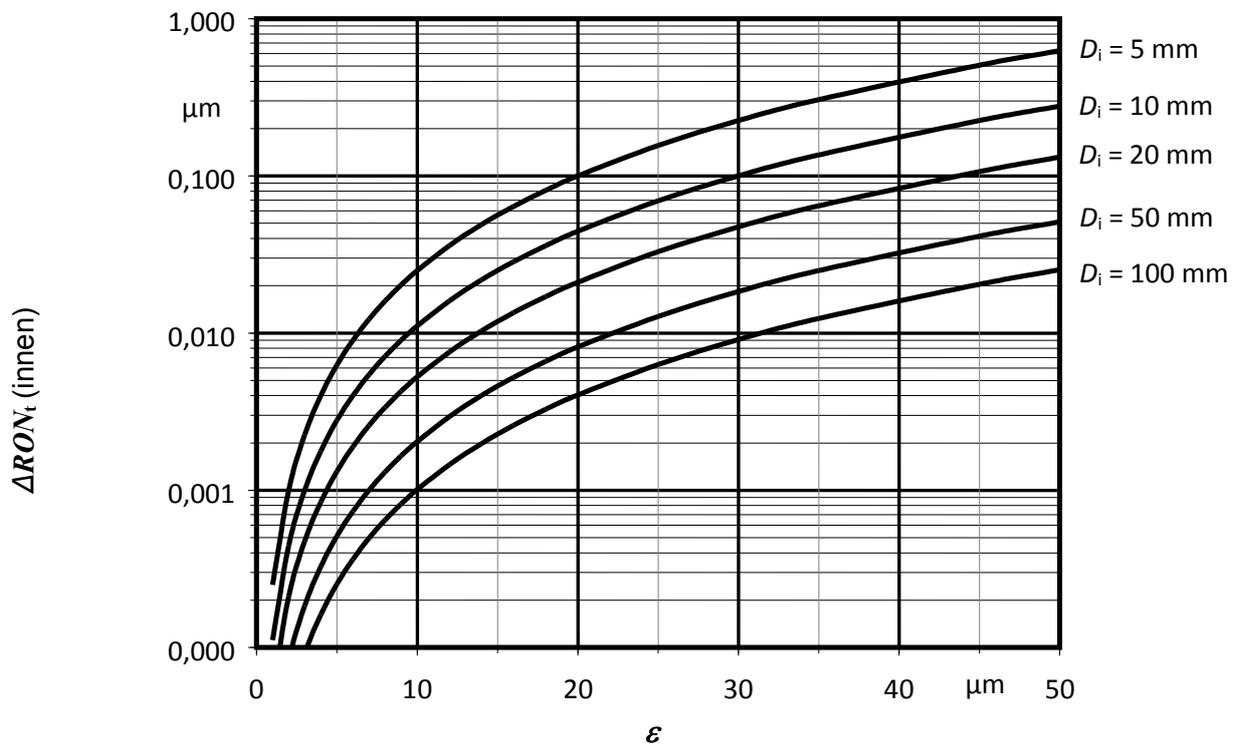
und bei der Innenmessung

$$\Delta RON_i(\varepsilon) \approx \frac{\varepsilon^2}{D_i - d} \quad (31)$$

mit  $\varepsilon$  Zentrierung Prüflingsachse – Drehachse,  $D_a$  Außendurchmesser,  $D_i$  Innendurchmesser,  $d$  Tastkugeldurchmesser. Der Unsicherheitsbeitrag ist gleich der nicht korrigierten systematischen Abweichung.



**Abb. 1** Einfluss der Zentrierung auf Rundheitsmessungen (außen);  $d = 1 \text{ mm}$



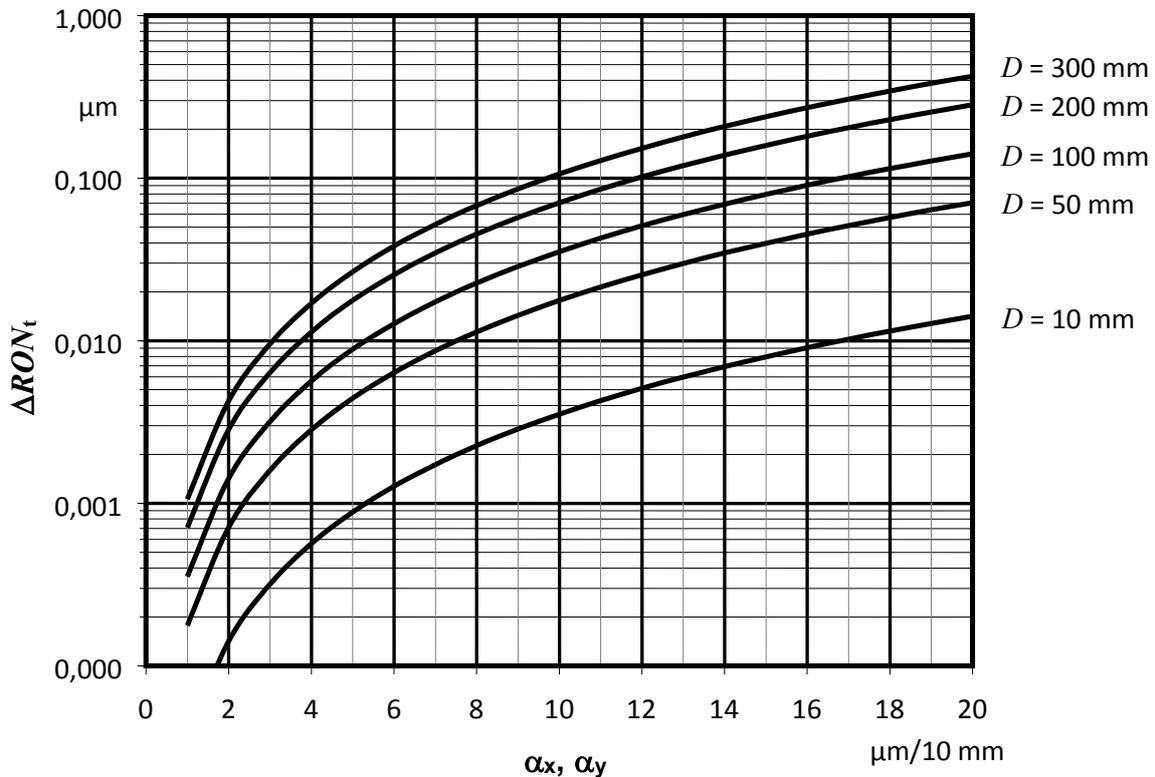
**Abb. 2** Einfluss der Zentrierung auf Rundheitsmessungen (innen);  $d = 1 \text{ mm}$

#### 6.5.6.2 Einfluss der Nivellierung der Zylinderachse auf Rundheitsmessungen

Eine Kippung der Zylinderachse zur Drehachse führt bei Rundheitsmessungen zu einer systematischen Abweichung [Bart 94]

$$\Delta RON_t \approx \sqrt{(R / \cos(\alpha_x) - R)^2 + (R / \cos(\alpha_y) - R)^2} \quad (32)$$

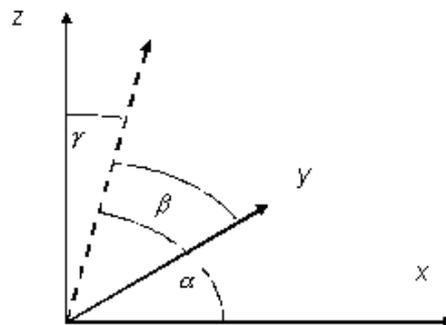
mit  $R$  Radius des Zylinders,  $\alpha_x, \alpha_y$  Kippung des Zylinders. Der Unsicherheitsbeitrag ist gleich der unkorrigierten systematischen Abweichung.



**Abb. 3** Einfluss der Nivellierung der Zylinderachse auf Rundheitsmessungen

### 6.5.6.3 Einfluss der Nivellierung der Zylinderachse auf Geradheitsmessungen

Der Einfluss der Nivellierung der Zylinderachse auf Geradheitsmessungen kann durch Lösung des Gleichungssystems bei Schnitt eines gekippten Zylinders mit einer Ebene ermittelt werden. In Abb. 4 ist das entsprechende Koordinatensystem mit der gestrichelt gekennzeichneten Zylinderachse dargestellt.



**Abb. 4** Koordinatensystem, gestrichelt - Zylinderachse,  $x$  - Tasterrichtung

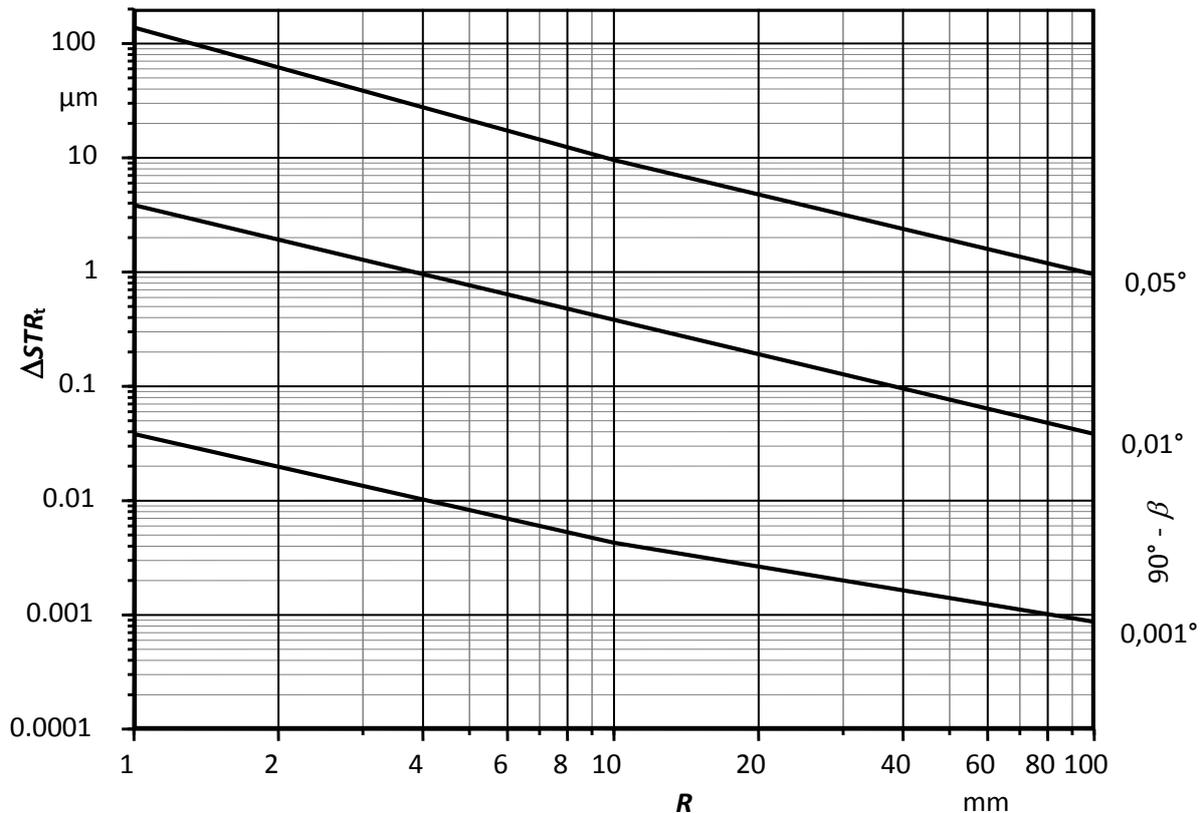
Die Gleichung für den Schnitt von Zylinder und Ebene beträgt für einen hyperbolischen Zylinder nach [Joos94]

$$\frac{(x - z \cos \alpha / \cos \gamma)^2}{R^2} - \frac{(y - z \cos \beta / \cos \gamma)^2}{R^2} = 1 \quad (33)$$

Bei einer Geradheitsmessung wird der Zylinder auf dem höchsten Punkt angetastet, d.h.

$$y = 0. \quad (34)$$

Für diesen Fall ergeben sich nach Gl. (33) die in Abb. 5 dargestellten Abweichungen, beispielhaft dargestellt für Kippungen des Zylinders von  $0,05^\circ$ ,  $0,01^\circ$  und  $0,001^\circ$ . Bei einer maximal zulässigen Kippung von  $2 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$  bzw.  $0,001^\circ$  entsprechend Kap. 0 liegen die Abweichungen für Zylinder mit Radien größer als  $4 \text{ mm}$  unter  $10 \text{ nm}$  und sind daher in der Regel vernachlässigbar. Für Zylinder mit kleineren Radien sollten kleinere Kippungen eingestellt werden bzw. die Abweichungen sind bei der Ermittlung der Messunsicherheit zu berücksichtigen.



**Abb. 5** Abweichungen der Geradheitsmessungen durch die Kippung eines Zylinders in  $y$ -Richtung. Länge der gemessenen Mantellinie  $100 \text{ mm}$

#### 6.5.6.4 Deformation des Messobjektes durch die Aufspannung

Der Unsicherheitsbeitrag ist ggf. durch separate Untersuchungen zu bestimmen (z.B. Wiederholmessungen mit jeweils neuer Aufspannung, Variation der Spannmethode).

### 6.5.7 Führungsabweichungen

#### 6.5.7.1 Unkorrigierte Führungsabweichungen

Bei nicht korrigierten systematischen Eingangsgrößen (hier nicht korrigierte Führungsabweichung  $\delta L_{2j}^\#$ ) beträgt die Unsicherheit eines Profilverpunktes nach [Lira 98]

$$u^2(P_j^\#) = \frac{s^2(P_j)}{n} + b \cdot \sum_{l=1}^p u^2(\delta K_{lj}) + \sum_{h=2}^q u^2(\delta L_{hj}) + \left[ (\delta L_{2j}^\#)^2 + u^2(\delta L_{2j}^\#) \right] \quad (33)$$

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	21/23

mit  $\delta L_{2j}^{\#}$  unkorrigierte systematische Führungsabweichung und  $u(\delta L_{2j}^{\#})$  Unsicherheit der Führungsabweichung.

Die Führungsabweichung wird mit Hilfe eines Normals bestimmt. Ist die Anzahl der Wiederholmessungen hinreichend groß ( $n > 10$ ) kann von einer Normalverteilung der Führungsabweichung ausgegangen werden (vgl. Kap. 6.3.5). Die Unsicherheit der ermittelten Führungsabweichung wird aus der Formabweichung des Normals  $\delta N_{\text{Kal}}$ , der im Kalibrierschein angegebenen Standardunsicherheit  $u(\delta N_{\text{Kal}})$  sowie der Standardabweichung der Messwerte bei den Wiederholmessungen  $s(M_{\text{Kal}})$  bestimmt.

$$u^2(\delta L_{2j}^{\#}) = \delta N_{\text{Kal}}^2 + u^2(\delta N_{\text{Kal}}) + s^2(\bar{M}_{\text{Kal}}) \quad (34)$$

Ist die Art der Führungsabweichungen bekannt, kann der Korrelationskoeffizient  $r$  für die Eingangsgröße  $\delta L_2$  für die meisten Anwendungen hinreichend genau abgeschätzt werden (Tab. 2). In Tab. 5 sind mögliche Fallunterscheidungen zusammengestellt.

**Tab. 5** Fallunterscheidungen über den Einfluss von Führungsabweichungen

Art der Führung	Gleitführung Luftführung	Kugelführung Rollenführung	
Einfluss (z.B.)	Temperaturdrift	Formabweichung von Kugeln	
		$\Delta x(P_{\text{max}}, P_{\text{min}}) \geq 2\lambda_c$	$\Delta x(P_{\text{max}}, P_{\text{min}}) < 2\lambda_c$
Abhängigkeit	$P_{\text{max}} = f(P_{\text{min}})$	$P_{\text{max}} \neq f(P_{\text{min}})$	$P_{\text{max}} = f(P_{\text{min}}, \Delta x, \lambda_c)$
Korrelation	$r \rightarrow 1$	$r \rightarrow 0$	$0 < r < 1$

#### Erläuterung zu Tab. 5:

$P_{\text{max}}$  und  $P_{\text{min}}$  sind voneinander abhängig, wenn ein und derselbe Einfluss (z.B. Temperaturdrift) zu einer Änderung beider Profilpunkte führt.

$P_{\text{max}}$  und  $P_{\text{min}}$  sind voneinander unabhängig, wenn ein und derselbe Einfluss (z.B. Formabweichung von Lagerkugeln) entweder  $P_{\text{max}}$  oder  $P_{\text{min}}$  beeinflusst und ihr örtlicher Abstand größer als  $2\lambda_c$  ist. Ist der örtliche Abstand kleiner als  $2\lambda_c$  entsteht durch die Filterung eine Korrelation (vgl. Kap. 6.3.1), die ggf. zu bestimmen ist.

#### 6.5.7.2 Korrigierte Führungsabweichungen

Bei Korrektur der Führungsabweichungen durch Mehrlagenverfahren oder Umschlagverfahren gilt Gl. (9) in Kap. 6.3.2. Der Unsicherheitsbeitrag durch die Führungsabweichungen  $u(\delta L_2)$  ist dann mit geeigneten Verfahren zu bestimmen, vgl. [Neug 01].

#### 6.5.8 Thermische Drift

Driften führen zu einer Verzerrung des gemessenen Profils. Der Unsicherheitsbeitrag ist durch separate Untersuchungen zu bestimmen (z.B. Wiederholmessungen, Stabilitätsuntersuchungen u. a., vgl. auch [Neug 01]). Bei Rundheitsmessungen kann der Einfluss durch überlaufende Messung des Profils teilweise korrigiert werden.

## 7 Dokumentation der Messergebnisse

Die für die Kenngrößen ermittelten Messunsicherheiten sind im Kalibrierschein zu dokumentieren. Eine Aufzeichnung eines charakteristischen Profils ist Bestandteil des Kalibrierscheins oder als Anlage beizufügen. Die Vorgaben von DAkkS-DKD-5 sind einzuhalten.

## 8 Symbole und Abkürzungen

$d$	Tastkugeldurchmesser
$D$	Durchmesser eines Messobjektes
$k$	Erweiterungsfaktor
LS	Least-Square Auswerteverfahren
$m$	Anzahl der Profilpunkte
MZ	Minimum-Zone Auswerteverfahren
$n$	Anzahl der Wiederholmessungen
$P$	Messwert für einen Profilpunkt
$P^*$	Anzeigewert für einen Profilpunkt
$\delta P$	Korrekturwert für einen Profilpunkt
$P_{\max}$	maximaler Profilpunkt
$P_{\min}$	minimaler Profilpunkt
$r$	Korrelationskoeffizient
$R$	Radius eines Messobjektes
$RON_t$	Parameter der Rundheitsabweichungen
$s$	Standardabweichung
$S$	Streubreite
$STR_t$	Parameter der Geradheitsabweichungen
$c_i$	Sensitivitätskoeffizient
$u(x_i)$	Standardunsicherheit
$U(y)$	erweiterte Messunsicherheit
$u^2(x_i)$	Varianz
$w(x_i)$	relative Standardunsicherheit
$\lambda$	Wellenlänge einer Eingangsgröße
$\lambda_c$	Filter-Grenzwellenlänge
$\alpha$	Winkel zwischen der Zylinderachse und der Drehachse (bzw. der Vertikalführung)
$X, Z$	Eingangsgrößen
$Y$	Ausgangsgröße (Messgröße)
$y_{VN}$	Messwert für ein Vergrößerungsnormal
$\Delta x$	lateraler Abstand zwischen zwei benachbarten Profilpunkten
$\delta K$	kurzwellige Eingangsgröße
$\delta L$	langwellige Eingangsgröße
$\varepsilon$	Zentrierung zwischen Zylinderachse und Drehachse
MZCI	Minimum Zone reference Circles Kreisring mit minimaler Radiendifferenz, der das Profil einschließt
LSCI	Least Squares mean reference Circle Ausgleichskreis
MZLI	Minimum Zone reference Lines Paralleles Geradenpaar minimalen Abstands, das das Profil einschließt
LSLI	Least Squares mean reference Line Ausgleichsgerade

	Kalibrieren von Normalen und Messgeräten für die Formmesstechnik  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AB">https://doi.org/10.7795/550.20180828AB</a>	DKD-R 4-4	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	23/23

## 9 Zitierte Normen und weitere Unterlagen

VDI/VDE 2631 Formprüfung

- Blatt 1: Grundlagen zur Bestimmung von Form- und Lageabweichungen, 1999
- Blatt 2: Bestimmung der Empfindlichkeit der Signalübertragungskette, 2001
- Blatt 3: Eigenschaften und Auswahl von Filtern, 2005
- Blatt 4: Bestimmung der radialen Drehführungsabweichung, 1999
- Blatt 5: Bestimmung der axialen Drehführungsabweichung, 2004
- Blatt 6: Bestimmung der Geradführungsabweichungen, 2005
- Blatt 8: Stabilitätsüberwachung von Formmessgeräten, 2005
- Blatt 9: Beispiele für Mess- und Auswertebedingungen, 2003

VIM – Internationales Wörterbuch der Metrologie, 2. Auflage 1994, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, ISBN 3-410-13086-1

GUM – Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, 1995

DIN 1319 Grundlagen der Messtechnik

- Blatt 1: Grundbegriffe, Januar 1995
- Blatt 2: Begriffe für Messmittel, Oktober 2005
- Blatt 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit, Mai 1996
- Blatt 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit, Februar 1999

DAkKS-DKD-3, Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, 2010

DAkKS-DKD-4, Rückführung von Mess- und Prüfmitteln auf nationale Normale, 2010

DAkKS-DKD-5, Anleitung zum Erstellen eines DAkKS-Kalibrierscheines, 2010

VDI/VDE 2631 Formprüfung, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH.

DIN ISO 1101 (03/85) Technische Zeichnungen; Form- und Lagetolerierung

DIN EN ISO 10360

VDI/VDE 2617

DIN EN ISO 14253

[Bart 94] Bartelt R.: Messunsicherheit - Ursache: Mensch. QZ 39 (1994), 1136-1141

[Krys 01] Krystek M.: Measurement uncertainty propagation in the case of filtering in roughness measurement. Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 63-67

[Lira 89] Lira I.H., Wöger W.: Evaluation of the uncertainty associated with a measurement result not corrected for systematic effects. Meas. Sci. Technol. 9 (1998) 1010-1011

[Neug 01] Neugebauer M.: Uncertainty analysis for roundness measurements by the example of measurements on a glass hemisphere. Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 68-76

[Joos94] Joos G., Richter E. W.: Höhere Mathematik, Ein kompaktes Lehrbuch für Studium und Beruf. Verlag Harri Deutsch, ISBN 3-8171 1353-6