

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Richtlinie  
DKD-R 4-2  
Blatt 4**

**Kalibrieren von Geräten und  
Normalen für die  
Rauheitsmesstechnik –  
Kalibrierung des horizontalen  
Messsystems von Tastschnittgeräten**

---

Ausgabe 03/2024

<https://doi.org/10.7795/550.20240411>



	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	2 / 25

## Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

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

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

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

### Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 592-8021

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

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	3 / 25

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 4-2 Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik, Blatt 4 Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten, Ausgabe 03/2024, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20240411*

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. Rolf Krüger-Sehm, Bad Bevensen

Dr. Raimund Volk, Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH, Villingen-Schwenningen

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

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	4 / 25

## 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 *Länge* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

## Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich .....	7
2	Begriffe, Definitionen .....	8
2.1	Begriffe aus Normen .....	8
2.2	Hier verwendete Begriffe und Abkürzungen .....	8
3	Messeinrichtung .....	8
4	Umgebungsbedingungen .....	8
5	Verfahren der Kalibrierung .....	8
5.1	Kalibrierfähigkeit des Gerätes .....	9
5.1.1	Testen des Grundrauschens .....	9
5.1.2	Testen der vertikalen Kalibrierung .....	9
5.1.3	Testen der lateralen Achse .....	9
6	Messunsicherheit allgemein .....	9
6.1	Modell .....	9
6.2	Einflussgrößen .....	10
6.3	Unsicherheitskomponenten (normalunabhängig) .....	10
6.3.1	Messpunktabstand .....	10
7	Rückführung .....	11
7.1.1	Temperatureinfluss .....	11
7.1.2	Materialeinfluss .....	11
7.1.3	Zeitliche Stabilität .....	11
7.2	Bogenbewegung .....	12
8	Kalibrierschein .....	12
9	Wiederholung der Kalibrierung, Zwischenprüfung .....	13
10	Literaturverzeichnis .....	14
A	Anhang: Kalibrierung mit Si-Lateralnormal .....	15
A.1	Durchführung der Messung .....	15
A.1.1	Beschreibung des Normalen .....	15
A.1.2	Vorbereitende Maßnahmen .....	16
A.1.3	Messbedingungen .....	16
A.1.4	Messstellenplan .....	17
A.1.5	Auswertung .....	17
A.2	Messunsicherheit mit Si-Lateralnormal .....	18
A.2.1	Geräterauschen .....	18
B	Anhang: Kalibrierung mit Geometrienormal .....	21
B.1	Durchführung der Messung .....	21

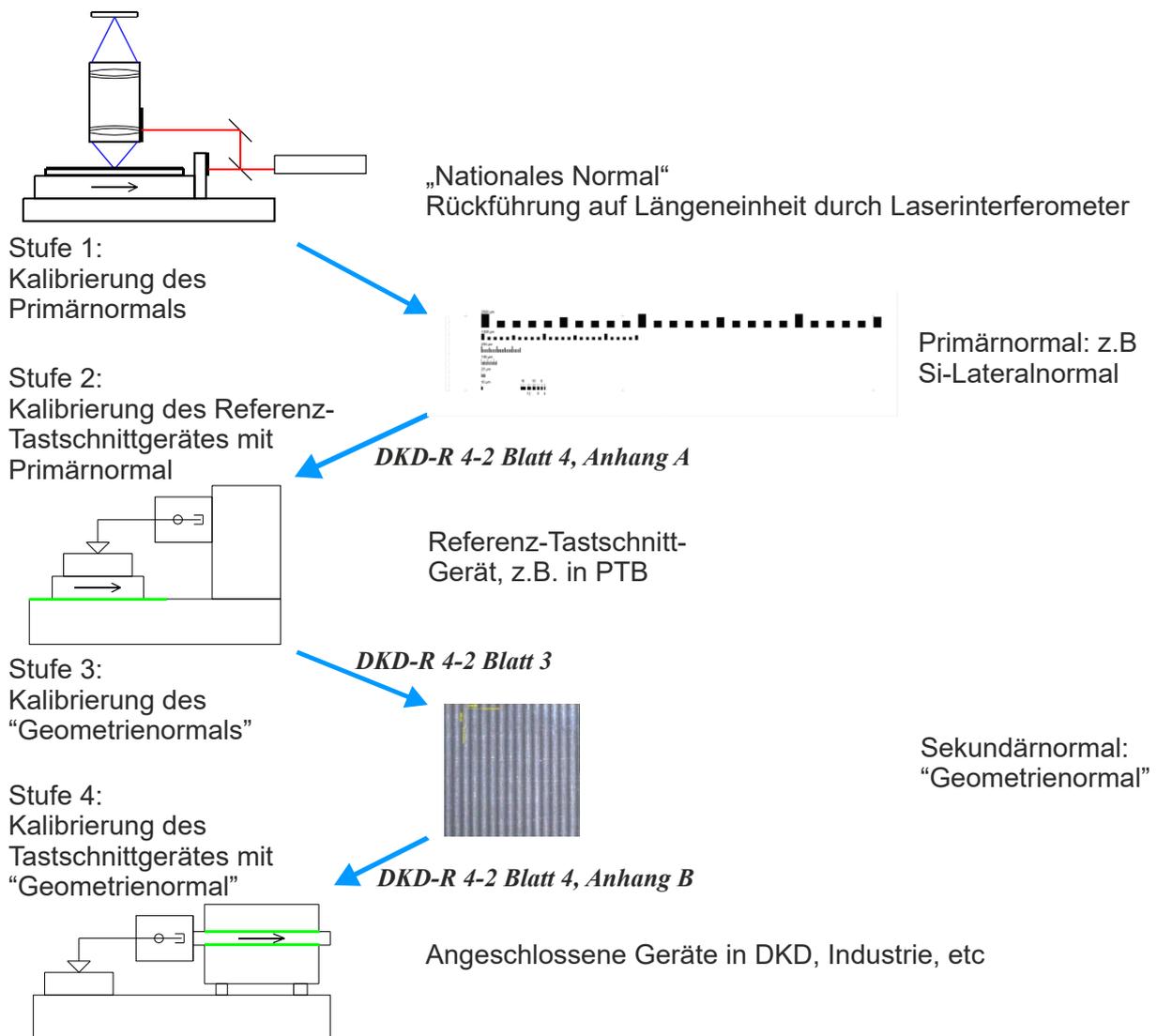
	<b>Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten</b>  <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	6 / 25

B.1.1	Beschreibung des Normalen .....	21
B.1.2	Vorbereitende Maßnahmen .....	21
B.1.3	Messbedingungen .....	21
B.1.4	Messtellenplan .....	21
B.1.5	Auswertung .....	22
B.2	Messunsicherheit mit Geometrienormal .....	23
B.2.1	Geräterauschen .....	23
B.2.2	Kombinierte Messunsicherheit .....	23

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie beschreibt die Rückführung der Skalierung der horizontalen Achse von Tastschnittgeräten nach ISO 3274 auf das nationale Längennormal. Die Rückführung basiert auf der Bestimmung des Wertes einer horizontalen Oberflächenkenngröße wie  $RS_m$  an einem kalibrierten Bezugsnormal.

Wie Abbildung 1 zeigt, wird bei der Weitergabe der Längeneinheit abwechselnd ein Normal zum Kalibrieren eines Gerätes und ein kalibriertes Gerät zum Kalibrieren eines Normal verwendet. Der Anwendungsbereich dieser Richtlinie gilt der zweiten Stufe der Weitergabekette, die in Anhang A beschrieben ist und der vierten Stufe der Weitergabekette, die in Anhang B beschrieben ist.



**Abbildung 1:** Weitergabe der Längeneinheit in horizontaler Richtung bei der Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	8 / 25

## 2 Begriffe, Definitionen

### 2.1 Begriffe aus Normen

Begriffe für die Charakterisierung von Oberflächenmessgeräten werden aus DIN EN ISO 3274 und DIN EN ISO 25178-601 übernommen, Definitionen von Oberflächenkenngrößen aus DIN EN ISO 4287 verwendet und Messbedingungen werden entsprechend DIN EN ISO 4288 angegeben. Angaben für die Kalibrierung von Tastschnittgeräten werden entsprechend DIN EN ISO 12179 gemacht.

### 2.2 Hier verwendete Begriffe und Abkürzungen

$U_n$	Erweiterte Unsicherheit des Bezugsnormals
$R_{z0}$	Grundrauschen des Gerätes
$L$	Länge des Hebelarmes, an dem sich die Tastspitze befindet
$H$	Höhe des Tasters
$P_{Sm,Normal}$	$P_{Sm}$ des zur Rückführung benutzen Bezugsnormals (aus dessen Kalibrierschein)
$P_{Sm,M,Normal}$	aktuell am Bezugsnormal gemessene Kenngröße
$P_{Sm,Objekt}$	am zu kalibrierenden Messobjekt gemessene Kenngröße
$D_x$	Messpunktastand in Vorschubrichtung
$l$	Profillänge: Teil der Messstrecke, der in die Auswertung von $P_{Sm}$ einbezogen wurde
$n$	Anzahl der Profilelemente, die in die Auswertung von $P_{Sm}$ einbezogen wurden
$\sigma$	Steigung des Profils im Nulldurchgang
$p$	Länge der Profilelemente

## 3 Messeinrichtung

Die Messeinrichtung für die Durchführung dieser Richtlinie ist ein Tastschnittgerät entsprechend DIN EN ISO 25178-601. Die Oberfläche des Normals muss sich parallel zur Vorschubrichtung ausrichten lassen. Das Koordinatensystem ist in Abbildung 2 eingetragen.

Der Tastspitzenradius muss 2  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$  betragen, der Messpunktastand muss  $\leq 0,5 \mu\text{m}$  sein. Die Vorschubgeschwindigkeit muss  $\leq 0,5 \text{ mm/s}$  sein.

## 4 Umgebungsbedingungen

Die Temperaturänderung während der Messung muss kleiner als  $\pm 0,5 \text{ K}$  sein.

Die absolute Temperatur muss zwischen 18  $^{\circ}\text{C}$  und 25  $^{\circ}\text{C}$  liegen.

Temperaturgradienten z. B. durch direkte Sonneneinstrahlung müssen vermieden werden.

## 5 Verfahren der Kalibrierung

Für die Bestimmung der horizontalen Skalierung werden Normale vom Typ PPS und PPT (DIN EN ISO 25178-70) gemessen. Das abgetastete Profil besteht aus regelmäßig angeordneten Profilelementen mit gut unterscheidbaren Bergen und Tälern. Durch Berechnung des Parameters  $P_{Sm}$  wird der Wert des mittleren Abstands der Profilelemente bestimmt. Durch diese Vorgehensweise wird eine gemittelte Skalierung des Teiles der horizontalen Achse erreicht, der bei der aktuellen Messung benutzt wurde. Bei der

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	9 / 25

Auswertung mit  $R_{Sm}$  muss die Kalibrierung für jedes benutzte Wellenfilter und die damit verbundene Taststrecke einzeln durchgeführt werden und gilt nur für diese Kombination.

## 5.1 Kalibrierfähigkeit des Gerätes

Bevor das Gerät kalibriert wird, muss es gemäß seiner Bedienungsanleitung unter den Einstellungen überprüft werden, unter denen es später benutzt werden soll. Diese Einstellungen betreffen die Wahl von  $\lambda_c$ - und  $\lambda_s$ -Filtern, Messstrecke und Position der Spuren in Bezug auf die Vorschubeinheit.

Das Gerät ist unter Laborbedingungen kalibrierfähig, wenn die nachfolgenden Grenz-Messwerte nicht überschritten werden. Bei der Kalibrierung vor Ort in industrieller Umgebung können wegen der rauerer Bedingungen größere, zu vereinbarende Grenz-Messwerte festgelegt werden.

### 5.1.1 Testen des Grundrauschens

Es wird über die Messstrecke und den Teil der Vorschubeinheit, der später benutzt werden soll, der Wert von  $Rz_0$  auf einem Planglas bestimmt. Das Grundrauschen muss kleiner als 30 nm sein.

### 5.1.2 Testen der vertikalen Kalibrierung

Die z-Achse des Gerätes wird entsprechend DKD-R 4-2 Blatt 1 überprüft, indem ein Tiefeneinstellnormal mit bekannter Tiefe und Form gemessen wird. Der Wert von  $Pt$  (für Nenniefen von 1 bis 10  $\mu\text{m}$ ) muss mit weniger als 1 % Abweichung vom Nennwert gemessen werden. Wenn für ein Geometrie-Normal zum Test entsprechend Kap. 5.1.3 auch kalibrierte Höhenmesswerte ( $Ra$ ,  $Rz$ ) vorliegen, kann durch Messen dieser Größen auch die vertikale Kalibrierbarkeit überprüft werden. Die Abweichung der gemessenen Werte von den kalibrierten muss dabei kleiner als die erweiterte Messunsicherheit des Normals sein.

### 5.1.3 Testen der lateralen Achse

Mit einem Geometrie-Normal wird die Achse parallel zur Vorschubrichtung überprüft. Die Abweichung des Messwertes von  $P_{Sm}$  muss kleiner als die erweiterte Messunsicherheit dieses Normals sein.

## 6 Messunsicherheit allgemein

### 6.1 Modell

Die Standardunsicherheiten der Einflussgrößen, die die Unsicherheit des Kennwertes  $P_{Sm}$  beeinflussen, werden quadratisch addiert und die Summe mit dem Erweiterungsfaktor  $k$  multipliziert, der eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % gewährleistet.

Entsprechend der Definition in der DIN EN ISO 4287 (neu, aber noch nicht verbindlich ist ISO 21920-2):

$$P_{Sm} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_{Si} ,$$

wobei  $i$  die Nummer des  $i$ -ten Profilelements der Länge  $X_{Si}$  ist. Da sich die Profilelemente nahtlos aneinander anschließen, ergibt die Summe der  $P_{Sm}$  die Profillänge  $l$ . Die Profillänge  $l$  ist der Abstand zwischen dem Anfangspunkt  $x_a$  und Endpunkt  $x_e$  des ausgewerteten Profils der Messlänge  $l_n$ .

Für die Profillänge  $l$  wird das folgende Modell angesetzt:

$$l = n \cdot P_{Sm} + \delta x_a + \delta x_e$$

mit dem Ansatz für die Einflussgrößen  $\delta x_a = \delta x_e = \delta x$  der horizontalen Abweichung der einzelnen Messung des Profilendes.

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	10 / 25

Die betrachteten  $x_a$  und  $x_e$  liegen so weit auseinander, dass sie durch das  $\lambda_s$ -Filter nicht korreliert werden. Durch das Welligkeitsfilter wiederum ist die Unsicherheit der Punkte des R-Profiles praktisch gleich der der Punkte des ungefilterten P-Profiles (Bezug: [15]). Daher gelten diese Betrachtungen sowohl für  $R_{Sm}$  als auch für  $P_{Sm}$ .

Für die Unsicherheit von  $P_{Sm}$  ergibt sich dann:

$$u^2(P_{Sm}) = \frac{1}{n^2} \cdot (2 \cdot u^2(\delta x) + u^2(l)) \quad (1)$$

wobei  $u(\delta x)$  die Unsicherheit der Profildelage und  $u(l)$  die Unsicherheit der Profillänge  $l$  ist.

### Anmerkung

Die Messunsicherheit nach neuer  $P_{Sm}$ -Definition (2019) kann gegenüber der alten  $P_{Sm}$ -Definition (DIN EN ISO 4287: 1989) einen kleineren Wert ergeben, da es bei der Zählung der Profilelemente in der Messstrecke weniger wegfallende Profilteile und damit mehr Profilelemente gibt als bisher bei den Zählungen in den Einzelmessstrecken.

## 6.2 Einflussgrößen

Für die Positionsabweichungen der Profilelement-Endpunkte ist das folgende Modell gültig:

$$\delta x = \delta x_0 + \delta x_w + \delta x_b + \delta x_{dig}$$

Die Einflussgrößen im Einzelnen:

- $\delta x_0$  Rauschen in der  $x$ -Position durch Rauschen des Antastsystems in vertikaler Richtung.
- $\delta x_w$  Positionsabweichung durch die Welligkeit  $W_{t_0}$  des Normals; hat sich in der früheren Version der DKD-Richtlinie als vernachlässigbar herausgestellt.
- $\delta x_b$  Abweichung durch Bogenbewegung, bei berücksichtigter Korrektur der Tastspitzengeometrie als ein Fehler höherer Ordnung vernachlässigbar
- $\delta x_{dig}$  Abweichung in der Festlegung eines Profilelementes aufgrund des Messpunkt- abstandes  $D_x$ .

Für die Profillänge  $l$  gilt das Modell

$$l = l_r + l_{th} + l_g$$

wobei  $l_r$  die Profillänge auf dem Bezugsnormal,  $l_g$  die Abweichung durch unbekanntes Messposition im Profil ist und  $l_{th}$  die thermisch bedingte Längenänderung des Bezugsnormals berücksichtigt.

## 6.3 Unsicherheitskomponenten (normalunabhängig)

Die in diesem Abschnitt genannten Unsicherheitsquellen gelten allgemein für Tastschnittgeräte, unabhängig von den Eigenschaften des Normals. Zur Bestimmung der Gesamt- Unsicherheit der horizontalen Kalibrierung treten jeweils die Unsicherheitskomponenten dazu, die beim Kalibriervorgang durch die unterschiedliche Wechselwirkung zwischen dem Lateralnormal (s. Anhang A) bzw. dem Rillenabstandsnormal (s. Anhang B) mit deren typischen Eigenschaften und dem Gerät auftreten.

### 6.3.1 Messpunkt Abstand

Der Nulldurchgang des Signals zur Lokalisierung eines Profilelementes kann bei einer Auswertung im Ortsraum nur mit einer maximalen Abweichung von  $\pm D_x/2$  festgestellt

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	11 / 25

werden ( $D_x$ : horizontales Abtastintervall). Die daraus entstehende Unsicherheit  $u(\delta x)$  durch die Digitalisierung hat eine Gleichverteilung mit  $D_x$  als Spanne.

$$u^2(\delta x_{\text{dig}}) = \frac{D_x^2}{12}$$

Wird die Auswertung im Frequenzraum durchgeführt, verringert sich dieser Beitrag gegebenenfalls.

## 7 Rückführung

Die Unsicherheit durch den Rückführungsvorgang enthält:

Die Unsicherheit des horizontalen Skalierungsfaktors, der während der Gerätekalibrierung durch die Bestimmung von  $P_{\text{Sm}}$  über die Profillänge ( $n \cdot P_{\text{Sm,Normal}}$ ) an einem Bezugsnormal ermittelt wird. Neben der Längeneinheit wird auch die Unsicherheit des Bezugsnormals  $u(P_{\text{Sm,Normal}})$  weitergegeben, die in dessen Kalibrierschein ausgewiesen ist.

Es muss berücksichtigt werden, dass die Messposition auf dem Bezugsnormal während der Kalibrierung des Instrumentes eine andere sein kann als während der Kalibrierung des Bezugsnormals. Ein Schätzwert für die Unsicherheit wird aus der Standardabweichung  $s(P_{\text{Sm,M,Normal}})$  ermittelt, die sich aus der eigenen Messung von  $P_{\text{Sm}}$  am Bezugsnormal über die Profillänge  $l$  (mit  $n$  Profilelementen) an den  $m_t$  Positionen ergibt, an denen das Bezugsnormal laut Kalibrierschein kalibriert wurde. Somit ist

$$u^2(l_r) = n^2 \cdot u^2(P_{\text{Sm,Normal}}) + \frac{n^2}{m_t} \cdot s^2(P_{\text{Sm,M,Normal}}).$$

Beide Größen haben eine gaußförmige Wahrscheinlichkeitsverteilung.

### 7.1.1 Temperatureinfluss

Der Temperaturunterschied zwischen Kalibrierung und Nutzung des Bezugsnormals erzeugt eine systematische Abweichung. Der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_{\text{th}}$  des Trägermaterials muss berücksichtigt werden, um eine geänderte Länge  $l_{\text{th}} = \Delta T \cdot \alpha_{\text{th}} \cdot l$  zu korrigieren.

Bei der Berechnung der Unsicherheit der thermischen Längenänderung  $u(l_{\text{th}})$  ist unter Annahme realistischer Bedingungen ( $\Delta T = 2 \text{ K}$ ,  $u(\Delta T) = 0,2 \text{ K}$ ,  $u_{\text{rel}}(\alpha_{\text{th}}) = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $u_{\text{rel}}(l) = 10^{-4}$ ) sowohl der Einfluss des Temperaturunterschiedes  $u(\Delta T)$  als auch der des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $u(\alpha_{\text{th}})$  einzeln als Unsicherheitsquelle zu berücksichtigen.

Es ergibt sich für  $u^2(l_{\text{th}})$  bei rechteckförmiger Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$u^2(l_{\text{th}}) = \frac{1}{12} \cdot [(u(\Delta T) \cdot \alpha_{\text{th}} \cdot l)^2 + (\Delta T \cdot u(\alpha_{\text{th}}) \cdot l)^2].$$

### 7.1.2 Materialeinfluss

Wenn Normale im Verbund aus verschiedenen Materialien aufgebaut sind (z. B. die Si-Lateralnormale mit dem Materialmix aus Silizium ( $\alpha_{\text{th}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) und Glas ( $\alpha_{\text{th}} = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), sind diese Werte als Spanne für  $u(\alpha_{\text{th}})$  und eine Rechteckverteilung für  $u(\alpha_{\text{th}})$  anzunehmen.

### 7.1.3 Zeitliche Stabilität

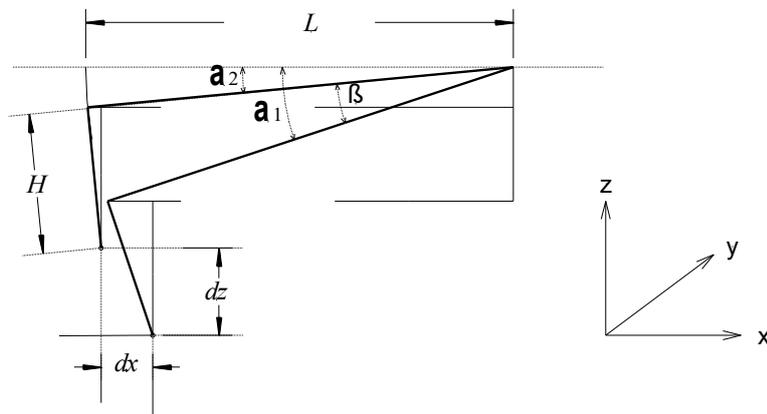
Je nach Herstellungsprozess (z. B. Abform-Technik) und Geschichte der Normale (z. B. Rekristallisation, Temperatur-Zyklen) ist mit einer zeitlichen Veränderung ihrer Abmessungen

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	12 / 25

zu rechnen. Um diese zu erfassen, ist das Rekalibrierungsintervall an die Erfahrung anzupassen.

## 7.2 Bogenbewegung

In vielen Tastschnittgeräten ist der Übertragungsmechanismus von der Tastspitzenbewegung zum Wegaufnehmer die Winkelbewegung eines Hebels (Länge  $L$ ). Die durch den Oberflächenkontakt erzwungene vertikale Bewegung ist mit einer bogenförmigen Bewegung der Tastspitze in Abhängigkeit von der Höhe  $dz$  verbunden (s. Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Einfluss der Bogenbewegung

Die Bewegung der Tastspitze, die um die Höhe  $dz$  ausgelenkt wird, ist die Kombination aus der Drehung des Hebelarmendes (Länge  $L$ ) vom Winkel  $\alpha_1$  zum Winkel  $\alpha_2$  auf einem Kreisbogen um den Winkel  $\beta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$  und einer Kippung der Tastspitzenachse (Länge  $H$ ). Die resultierende horizontale Komponente der Tastspitzenbewegung ist

$$dx = \left[ \frac{H}{L} + \tan\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \right] \cdot dz \quad (2)$$

Für ein ideales Normal ist diese Abweichung dieselbe für jedes Profilelement und würde somit keine Auswirkung auf eine horizontale Abstandskenngröße wie  $P_{Sm}$  als Differenzgröße haben.

Hinzukommt, dass  $dz$  der Höhenunterschied zwischen den Startpunkten benachbarter Profilelemente ist und durch die Welligkeit des Normals und die Geradheitsabweichungen der Tasterführung entsteht. Über eine Strecke üblicher  $P_{Sm}$ -Werte liegen diese im Bereich einzelner nm, sodass  $dx$  entsprechend Gleichung 2 vernachlässigbar klein ist.

## 8 Kalibrierschein

Der Kalibrierschein muss folgende Angaben enthalten:

- Kalibriergegenstand bzw. Merkmale des zu kalibrierenden Tastschnittgerätes
- Zur Kalibrierung benutztes Bezugsnormal (Typ, dessen Kalibrierdatum, Institution, die Kalibrierung durchgeführt hat)
- Messbedingungen (Filter, Geschwindigkeit, Tastspitze, Antastkraft)
- Messstellenplan oder entsprechender Literatur-Bezug
- Beschreibung der Auswertung oder entsprechender Literatur-Bezug
- Messergebnisse der Kenngröße  $P_{Sm}$ , ihre Standardabweichung, Messunsicherheit mit Erweiterungsfaktor  $k$  und die Abweichung der gemessenen Kenngröße vom Bezugswert.
- Ort der Kalibrierung

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	13 / 25

## 9 Wiederholung der Kalibrierung, Zwischenprüfung

Diese komplette Kalibrierung muss regelmäßig durchgeführt und dokumentiert werden. Die Rekalibrierfrist wird beeinflusst durch

- Stabilität der Umgebungsbedingungen
- Wechsel von Komponenten des Gerätes
- Häufigkeit der Nutzung
- Zeitliche Stabilität des Normals
- Anforderungen an die Unsicherheit

Als Zwischenprüfung, die zumindest einmal wöchentlich oder vor Benutzung durchzuführen ist, reicht es aus, an einem kalibrierten Raunormal mit regelmäßigem Profil eine Taststrecke zu messen und die Abweichung der Anzeigewerte zu dokumentieren.

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	14 / 25

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 1319-3 Grundbegriffe der Meßtechnik; Begriffe für die Meßunsicherheit und für die Beurteilung von Messgeräten und Messeinrichtungen
- [2] DIN 1319-4 Grundbegriffe der Meßtechnik; Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen
- [3] DIN V 32950:1997-04 (ISO/TR 14638) Geometrische Produktspezifikation (GPS) Übersicht
- [4] DIN EN ISO 3274:1998-04 Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten
- [5] DIN EN ISO 4287:1998-10 Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- [6] DIN EN ISO 4288:1998-04 Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
- [7] DIN EN ISO 5436-1 (Entwurf 1998-07) Oberflächenbeschaffenheit: Normale Teil 1 Maßverkörperungen
- [8] DIN EN ISO 16610-21:2012 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011)
- [9] DIN EN ISO 12179 Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Kalibrierung von Tastschnittgeräten
- [10] EA-4/02 M:2022 Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, deutsche Übersetzung vom 31.08.2022, DAkkS
- [11] DKD-R 4-2 Blatt 1 Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik - Blatt 1: Kalibrieren von Normalen für die Rauheitsmesstechnik
- [12] DKD-R 4-2 Blatt 2 Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik - Blatt 2: Kalibrieren des vertikalen Messsystems von Tastschnittgeräten
- [13] DKD-R 4-2 Blatt 3 Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik - Blatt 3: Kalibrierung von Normalen mit periodischen Profilen in horizontaler Richtung mit Tastschnittgeräten
- [14] WECC Doc. 19 Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations
- [15] M. Krystek: Einfluss des Wellenfilters auf die Unsicherheit eines Messergebnisses bei Rauheitsmessungen. Tagungsband der DIN-Tagung „GPS 99“, 5.-6.-Mai 1999, Mainz, S. 4-1 – 4-11. Beuth-Verlag, ISBN 3-410-14534-6
- [16] ISO 25178-601:2010 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 601: Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- [17] ISO 25178-70:2014 Geometrical product specification (GPS) - Surface texture: Areal - Part 70: Material measures

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	15 / 25

## A Anhang: Kalibrierung mit Si-Lateralnormal

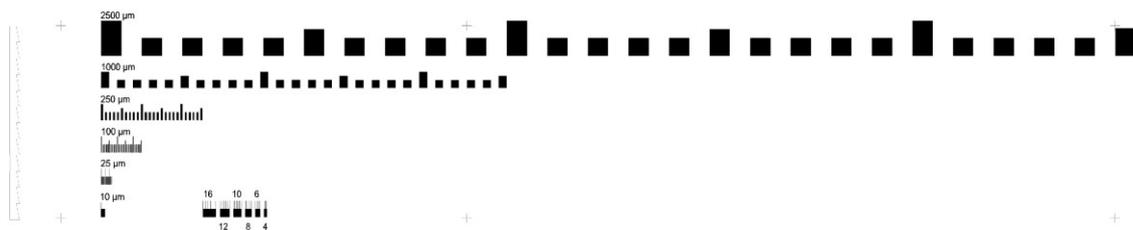
### A.1 Durchführung der Messung

Es sind 12 Taststrecken auf dem Normal entsprechend einem vereinbarten Messstellenplan (s. Kap. A1.4) zu verteilen.

Das Rauschen beim Antastvorgang wird durch Messung von  $R_{z0}$  auf einem planen Stück des Normals gemessen. Es gelten die Messbedingungen, die beim Kalibriervorgang mit dem Lateralnormal angewendet werden. Ein Mittelwert aus 3 Messungen gibt einen genügend stabilen Wert.

#### A.1.1 Beschreibung des Normals

Das Normal für die Kalibrierung der horizontalen Achse von Tastschnittgeräten ist eine Strichmaßteilung entsprechend Abbildung A1, die aus regelmäßig angeordneten in Silizium geätzten Linien besteht.



**Abbildung A1:** Lateralnormal, Übersicht

Die Linienelemente darauf haben eine Tiefe von ca. 5 µm. Dieser Wert ist weder toleriert noch kalibriert. Die Tiefe und der Flankenwinkel ( $54,7^\circ$ ), der sich aus dem Ätzprozess ergibt, garantieren:

- Stabile Antastbedingungen mit einem guten Signal-Rauschverhältnis für das Tastschnittgerät.
- Bei optischer Kantendetektion ein gut definiertes Signal.
- Unkritische Herstellung.

Die Maßteilungen haben jeweils Gesamtlängen und Teilungsmaße, die so gewählt sind, dass sie in den Durchlassbereich der Rauheitsbandpässe passen, die für die verschiedenen Wellenfilter in der ISO 4288 gelten. In Tabelle A1 sind Nennwerte für das Normal angegeben.

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	16 / 25

Teilung Nr.	Teilungsabstand / $\mu\text{m}$	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Auswertelänge / mm	cut-off $\lambda_c$ / mm	Geschwindigkeit / mm/s
1	2500	1250	40	8	0,5
2	1000	500	12,5	2,5	0,1
3	250	125	4	0,8	0,1
4	100	50	1,25	0,25	0,1
5	25	12,5	0,4	0,08	0,05
6	10	5	0,125	0,025	0,01

**Tabelle A1:** Zusammenstellung von Nenneigenschaften des Lateralnormals und Messbedingungen

### A.1.2 Vorbereitende Maßnahmen

Durch visuelle Inspektion mit dem bloßen Auge wird das Lateralnormal auf Kratzer untersucht. Wenn Kratzer entdeckt werden, muss mit einer Lupe (10-fache Vergrößerung) nach muschelförmigen Ausbrüchen an den Kanten gesucht werden. Sind diese vorhanden, ist eine fehlerfreie Spur zu suchen. Wenn dies nicht möglich ist, muss das Normal verworfen werden. Wenn eine Historie der Benutzung des Normals besteht, ist die Anzahl der Benutzungen zu notieren.

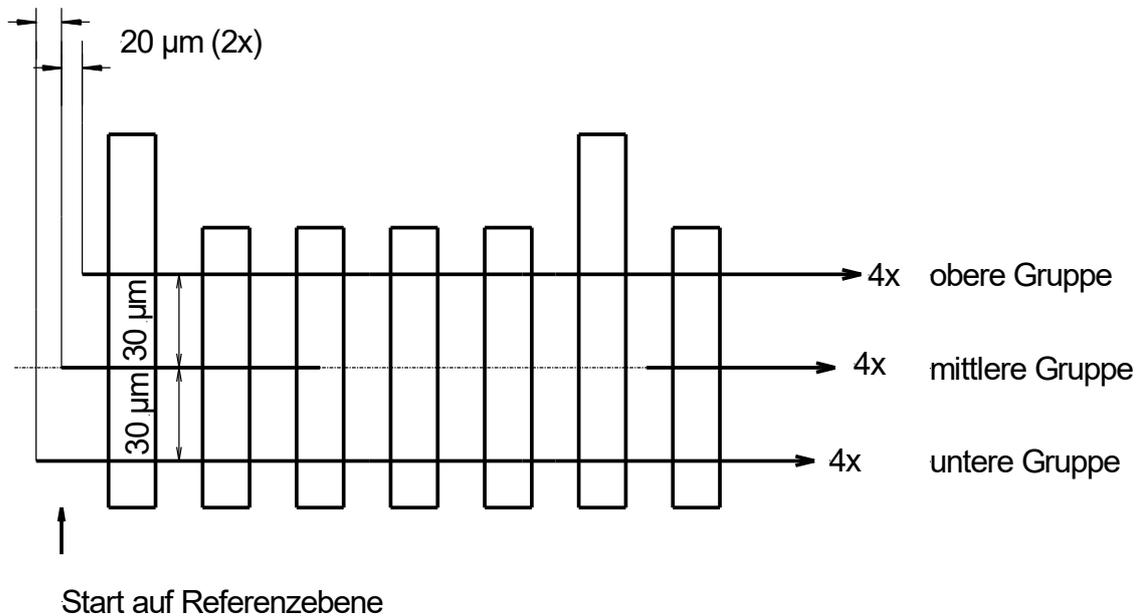
Die Richtung der Profilschnitte muss parallel zur Achse des Gitters gelegt werden. Die Ausrichtung ist ausreichend (Kosinus-Fehler der Längenmessung  $< 10^{-4}$ ), wenn eine Taststrecke auf der Teilung 2 die kurzen Linien am Anfang **und** am Ende schneidet.

### A.1.3 Messbedingungen

Es sind die Maßteilungen 1 bis 5 mit einem Tastspitzenradius  $5 \mu\text{m}$  oder  $2 \mu\text{m}$ , mit oder ohne  $\lambda_s$ , über eine Auswertestrecke entsprechend ISO 4288 zu messen. Die empfohlene Vorschubgeschwindigkeit muss entsprechend Tabelle A1 gewählt werden. Dabei ist der kleinstmögliche vertikale Messbereich zu wählen.

Bemerkung zu Tabelle A1: Die Messbedingungen für Spur 6 sind außerhalb der Normbedingungen. Spur 6 kann nur ohne  $\lambda_s$  gemessen werden, da sich sonst eine unsinnige Bandbreite ergeben würde.

#### A.1.4 Messstellenplan



**Abbildung A2:** Messstellenplan, nicht maßstabsgerecht

Der Messstellenplan in Abbildung A2 mit 12 Taststrecken in 3 Gruppen mit je 4 nominell gleichen Abtastungen berücksichtigt folgende Aspekte:

- Unterschiedliche Orte und Abtastbedingungen bei Kalibrierung und Weitergabe
- Wiederholpräzision des zu kalibrierenden Instrumentes
- Abweichung der Linien von der idealen Form
- Einfluss unterschiedlicher Profilelemente an den Enden des Profils zum Schaffen unterschiedlicher Auswertebedingungen entsprechend ISO 12179

#### A.1.5 Auswertung

Bestimmung von  $P_{Sm}$ , seiner Abweichung zum Kalibrierwert  $P_{Sm,Normal}$ ,  $R_{z0}$ , sowie der Standardabweichung der Schätzwerte von  $P_{Sm}$  in Gruppen, die wie nachfolgend definiert sind:

$$\begin{array}{lll}
s^2(P_{Sm,(1-12)}), & s^2(P_{Sm,(1-4)}), & s^2(P_{Sm,(5-8)}), \quad s^2(P_{Sm,(9-12)}) \\
\text{alle Spuren} & \text{obere Gruppe} & \text{mittlere Gruppe} \quad \text{untere Gruppe}
\end{array}$$

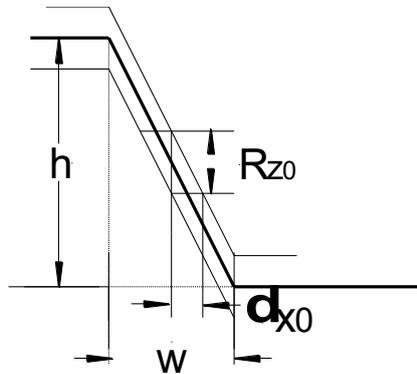
Der Mittelwert von  $P_{Sm}$ , seine Standardabweichung, Messunsicherheit und Abweichung vom Kalibrierwert sind Bestandteil des Kalibrierscheins zur Gerätekalibrierung.

## A.2 Messunsicherheit mit Si-Lateralnormal

Hier sind die zusätzlichen zu den in Kap. 6.3 genannten Unsicherheitskomponenten aufgeführt, die aus der Normalabhängigen Wechselwirkung mit dem Tastschnittgerät entstehen

### A.2.1 Geräterauschen

Aufgrund des aus der Ätztechnik vorgegebenen Kantenwinkels wirkt sich ein vertikales Rauschen entsprechend dem nachfolgend (s. Abbildung A3) beschriebenen Modell auch in horizontaler Richtung aus.



**Abbildung A3:** Einfluss von  $R_{z0}$  auf die Kantendetektion

$$\delta x_0 = \frac{h}{w} \cdot R_{z0}$$

Im abgetasteten Profil ist der gemessene Kantenwinkel von der Relation zwischen Kantenwinkel des Normalen und dem Kegelwinkel der Tastspitze abhängig.

Kegelwinkel	$w/h$
90° (weiter als Ätzwinkel)	1 (arctan des Konuswinkels)
60° (steiler als Ätzwinkel)	0,7 (arctan des Ätzwinkels)

**Tabelle A2:** Abhängigkeit von  $w/h$  durch Flankenwinkel des Normalen und Flankenwinkel der Tastspitze

Unter Annahme einer Rechteckverteilung ist die Unsicherheit dieser Komponente

$$u^2(\delta x_0) = \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{h}{w} \cdot R_{z0}\right)^2$$

### A.2.2 Kombinierte Messunsicherheit

Die kombinierte Unsicherheit der horizontalen Skalierung des Instrumentes ist

$$u^2(P_{Sm}) = \frac{1}{n^2} [2 \cdot u^2(\delta x_{dig}) + u^2(\delta x_0) + u^2(l_r) + u^2(l_{th}) + u^2(l_g)]$$

Werden hier die Unsicherheitskomponenten aus Kapitel 6.3 und A.2.1 eingesetzt, ist

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	19 / 25

$$u^2(P_{Sm}) = u^2(P_{Sm,Normal}) + \frac{1}{m_t} \cdot s^2(P_{Sm,M,Normal}) + \frac{1}{12 \cdot n^2} \cdot (u(\Delta T) \cdot \alpha_{th} \cdot l)^2 + \frac{1}{12 \cdot n^2} (\Delta T \cdot u(\alpha_{th}) \cdot l)^2 + \frac{D_x^2}{6 \cdot n^2} + \frac{1}{6 \cdot n^2} \cdot \left(\frac{h}{w} \cdot RZ_0\right)^2 \quad (3)$$

Zur Veranschaulichung in der Reihenfolge: Bezugsnormal-Unsicherheit, Statistik am Normal, Temperatur, Wärmeausdehnungskoeffizient, Digitalisierung, Rauschen

Die Unsicherheitskomponente  $\frac{1}{m_t} \cdot s^2(P_{Sm,M,Normal})$  aus dem Rückführungsvorgang mit dem Lateralnormal setzt sich aus den Ergebnissen aller Profilschnitte und der gruppenweisen Messungen zusammen:

$$\frac{1}{m_t} \cdot s^2(P_{Sm,M,Normal}) = \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,(1-12)}) + \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,(1-4)}) + \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,(5-8)}) + \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,(9-12)}) \right]$$

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	20 / 25

In der Tabelle A3 sind Beispielwerte für eine nominelle Gitterperiode von  $RSm = 250 \mu\text{m}$  angegeben.

Kap.	Kurzbezeichnung	bestimmt durch	Eingangsgröße	Methode, Verteilung	$u^2 / \text{nm}^2$
6.3.2	Bezugsnormal	$u^2(P_{Sm,Normal})$	$U(P_{Sm,n}) = 4 \text{ nm}$ $k = 2$	B Gauß	4
6.3.2	Messposition (Rückführung)	$\frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,1-12}) +$ $\frac{1}{3} \cdot \left\{ \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,1-4}) + \right.$ $\left. \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,5-8}) + \right.$ $\left. + \frac{1}{12} \cdot s^2(P_{Sm,9-12}) \right\}$	$s(P_{Sm,1-12}) = 90 \text{ nm}$ $s(P_{Sm,1-4}) = 40 \text{ nm}$ $s(P_{Sm,5-8}) = 50 \text{ nm}$ $s(P_{Sm,9-12}) = 30 \text{ nm}$	A Gauß	814
6.3.3	Temperatur-Differenz	$\frac{1}{12 \cdot n^2} \cdot (u(\Delta T) \cdot \alpha_{th} \cdot l)^2$	$n = 16,$ $u(\Delta T) = 0,2 \text{ K}$ $l = 4 \text{ mm},$ $\alpha_{th} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	A Rechteck	0,002
6.3.3	Ausdehnungs-Koeffizient	$\frac{1}{12 \cdot n^2} \cdot (\Delta T \cdot u(\alpha_{th}) \cdot l)^2$	$\Delta T = 2 \text{ K}$ $u(\alpha_{th}) = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	A Rechteck	0,52
6.3.1	Messpunkt-abstand	$\frac{D_x^2}{6 \cdot n^2}$	$D_x = 0,5 \mu\text{m}$	B Rechteck	163
A2.1	Rauschen	$\frac{1}{6 \cdot n^2} \cdot \left(\frac{h}{w} \cdot Rz_0\right)^2$	$Rz_0 = 0,010 \mu\text{m}$ $w/h = 1$	A Rechteck	0,07
A2.4	$u^2(P_{Sm})$	Summe der Unsicherheiten			982
5.1	$u(P_{Sm})$	$\sqrt{u^2(P_{Sm})}$	aufgerundet		32 nm
	$U(P_{Sm})$	$k \cdot u(P_{Sm})$	$k = 2$		64 nm
	$U_{rel}(P_{Sm})$	$u(P_{Sm})/P_{Sm}$			$3 \cdot 10^{-4}$

**Tabelle A3:** Zusammenstellung der Messunsicherheit bei Kalibrierung mit Si-Lateralnormal mit Beispielwerten

### Vereinfachungen

Wie das Beispiel zeigt, sind einige Beiträge gegenüber anderen vernachlässigbar klein (Anteil < 10 %). Wenn sie zur Vereinfachung der Rechnung weggelassen werden, muss der Wert der verbleibenden Messunsicherheit um mindestens 10 % aufgerundet werden.

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	21 / 25

## B Anhang: Kalibrierung mit Geometrienormal

### B.1 Durchführung der Messung

Es sind mindestens 12 Taststrecken auf dem Normal zu verteilen (s. Kap. B1.4). Das Rauschen beim Antastvorgang wird durch Messung von  $R_{z0}$  auf einem planen Stück des Geometrienormals gemessen. Es gelten die Messbedingungen, die beim Kalibriervorgang mit dem Geometrienormal angewendet werden. Ein Mittelwert aus 3 Messungen gibt einen genügend stabilen Wert.

#### B.1.1 Beschreibung des Normals

Das Bezugsnormal vom Typ PPS entsprechend den Beschreibungen in ISO 25178-70 enthält nahezu sinusförmige periodische Rillen, die einen Abstand zwischen 50  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  haben. Die Anzahl der Perioden ist so groß, dass sich auf dem Normal die Messstrecken entsprechend den Filterbedingungen in ISO 4288 einstellen lassen. Die Normale sind üblicherweise aus Glas gefertigt oder durch Abformung in Nickel hergestellt. Zusätzlich können Schichten zur Härtung oder zur Verminderung der Reibung aufgebracht sein.

#### B.1.2 Vorbereitende Maßnahmen

Durch visuelle Inspektion mit dem bloßen Auge wird das Bezugsnormal auf Kratzer untersucht. An Stellen mit Kratzern darf das Normal nicht zur Kalibrierung verwendet werden.

Die Richtung der Profilschnitte muss senkrecht zu den Linien des Gitters gelegt werden. Die Ausrichtung ist ausreichend (Kosinus-Fehler der Längenmessung  $<10^{-4}$ ), wenn die Tastspitze über eine Taststrecke von 12,5 mm nach Augenschein parallel zum Rand des Messfeldes fährt. Dies kann auch bei etwas abgehobener Tastspitze beobachtet werden.

Das Normal kann mit einem weichen Mikrofaser-Tuch gereinigt werden, das mit Isopropanol angefeuchtet ist. Die Wischrichtung muss parallel zu den Rillen sein.

#### B.1.3 Messbedingungen

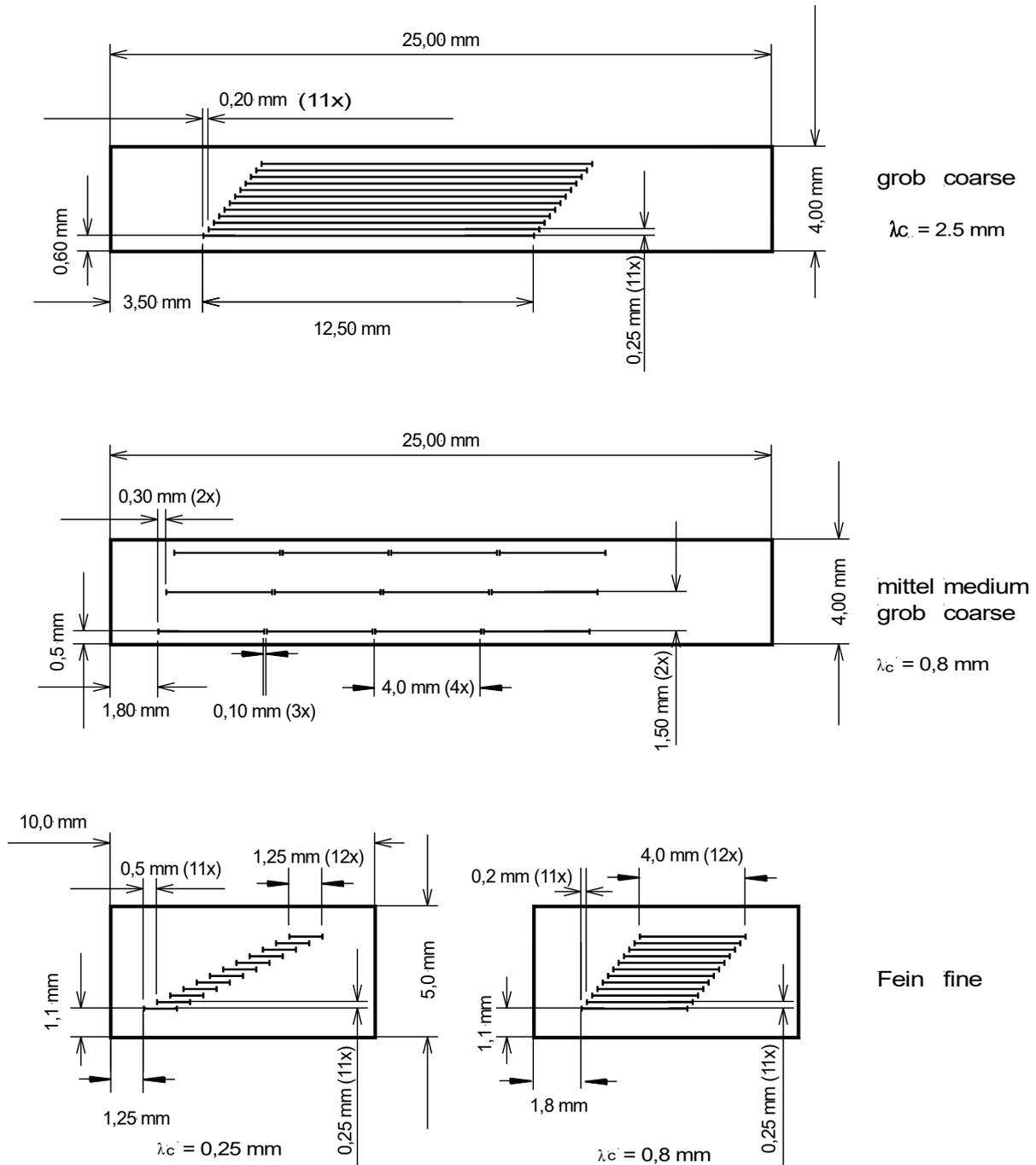
Der Tastspitzenradius muss 2  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$  abhängig von den Messbedingungen betragen. Die Vorschubgeschwindigkeit muss  $\leq 0,5$  mm/s sein. Die Messung kann mit oder ohne  $\lambda_s$  durchgeführt werden.

Es sind solche Geometrienormale einzusetzen, die für die Messbedingungen von  $\lambda_c = 0,25$  mm,  $\lambda_c = 0,8$  mm und  $\lambda_c = 2,5$  mm kalibriert sind.

#### B.1.4 Messtellenplan

Der Messstellenplan entsprechend Abbildung B1 enthält 12 Taststrecken. Ihre Verteilung ist so gewählt, dass der Bereich des Normals abgedeckt ist, in dem es nach Kalibrierschein-Angaben kalibriert wurde. Die Anordnung der Taststrecken berücksichtigt folgende Aspekte:

- Wiederholpräzision des Gerätes,
- Abweichungen der Profilelemente von der idealen Gestalt,
- Unsicherheit in der Positionierung der Messstellen in Hinblick auf die spätere Nutzung des Gerätes.



**Abbildung B1:** Beispiele von Messstellenplänen, die beim Kalibrieren der Normale üblich sind

### B.1.5 Auswertung

Das Profil muss so ausgerichtet werden, dass beide Enden auf dem gleichen Profilvermerkmal liegen. Das bedeutet z. B., dass das Profil so zu beschneiden ist, dass beide Enden auf

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	23 / 25

einem Nulldurchgang mit gleichem Vorzeichen liegen. Dadurch wird eine systematische Fehlansichtung durch eine ungleiche Anzahl von Bergen und Tälern ausgeschlossen.

Es werden folgende Werte bestimmt:

Der Mittelwert von  $P_{Sm,Normal}$ , seine Standardabweichung, seine Abweichung zum Kalibrierwert und  $R_{z0}$ . Der Mittelwert von  $P_{Sm,M,Normal}$ , seine Standardabweichung, Messunsicherheit und seine Abweichung vom Kalibrierwert  $P_{Sm,Normal}$  sind Bestandteil des Kalibrierscheins zur Gerätekalibrierung.

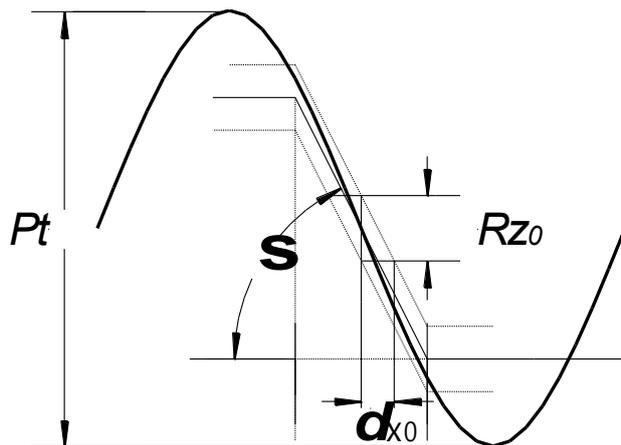
## B.2 Messunsicherheit mit Geometrienormal

Hier sind die zusätzlichen zu den in Kap. 6.3 genannten Unsicherheitskomponenten aufgeführt, die aus der Normalabhängigen Wechselwirkung mit dem Tastschnittgerät entstehen.

### B.2.1 Geräterauschen

Aufgrund der Steigung des Profils beim Durchgang durch die Nulllinie führt ein vertikales Rauschen zu einer Unsicherheit in der horizontalen Messung (s. Abbildung B2). Daher gilt das nachfolgend skizzierte Modell für  $\delta x_0$ . Wenn das vertikale Rauschen durch  $R_{z0}$  charakterisiert wird, ist entsprechend Abbildung B2  $\delta x_0 = \frac{R_{z0}}{\sigma}$ . Hier ist  $\sigma = \frac{P_t}{2} \cdot \frac{2\pi}{p}$ , die Profilsteigung im Nulldurchgang des Sinus-Profiles und  $p$  die Länge eines Profilelementes. Unter der Annahme einer rechteckförmigen Wahrscheinlichkeitsverteilung ist

$$u^2(\delta x_0) = \frac{1}{12} \cdot \left( \frac{R_{z0}}{\sigma} \right)^2$$



**Abbildung B2:** Einfluss des Grundrauschens auf die Erkennung der Profilelemente

### B.2.2 Kombinierte Messunsicherheit

Die kombinierte Messunsicherheit setzt sich aus den Kapitel 6.3 und in Kapitel B.2.1 genannten Komponenten zusammen. Es sind zur Veranschaulichung in der Reihenfolge: Bezugsnormal-Unsicherheit, Statistik am Normal, Temperatur, Wärmeausdehnungskoeffizient, Digitalisierung, Rauschen

	Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Kalibrierung des horizontalen Messsystems von Tastschnittgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240411">https://doi.org/10.7795/550.20240411</a>	DKD-R 4-2 Blatt 4	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	0
		Seite:	24 / 25

$$\begin{aligned}
 u^2(P_{Sm}) = & u^2(P_{Sm,n}) + \frac{1}{m_t} \cdot s^2(P_{Sm,Bezug}) + \frac{1}{12 \cdot n^2} \cdot (u(\Delta T) \cdot \alpha_{th} \cdot l)^2 + \frac{1}{12 \cdot n^2} (\Delta T \cdot u(\alpha_{th}) \cdot l)^2 + \frac{D_x^2}{6 \cdot n^2} \\
 & + \frac{1}{6 \cdot n^2} \cdot \left(\frac{R_{z0}}{\sigma}\right)^2 \qquad (4)
 \end{aligned}$$

In Tabelle B1 ist ein Beispiel für die Messunsicherheit beim Kalibrieren mit einem Bezugsnormal mit einer Periode von  $P_{Sm} = 200 \mu\text{m}$  bei einer Taststrecke von 4 mm und einer Amplitude von  $P_t = 10 \mu\text{m}$  aufgeführt.

Kap.	Kurzbezeichnung	bestimmt durch	Eingangsgröße	Methode, Verteilung	$u^2/\text{nm}^2$
6.3.2	Bezugsnormal	$u^2(P_{Sm,n})$	$U(P_{Sm,n}) = 60 \text{ nm}$ $k = 2$	B Gauß	900
6.3.2	Messposition (Rückführung)	$\frac{1}{m_t} \cdot s^2(P_{Sm,Bezug})$	$m_t = 12$ $s(P_{Sm,Bezug}) = 100 \text{ nm}$	A Gauß	833
6.3.3	Temperaturdifferenz $\Delta T$	$\frac{1}{12 \cdot n^2} \cdot (u(\Delta T) \cdot \alpha_{th} \cdot l)^2$	$n = 20,$ $u(\Delta T) = 0,1 \text{ K}$ $l = 4 \text{ mm},$ $\alpha_{th} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	A Rechteck	0,0012
6.3.3	Ausdehnungskoeffizient $\alpha_{th}$	$\frac{1}{12 \cdot n^2} \cdot (\Delta T \cdot u(\alpha_{th}) \cdot l)^2$	$\Delta T = 2 \text{ K},$ $u(\alpha_{th}) = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	A, Rechteck	0,12
6.3.1	Messpunkt- abstand	$\frac{D_x^2}{6 \cdot n^2}$	$D_x = 0,5 \mu\text{m}$	B Rechteck	104
B2.1	Rauschen	$\frac{1}{6 \cdot n^2} \cdot \left(\frac{R_{z0}}{\sigma}\right)^2$	$R_{z0} = 0,020 \mu\text{m}$ $\sigma = 1$	A Rechteck	0,2
B2.4	$u^2(P_{Sm})$	Summe der Varianzen			1838
5.1	$u(P_{Sm})$	$\sqrt{u^2(P_{Sm})}$	aufgerundet		43 nm
	$U(P_{Sm})$	$k \cdot u(P_{Sm})$	$k = 2$		86 nm
	$U_{rel}(P_{Sm})$	$u(P_{Sm})/P_{Sm}$			$5 \cdot 10^{-4}$

**Tabelle B1:** Zusammenstellung der Messunsicherheit bei Kalibrierung mit Geometriernormal, mit Beispielwerten

### Vereinfachungen

Wie das Beispiel zeigt, sind einige Beiträge gegenüber anderen vernachlässigbar klein (Anteil <10 %). Wenn sie zur Vereinfachung der Rechnung weggelassen werden, muss der Wert der verbleibenden Messunsicherheit um mindestens 10 % aufgerundet werden.



Herausgeber:

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

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