

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Expertenbericht** Rauheitsmesstechnik:  
**DKD-E 4-2** Umrechnung von Profilen aus  
Bezugsflächentastermessungen in  
Kufentasterprofile

---

Ausgabe 01/2025

<https://doi.org/10.7795/550.20250116>



	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		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 5 92-8021

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

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	3 / 25

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Expertenbericht DKD-E 4-2 Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile, Ausgabe 01/2025, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20250116.*

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:

Dorothee Hüser<sup>id</sup>, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100,  
38116 Braunschweig;

Raimund Volk<sup>id</sup>, JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH, Drachenloch 5,  
78052 Villingen-Schwenningen;

Florian Schwarzer<sup>id</sup>, JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH, Drachenloch 5,  
78052 Villingen-Schwenningen;

Stefan Feifel<sup>id</sup>, JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH, Drachenloch 5,  
78052 Villingen-Schwenningen

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

	<p>Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von          Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in          Kufentasterprofile</p> <p><a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a></p>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	4 / 25

## Vorwort

DKD-Expertenberichte verfolgen das Ziel, Hintergrundinformationen und Hinweise zu geben, die im Zusammenhang mit anderen DKD-Dokumenten stehen, wie z. B. den DKD-Richtlinien, jedoch z. T. weit darüber hinausgehen. Sie ersetzen die originären DKD-Dokumente nicht, geben jedoch zahlreiche wissenswerte Zusatzinformationen. In den Expertenberichten wird nicht notwendigerweise in allen Details die Sichtweise des Vorstands oder der Fachausschüsse des DKD wiedergegeben.

Die DKD-Expertenberichte sollen wesentliche Aspekte aus dem Bereich des Kalibrierwesens darstellen und durch die Publikation im Rahmen des DKD der großen Gemeinschaft der Kalibrierlaboratorien national und international zugänglich gemacht werden.

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	5 / 25

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Zweikufentaster nach EN 10049: Modellierung.....	7
2.1	Modellierung der Kufenbewegung im Überblick.....	7
2.2	Beschreibung des Algorithmus .....	8
3	Tastspitzenanpassung.....	10
4	Studie anhand eines Raunormals für Feinblechoberflächen .....	11
5	Validierung der Algorithmen gegen Langzeitmessungen an einem Gebrauchsnormal.....	15
6	Zusammenfassung .....	17
7	Literaturverzeichnis.....	18
	Anhang A Quellcode zum Umrechnungsalgorithmus: Kufentaster .....	19
	Anhang B Umrechnung der Tastspitzengeometrien.....	23

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	6 / 25

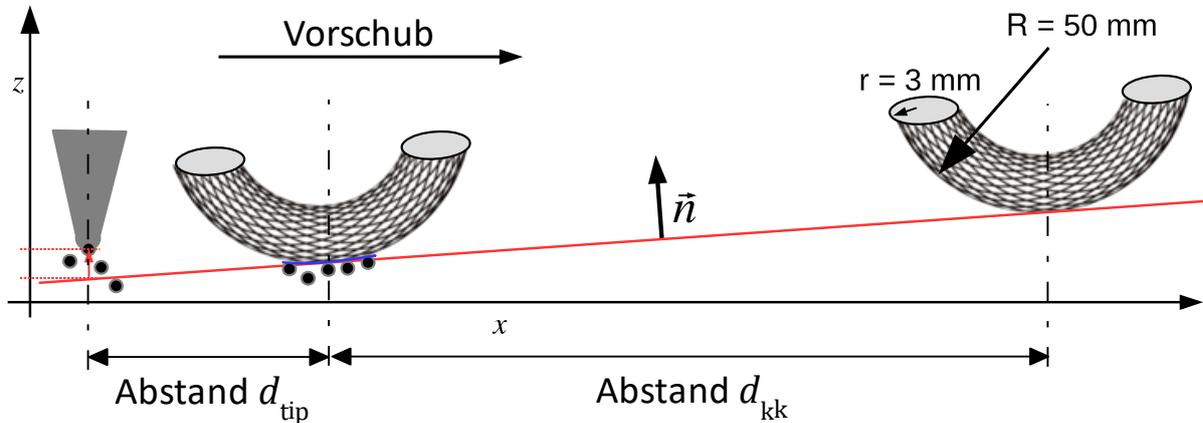
## 1 Einleitung

In der Qualitätsprüfung der Oberflächenbeschaffenheit industriell gefertigter Oberflächen kommen nach wie vor taktile Verfahren, insbesondere Tastschnittgeräte, zum Einsatz. Die Vergleichbarkeit dieser Geräte wird mittels Referenzoberflächen, die für die jeweilige Anwendung ausgewählte Rauheitskenngrößen verkörpern, gewährleistet. Eine Kalibrierung von Referenzoberflächen befähigt diese als Normal zu dienen und macht die Referenzoberfläche zu einem Raunormal. Von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS), der nationalen Akkreditierungsstelle der Bundesrepublik Deutschland, entsprechend akkreditierte Laboratorien führen die Kalibrierungen durch.

Im Bereich Rauheitsmesstechnik werden je nach Größe und Beschaffenheit der zu prüfenden Werkstücke unterschiedliche Tastschnittverfahren verwendet. Bauteile, die fertigungsnah in der Werkhalle gemessen werden und bei denen die Anforderungen an die Genauigkeit der Messung nicht zu hoch sind, werden mit Handgeräten vermessen. Bei höheren Anforderungen kommen größere Geräte mit stabiler Werkstückaufnahme, die über ein geeignetes Stativ in einem festen Messzirkel mit der Sensorik verbaut sind, zum Einsatz. Die Tastspitze ist über einen Hebelarm mit einer Vorschubeinrichtung verbunden, die sich relativ zu einer Bezugsfläche innerhalb des Gerätes bewegt. Bei den flexiblen Geräten, die direkt auf sehr große Werkstücke, beispielsweise große Bleche, gehalten werden, gibt es Tasterbauformen, bei denen die Bewegung der Tastspitze nicht relativ zur Bezugsfläche, sondern relativ zu einer Kufe oder zwei Kufen in Torusform gemessen wird [1]. Bei dieser Art der Taster beschränkt sich der Messkreis auf die wenigen Millimeter, die zwischen der Tastspitze und den Kufen liegen. Diese Tori sehen in etwa aus wie Zylinder, sind aber mit einer leicht gekrümmten Zylinderachse versehen, das heißt als Tori realisiert. Sie werden üblicherweise als Kufen bezeichnet. Die Geräte mit zwei Kufen arbeiten mit einer deutlich besseren Reproduzierbarkeit als die mit nur einer Kufe. Für eine bessere Vergleichbarkeit hat sich die Eisenhüttenindustrie, die Hauptanwender dieser Zweikufentaster ist, mit der Norm DIN EN 10049 [2] auf eine Bauform festgelegt.

Für die vielfältigen Anwendungsgebiete stehen unterschiedliche Raunormale am Markt zur Verfügung, die passend zum eingesetzten Messverfahren zu kalibrieren sind, unter anderem auch dazu passend, ob mit Tastern für Bezugsflächen oder mit Kufen gemessen wird. Bisher tauschen die von der DAkkS akkreditierten Laboratorien den Taster dem Messauftrag gemäß aus. Ein Messauftrag dauert in etwa 3 Stunden, bei auftretenden Komplikationen auch länger. Ein Tasterwechsel dauert in etwa eine halbe Stunde. Um die Tasterwechselzeiten pro Auftrag zu reduzieren, werden Aufträge gleicher Tastersorte gebündelt. Aufträge, die den Einsatz von Zweikufentastern erfordern, fallen deutlich weniger häufig an als die für Bezugsflächentaster, so dass die Auftraggeber bei Bündelung Wartezeiten bis zu 3 Wochen in Kauf nehmen müssen.

Im Bereich der DAkkS-Akkreditierung von Rauheitskenngrößen sind die Zweikufentastermessungen eine absolute Ausnahme, da sonst nur Messungen mit Bezugsebenentaster zugelassen sind. Durch den Einsatz von Zweikufentastern wird das Oberflächenprofil zusätzlich zur Tastspitze auch durch die Kufen mechanisch gefiltert. Die Filtereigenschaften sind dabei abhängig von der verwendeten Taster- und Kufengeometrie. Form- und Lagetoleranzen des Tasters beeinflussen damit die Messgenauigkeit. Daraus resultiert eine um 3 bis 5 Prozentpunkte größere erweiterte Messunsicherheit  $U$  bei Messungen mit Zweikufentaster verglichen mit Bezugsebenentastermessungen [3].



**Abbildung 1** Zweikufentastergeometrie gemäß EN 10049, mit einem Abstand zwischen Tastspitze und vorderer Kufe von  $d_{\text{tip}} = 4,5$  mm und einem Abstand zwischen beiden Kufen von  $d_{\text{kk}} = 13$  mm, die Radien der Kufentori sind  $R = 50$  mm und  $r = 3$  mm.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglichen soll, auf Zweikufentastermessungen im Kalibrierbetrieb komplett zu verzichten: Alle Normale werden mit einem Bezugsflächentaster gemessen.

Damit Profile, die mit Bezugsflächentastern gemessen werden, auf Profile umgerechnet werden können, die den Zweikufentastermessungen entsprechen, müssen diese Profile sehr viel länger als die genormte Messstrecke sein. Die gesamte zu messende Profillänge muss mindestens so groß sein wie die in den Normen spezifizierte Messstrecke zuzüglich der von den Kufen überdeckten Strecke. Aus einem mit Bezugsflächentaster gemessenen Profil wird die Kufenbewegung berechnet und vom Profil subtrahiert.

## 2 Zweikufentaster nach EN 10049: Modellierung

### 2.1 Modellierung der Kufenbewegung im Überblick

Die Norm EN 10049 spezifiziert die Geometrie der Zweikufentaster, so dass die durch Ausschnitte von Tori realisierten Kufen eine Linie mit der Tastspitze bilden, wie in der in Abb. 1 gezeigten Skizze dargestellt. Die Krümmung des jeweiligen Torus ist in Abb. 1 überhöht dargestellt, desgleichen sind alle weiteren Maße nicht maßstabsgetreu wieder gegeben. Für das Modell zur Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile wird die Vorschubachse, die Profilabzisse, als x-Richtung bezeichnet, die Richtung der Topographiehöhen, die Profilorinate, als z-Achse. Die Beschaffenheit der Topographie außerhalb der von Vorschubrichtung und Tastspitzenauslenkung aufgespannten Ebene wird messtechnisch nicht erfasst, so dass die Berechnung der Kufenbewegung aus dem x-z-Schnitt der Topographie erfolgt. Mit dieser Näherung wird der Einfluss durch Berührung der Topographie mit den Kufen außerhalb der zweidimensionalen Schnittebene vernachlässigt und die Information über den Krümmungsradius  $r = 3$  mm der zylindrischen Tori bleibt ungenutzt. Innerhalb der x-z-Schnittebene werden zu jedem Abtastpunkt des Profils zwei weitere Profilpunkte gesucht, die als

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	8 / 25

diejenigen Punkte betrachtet werden, auf denen die Kufen aufliegen. Jede der beiden Kufen berührt die Topographie in dem Punkt, der die kürzeste Entfernung zur Kufe aufweist. Es wird die Verbindungsgerade der beiden Kufenberührungspunkte und die Projektion der Tastspitzenposition auf die Gerade errechnet. Wenn  $l_m$  die normgemäße Länge der Messstrecke ist und  $d_{tot}$  die Strecke zwischen der Tastspitze und der x-Position des von der Tastspitze maximal entfernten möglichen Berührungspunktes der hinteren Kufe, dann muss die Länge des vom Bezugsflächentaster gemessenen Profils mindestens  $l_m + d_{tot}$  umfassen. Für den Bereich der genormten Messstrecke werden zu jedem Messpunkt ein Berührungspunktepaar, deren Verbindungsgerade und die Projektionspunkte der Tastspitzenposition ermittelt. Die Projektionspunkte bilden das Profil der Kufenbewegung.

## 2.2 Beschreibung des Algorithmus

Im folgenden wird der Algorithmus für mögliche Implementierungen im Detail beschrieben. Zu jedem Antastpunkt  $x_i$  des vorderen Profilabschnitts werden zwei Berührungspunkte mit den Kufen, also je Kufe ein Punkt, auf dem diese aufliegt, gesucht. Die Länge der Kufen und damit die Breite der Intervalle, die unterhalb einer Kufe liegen, wird mit  $w_K = 6$  mm abgeschätzt. Die Berührungspunkte werden jeweils iterativ bestimmt.

**Schritt 1:** *Bestimmen der Indextmengen der Punkte unter den Kufen:* Die Indexmenge  $\{i_1, \dots, n_1\}$  der Punkte des mit Bezugsflächentaster gemessenen Profils  $z_B$ , die unter der vorderen Kufe (der dichter an der Tastspitze angeordneten Kufe) liegen würden und die Indexmenge  $\{i_2, \dots, n_2\}$  der Messpunkte unter der hinteren Kufe. Für die Profilpunkte unter der vorderen Kufe gilt

$$x_i + d_{tip} - \frac{1}{2}w_K \leq x_{j_1} \leq x_i + d_{tip} + \frac{1}{2}w_K \quad \text{mit } j_1 \in \{i_1, \dots, n_1\}. \quad (1)$$

Für die Profilpunkte unter der hinteren Kufe gilt

$$x_i + d_{tip} + d_{kk} - \frac{1}{2}w_K \leq x_{j_2} \leq x_i + d_{tip} + d_{kk} + \frac{1}{2}w_K \quad \text{mit } j_2 \in \{i_2, \dots, n_2\}. \quad (2)$$

**Schritt 2:** *Ermitteln der Startwerte für die beiden Berührungspunkte unter der Annahme, dass die Kufen nicht torusförmig, sondern zylindrisch sind, die beide auf gleicher Höhe horizontal über dem Profil liegen.* Das bedeutet, dass zu jeder Kufe,  $v = 1, 2$ , der höchste Punkt in ihrem Bereich, also das Maximum der Ordinatenwerte des jeweiligen Profilabschnitts ermittelt wird

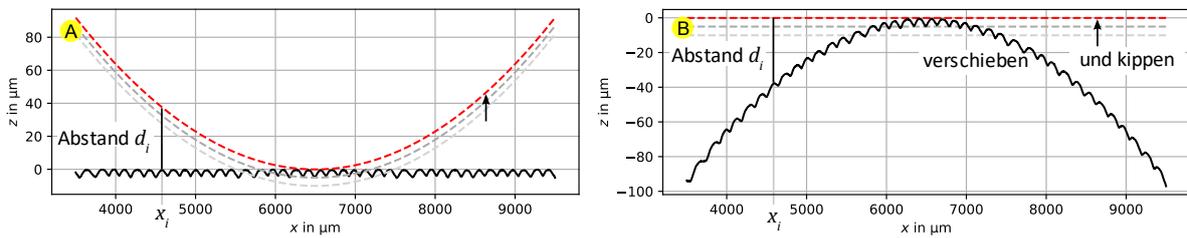
$$z_{k_v} = \max_{j_v \in \{i_v, \dots, n_v\}} \{z_{B, j_v}\}. \quad (3)$$

Die durch die beiden Punkte  $(x_{k_1}, z_{k_1})$  und  $(x_{k_2}, z_{k_2})$  definierte Gerade kann derart geneigt sein, dass Berggipfel aus der Nachbarschaft oberhalb liegen. Unter Berücksichtigung der Krümmung der Tori wird überprüft, ob keine Profilpunkte oberhalb der Kufenkontur, also in der Kufe, liegen. Dazu wird der Einheitsvektor  $\vec{u}$  der Richtung der Verbindungsgeraden der Punkte  $(x_{k_1}, z_{k_1})$  und  $(x_{k_2}, z_{k_2})$  berechnet. Der Richtungsvektor  $\vec{u}$  zeigt von dem Berührungspunkt der vorderen Kufe  $\vec{r}_{k_1} = \begin{pmatrix} x_{k_1} \\ z_{k_1} \end{pmatrix}$  zum Berührungspunkt der hinteren Kufe  $\vec{r}_{k_2} = \begin{pmatrix} x_{k_2} \\ z_{k_2} \end{pmatrix}$ . Dabei wurde die Anordnung des Gerätes so gewählt, dass gilt  $x_{k_1} < x_{k_2}$ . Der Normalenvektor  $\vec{n}$  zur Geraden steht senkrecht auf  $\vec{u}$ , also

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_z \end{pmatrix} = \frac{\vec{r}_{k_2} - \vec{r}_{k_1}}{|\vec{r}_{k_2} - \vec{r}_{k_1}|} \quad \hookrightarrow \quad \vec{n} = \begin{pmatrix} -u_z \\ u_x \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Die Startvektoren werden mit  $\vec{n}_0$  und  $\vec{r}_{k_1,0}$  bezeichnet.

**Schritt 3:** Iterative Ermittlung der Kufenberührung, wobei  $\kappa$  als Iterationsindex verwendet wird. Anstelle der Berechnung von Abständen zu den Kreissegmenten der Toruskonturen, werden Abstände zu der Verbindungsgeraden der Berührungspunkte berechnet. Der Kreisform der Tori wird



**Abbildung 2** Illustration der Bestimmung der Abstände zwischen Kufe und Profil: Die Krümmung des Kufentorus' wird in das Profil umgerechnet, um auf einfache Weise die Abstände zu einer Geraden berechnen zu können.

dadurch Rechnung getragen, dass diese von jedem Antastpunkt innerhalb der relevanten Profilbereiche abgezogen werden. Abb. 2 veranschaulicht dieses Vorgehen. Der Abstand eines Punktes zu einer Geraden mit Normalenvektor  $\vec{n}$  ist

$$d_{j_v} = (\vec{r}_{j_v} - \vec{r}_{k_1,\kappa}) \cdot \vec{n}_\kappa. \quad (5)$$

Der Abstand ist so definiert, dass der Zahlenwert des Abstands der Punkte, die oberhalb der Kufenkontur liegen, positiv ist. Punkte mit positivem Abstandswert liegen innerhalb der Kufen und sind somit als unphysikalisch zu interpretieren. Es werden die beiden Indizes  $k_1$  und  $k_2$  zu den Maxima

$$d_{k_v} = \max_{j_v \in \{1_v, \dots, n_v\}} \{d_{j_v}\} \quad \text{mit } v = 1, 2 \quad (6)$$

ermittelt. Zu dem neuen Index  $k_1$  wird der Berührungspunkt  $\vec{r}_{k_1}$  als Aufpunkt  $\vec{r}_{k_1,\kappa+1}$  des nächsten Iterationsschritts verwendet. Daraus wird gemeinsam mit dem Punkt  $\vec{r}_{k_2,\kappa+1}$  der Normalenvektor  $\vec{n}_{\kappa+1}$  berechnet.

**Schritt 4:** Terminieren der Iteration, wenn es keine positivwertigen Abstände  $d_{j_v}$  mehr gibt.

**Schritt 5:** Bestimmung der Kufenbahn. An der lateralen Position  $x_i$  der Tastspitze wird der z-Wert  $z_{\text{Kufenbahn},i}$  auf der Geraden, die durch die beiden Berührungspunkte definiert wird, wie folgt berechnet:

$$z_{\text{Kufenbahn},i} = \vec{r}_{k_1,\kappa+1} + \frac{x_i - x_{k_1,\kappa+1}}{n_{z,\kappa+1}} \vec{u}_{\kappa+1} \quad (7)$$

Dies ist die Projektion des Tastspitzenortsvektors auf die Gerade.

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	10 / 25

**Schritt 6:** Das Profil relativ zur Kufenbahn ergibt sich dann aus der Differenz des mit dem Bezugsflächentaster gemessenen Profils und der Kufenbahn:

$$z_{K,i} = z_{B,i} - z_{\text{Kufenbahn},i} \quad (8)$$

### 3 Tastspitzenanpassung

Die gängigen Kalibrieraufträge für Bezugsflächentastermessungen fordern die Verwendung einer Tastspitze mit einem Radius von 2  $\mu\text{m}$ , während für Kufentastermessungen Tastspitzen mit 5  $\mu\text{m}$  eingesetzt werden. Der Zeitaufwand eines Tastspitzenwechsels soll jedoch ebenfalls vermieden werden. Die im Eisenhüttenwesen für Bleche als Bezugsfläche eingesetzten Normale haben Strukturen, die so ausgebildet sind, dass die Krümmungsradien der Talsohlen in der Regel größer als 5  $\mu\text{m}$  sind. Die Änderung der Tastspitzenkrümmung wirkt sich deshalb vor allem auf die Steigung der Seitenwände aus, so dass sie sich mehr auf die Kenngrößen wie  $R_a$  auswirkt, die über alle Profilmittelwerte, und kaum auf die Extremalkenngrößen wie  $R_z$ ,  $R_{\text{max}}$  bzw.  $R_{\text{zx}}$ .

Eine Möglichkeit zur Anpassung der Profile ist die Verwendung von Algorithmen zur Anwendung morphologischer Operationen auf die Profile. Auf das Bezugsflächentasterprofil wird die morphologische Operation der Erosion mit einem Kreissegment und Geradenstücken als strukturierendes Element angewendet. Für eine Tastspitze mit einem Konuswinkel  $\theta$  und einem Radius  $R_{\text{tip}}$  wird das strukturierende Element so aufgebaut, dass die Geraden des 2D-Schnitts des Konus tangential an das Kreissegment anschließen. Das Kreissegment liegt in dem Intervall

$$x \in \left[ -R_{\text{tip}} \cos \frac{\theta}{2}, R_{\text{tip}} \cos \frac{\theta}{2} \right]. \quad (9)$$

Wenn die Mitte des Kreissegments an der Stelle  $x = 0$  den Höhenwert  $z = 0$  hat und das Kreissegment mit Konus nach oben geöffnet ist, dann sind die Höhenwerte  $z_{\text{tr}}$  an den beiden Intervallgrenzen, die die Übergangspunkte vom Kreissegment zu den Geraden darstellen, folgende

$$z_{\text{tr}} = R_{\text{tip}} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \right). \quad (10)$$

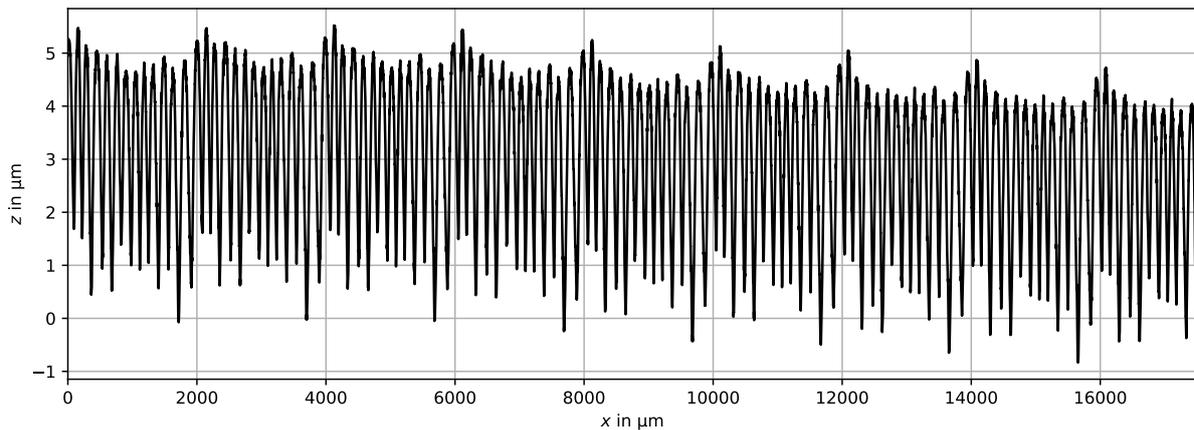
Das strukturierende Element wird wie folgt berechnet:

$$z = \begin{cases} R_{\text{tip}} - \sqrt{R_{\text{tip}}^2 - x^2} & \text{falls } -R_{\text{tip}} \cos \frac{\theta}{2} < x < R_{\text{tip}} \cos \frac{\theta}{2} \\ z_{\text{tr}} + (x - R_{\text{tip}} \cos \frac{\theta}{2}) / \tan \frac{\theta}{2} & \text{sonst} \end{cases}. \quad (11)$$

Ein möglicher Algorithmus für die morphologischen Operationen wird von Villarrubia 1997 [4] mit Quellcode beschrieben. Dieser Algorithmus gilt für Antastungen in vertikaler Richtung.

Das um einen Tastspitzenradius  $R_{\text{tip}} = 2 \mu\text{m}$  erodierte Profil  $z_{e,B}$  wird dann genutzt, um die Kufenbahn zu ermitteln sowie das relativ zur Kufenbahn verlaufende Profil  $z_K$ , also die Höhenwerte  $z_{K,i} = z_{e,B,i} - z_{\text{Kufenbahn},i}$  berechnet. Auf das Profil  $z_K$  wird schließlich die

morphologische Operation der Dilatation mit einem strukturierenden Element aus Geraden und Kreissegment mit Radius  $R_{\text{tip}} = 5 \mu\text{m}$  angewendet.



**Abbildung 3** Profil auf einem Raunormal für Feinbleche gemessen mit einem Zweikufentastsystem

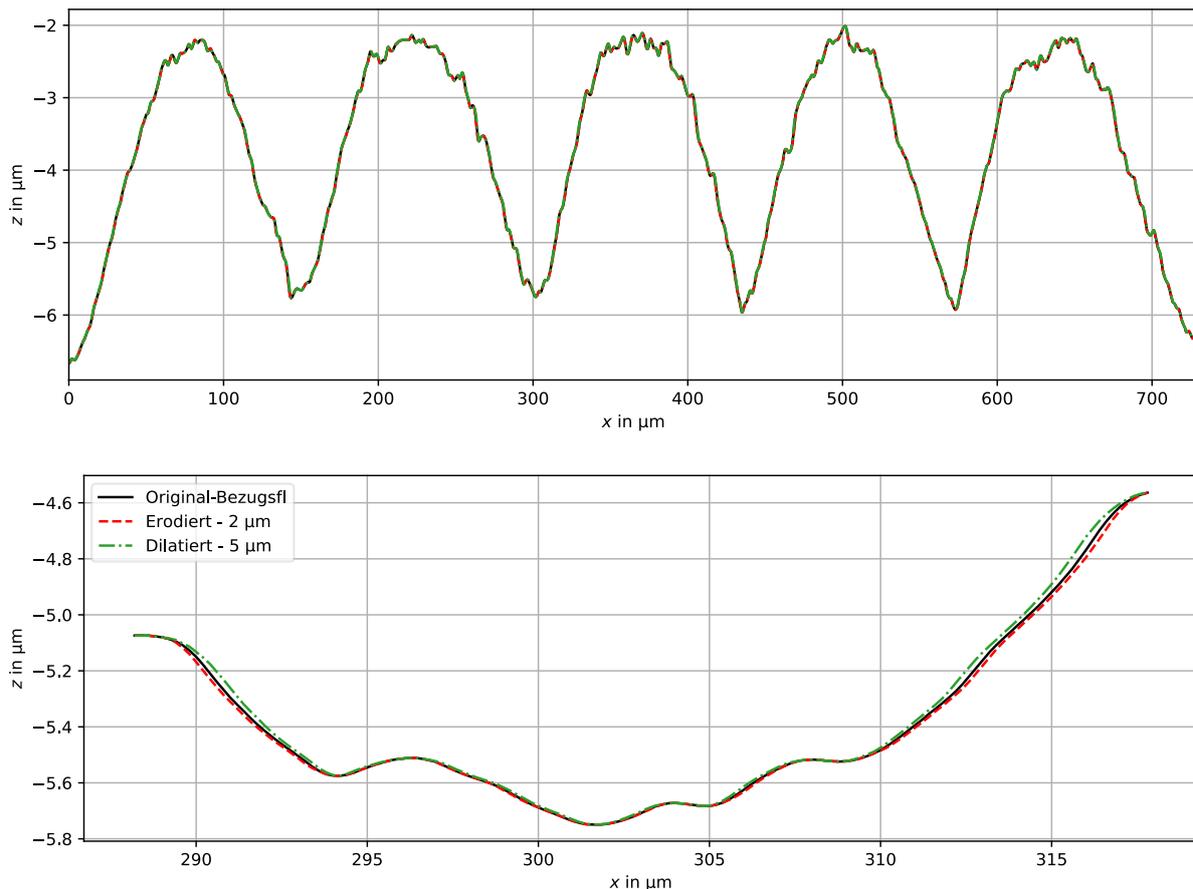
#### 4 Studie anhand eines Raunormals für Feinblechoberflächen

Typische Kalibrieraufgaben, bei denen Zweikufentaster eingesetzt werden, sind die Kalibrierung von Raunormalen zur Darstellung von Blechoberflächen. Abb. 3 zeigt den typischen Verlauf eines Profilschnitts auf einem Raunormal für Feinblechoberflächen, gemessen mit einem Kufentaster und mit einem Tastspitzenradius von  $5 \mu\text{m}$ . Raunormale werden generell so gefertigt, dass sich die wesentlichen Topographiemerkmale wiederholen. Die Länge einer Periode sollte ein ganzzahliger Teiler der Länge einer Auswertestrecke sein und darf maximal die Länge der gesamten Auswertestrecke aufweisen. Das ist wichtig, um für unterschiedliche Messpositionen, die oftmals auch Messstellen genannt werden, gleiche Werte der Rauheitskenngrößen zu erhalten. Der Einfluss der Filterung, einschließlich der Filterwirkung durch die Kufenbewegung und die Tastspitzengröße, auf die Rauheitskenngrößen hängt von der Mikrogeometrie der Oberflächentexturmerkmale ab. Die Abbildung der Mikrostrukturen wird schließlich durch Filtern verformt.

Die Größe der Tastspitze bestimmt die Änderung der Steigungen und Krümmungen des gemessenen Profilverlaufs in Abhängigkeit von den Steigungen und Krümmungen der Oberflächenstrukturen. Abb. 4 zeigt Detailansichten der Texturmerkmale des Raunormals für Feinblechoberflächen: Die durchgezogene schwarze Kurve zeigt den gemessenen Profilausschnitt. Die rote gestrichelte Kurve zeigt den Profilausschnitt nach dem Herausrechnen der Tastspitze mit einem Radius von  $2 \mu\text{m}$ . Konkave Merkmale der Oberflächentextur, die kleiner sind als das strukturierende Element, in diesem Fall die durch ein Kreissegment berechnete Tastspitze, lassen sich nicht rekonstruieren.

Will man aus dem Ergebnis der Erosion einen Profilverlauf wie er von einer Messung mit einer größeren Tastnadel zu erwarten wäre, berechnen, so wird dilatiert. Die mit grünen Strich-

Punkten gezeichnete Kurve in Abb. 4 ist das Ergebnis der Dilatation mit dem Radius  $5\ \mu\text{m}$ , die auf die rot gestrichelte Kurve angewendet wurde.



**Abbildung 4** Profilausschnitte zur Darstellung des Einflusses der Tastspitzengröße

Bei dieser Art der Oberflächenbeschaffenheit sind die Krümmungsradien in den Tälern und auf den Gipfeln größer als  $5\ \mu\text{m}$  und es zeigt sich, dass die Umrechnung der Tastspitzen eine Auswirkung auf den Verlauf der Flanken hat. Das führt dazu, dass sich die Tastspitzenumrechnung bei diesen Profilen auf  $R_a$ , aber nicht merklich auf  $R_z$ ,  $R_{z\text{max}}$  ( $R_{\text{max}}$ ) bzw.  $R_{zx}$  auswirkt.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse aus der Umrechnung einer Bezugsflächentastermessung in eine Kufentastermessung. Die Werte der Zeile "2  $\mu\text{m}$ " zeigen das Ergebnis ohne jegliche Umrechnungen der Tastspitze. Die Zeile "5  $\mu\text{m}$ " zeigt das Ergebnis aus dem mit einem Kreissegment mit  $5\ \mu\text{m}$  Radius dilatierten Profil. Die Dilatation wurde auf das Profil angewendet, das aus dem Profil des Bezugsflächentasters gewonnen wurde, nachdem es mit  $2\ \mu\text{m}$  erodiert wurde, daraus die Kufenbahn ermittelt wurde, die dann vom erodierten Profil subtrahiert wurde. Die in der Tabelle angegebenen Streuungen haben sich aus der Bestimmung der Kenngrößen aus genau einem Profil ergeben, aber aus jeweils 6 zueinander verschobenen Auswertestrecken, die jeweils in Schritten von 1 mm verschoben wurden. Die angegebenen Zahlenwerte stellen eine

Standardabweichung dar. Die Auswertestrecke für die Berechnung der Kennwerte ist 12,5 mm lang, die Grenzwellenlänge zur Trennung von Rauheit und Welligkeit beträgt  $\lambda_c = 2,5$  mm, für die Länge des Primärprofils wurden 17,5 mm verwendet.

Wenn kein Rauschfilter verwendet wird, liegt der Unterschied zwischen der Analyse mit oder ohne Tastspitzenradiusumrechnung bei den Extremalkenngrößen, d. h. bei den die höchsten Profilhöhen quantifizierenden Kenngrößen,  $R_z$ ,  $R_{zmax}$  ( $R_{max}$ ) und  $R_{zx}$  im Subnanometerbereich. Wenn das Filter mit  $\lambda_s = 8,3333$   $\mu\text{m}$  angewendet wird, liegt er bei etwa 3 nm. Bei einem Kennwert von 5,5  $\mu\text{m}$  liegen die Änderungen durch eine unterschiedliche Wahl des Tastspitzenradius somit unterhalb von einem Promille. Die Streuung der Größen  $R_z$ ,  $R_{zmax}$  und  $R_{zx}$  durch die Abhängigkeit von der Position der Auswertestrecke liegt bei etwa 8 nm bis 11 nm. Diese Unsicherheit hängt mit der Inhomogenität der Oberflächenbeschaffenheit zusammen. Der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$

#### Ohne Rauschfilter

$R_{tip}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_{zmax}/\mu\text{m}$	$R_{zx}/\mu\text{m}$
2 $\mu\text{m}$	1,2266 $\pm$ 0,0025	5,5216 $\pm$ 0,0115	5,5783 $\pm$ 0,0083	5,5977 $\pm$ 0,0075
5 $\mu\text{m}$	1,2236 $\pm$ 0,0025	5,5214 $\pm$ 0,0115	5,5781 $\pm$ 0,0083	5,5973 $\pm$ 0,0076
Diff./ $\mu\text{m}$	0,0030	0,0002	0,0002	0,0004

#### Mit Rauschfilter $\lambda_s = 8,3333$ $\mu\text{m}$

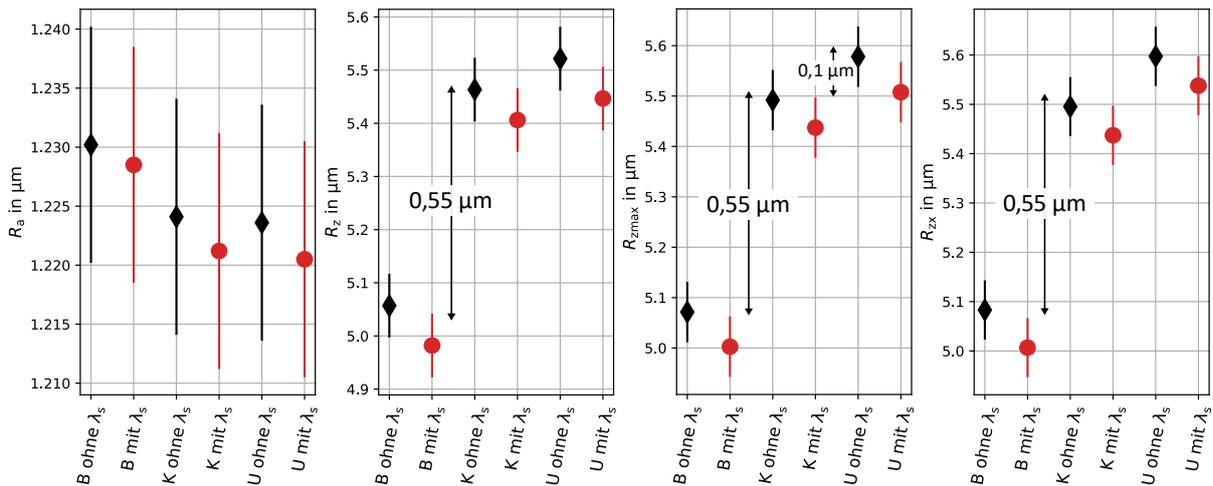
$R_{tip}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_{zmax}/\mu\text{m}$	$R_{zx}/\mu\text{m}$
2 $\mu\text{m}$	1,2235 $\pm$ 0,0025	5,4498 $\pm$ 0,0085	5,5123 $\pm$ 0,0102	5,5410 $\pm$ 0,0103
5 $\mu\text{m}$	1,2205 $\pm$ 0,0025	5,4466 $\pm$ 0,0086	5,5076 $\pm$ 0,0092	5,5377 $\pm$ 0,0107
Diff./ $\mu\text{m}$	0,0030	0,0032	0,0047	0,0033

**Tabelle 1** Einfluss der Tastspitzenumrechnung bei einem Raunormal für Bleche; die jeweils angegebene Streuung ist eine Standardabweichung

liegt bei  $R_a = 1,22$   $\mu\text{m}$ . Bei dieser Kenngröße liegen sowohl die Streuung durch die Lage der Auswertestrecke sowie die Änderung durch die unterschiedliche Wahl der Tastspitzenradien bei etwa 3 nm, was hier dann knapp 0,3 Prozent sind.

In dieser Studie wurde ein mit dem Bezugsflächentaster und ein mit dem Zweikufentaster gemessenes Profil möglichst gut zur Deckung gebracht, um den Einfluss der Inhomogenität der Topographie gering zu halten. Dennoch weichen die Höhenkenngrößen  $R_z$ ,  $R_{zmax}$  und  $R_{zx}$ , zwischen dem Profil, das aus der Messung mit einem realen Kufentaster, und dem Profil, das durch Umrechnung gewonnen wurde in der Größenordnung von 0,10  $\mu\text{m}$  ab. Der Unterschied dieser Kennwerte zwischen der Auswertung aus den Kufentasterprofilen und der Auswertung aus den ursprünglichen Bezugsflächentasterprofilen liegt bei 0,55  $\mu\text{m}$ .

Abb. 5 zeigt den Vergleich für den arithmetischen Mittenrauwert, sowie für die drei betrachteten Höhenkenngrößen. Verglichen werden die Kenngrößen, die jeweils aus den Profilen berechnet wurden, die mit einem Bezugsflächentaster und mit einem Kufentaster gemessen wurden. In der



**Abbildung 5** Vergleich der Kenngrößen jeweils berechnet aus Profilen, die mit einem Bezugsflächentaster (B) und mit einem Kufentaster (K) gemessen wurden, sowie Profilen des Bezugsflächentasters, die nach dem in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahren umgerechnet wurden (U). Die schwarzen Rauten stellen die Ergebnisse ohne Rauschfilter und die roten Kreise mit Filterung mit  $\lambda_s = 8,3333 \mu\text{m}$  dar. Die Unsicherheiten sind die zweifachen Standardabweichungen aus der Streuung der unterschiedlichen Messstellen, die in Kalibrierscheinen angegeben werden.

Achsenbeschriftung sind diese jeweils gekennzeichnet mit B für **B**ezugsflächentaster und mit K für **K**ufentaster. Die mit U für **U**mgerechnet gekennzeichneten Einträge wurden aus Profilen des Bezugsflächentasters ermittelt, die nach dem in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahren umgerechnet wurden. Der Unterschied von 100 nm konnte bei dieser ersten Studie weder einer möglichen Unsicherheit der Skalierung der Achsen und noch irgendwelchen Abnutzungserscheinungen auf den Kufen zugeordnet werden. Diese beiden Effekte wurden untersucht. Die Skalierungsproblematik wurde analysiert, indem jeweils eine Profilperiode vom Kufentaster gemessen und vom Bezugsflächentaster gemessen wurde, diese einander zugeordnet und auf dieselbe Skala umgerechnet wurden, was eine Änderung der Höhenkennwerte von knapp 3 nm zeigt. Zur Untersuchung des Einflusses der Kufengeometrie wurden die Konturen der beiden Kufen gemessen. Die Messdaten der Kufenkonturen wurden so aufbereitet, dass sie in das Modell eingebaut werden konnten. Um Kufenkonturpunkte an den Stützstellen der Bezugsflächentastermessungen zu erhalten, wird interpoliert. Die interpolierten Punkte werden aus kubischen Splines, die aus den gemessenen Kufenkonturpunkten berechnet werden, gewonnen. Das Einbeziehen der Mikrogeometrie der Kufen hat nur eine geringfügige Änderung der Höhenkennwerte in der Größenordnung von 3 nm bis 4 nm erbracht.

In den Kalibrierscheinen werden die erweiterten Gesamtunsicherheiten für den arithmetischen Mittenrauwert mit  $U(R_a) = 40 \text{ nm}$  und für die gemittelte Rautiefe mit  $U(R_z) = 300 \text{ nm}$  angegeben, so dass eine Abweichung der Höhenkenngrößen  $R_z$ ,  $R_{zmax}$  ( $R_{max}$ ) und  $R_{zx}$  von 100 nm

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	15 / 25

vertretbar ist. Die Änderung der Kenngröße  $R_a$  liegt im Bereich der Streuung durch die Inhomogenität der Oberflächenbeschaffenheit.

Unkritisch hinsichtlich der Verwendung von Tastschnittverfahren mit oder ohne Kufen sind die Lateralkenngrößen. Die in der Norm DIN EN 10049 [2] definierte Größe *Peak-count*  $R_{pc}$  liefert für das in dieser Studie verwendete Feinblechraunormal die Werte  $R_{pc} = 64,8 \frac{1}{cm}$  und  $65,6 \frac{1}{cm}$  in Abhängigkeit von der Messstellenposition. In Kalibrierscheinen wird die Gesamtunsicherheit für diese Kenngröße mit  $U(R_{pc}) = 2 \frac{1}{cm}$  beziffert. Die Norm DIN EN 10049 definiert die Kenngröße  $R_{pc}$  als Anzahl der Spitzen auf der gesamten Auswertestrecke und spezifiziert, dass  $R_{pc}$  als absolute Anzahl je cm angegeben wird. Durch den ganzzahligen Wert für die Anzahl der Spitzen je Auswertestrecke ergeben sich diskrete Sprünge. Wenn für verschiedene Messstellen eine Variation um eine Profilspitze vorkommt, dann beträgt bei einer Auswertestrecke von 12,5 mm bzw. 1,25 cm ein Sprung  $\frac{1}{1,25cm} = 0,8 \frac{1}{cm}$ . Deshalb treten bei dem hier untersuchten Beispiel die beiden Werte  $64,8 cm^{-1}$  und  $(64,8+0,8) cm^{-1} = (65,6) cm^{-1}$  auf. In der Norm DIN EN 21920-2 bzw. ISO 21920-2 [5] wird eine ähnliche Kenngröße definiert, ebenfalls ein Maß für die Anzahl der Berge pro Zentimeter, die jedoch aus der mittleren Wellenlänge  $R_{sm}$  durch Kehrwertbildung bestimmt wird. Änderungen durch den Filtereffekt der Kufenbewegung sind hier nicht sichtbar, lediglich eine Streuung der Werte durch die Inhomogenität der Oberfläche. Die mittlere Wellenlänge der umgerechneten Profile ergab  $R_{sm} = (153,1 \pm 0,5) \mu m$  unabhängig davon, ob das Rauschfilter eingeschaltet wurde, des realen Kufentasters  $R_{sm} = (153,5 \pm 0,5) \mu m$  und der Profile der Bezugsflächentastermessung  $R_{sm} = (153,8 \pm 0,5) \mu m$ . Die daraus resultierende Spitzenzahl beträgt  $R_{pc} = (65,13 \pm 0,18) \frac{1}{cm}$ .

## 5 Validierung der Algorithmen gegen Langzeitmessungen an einem Gebrauchsnormal

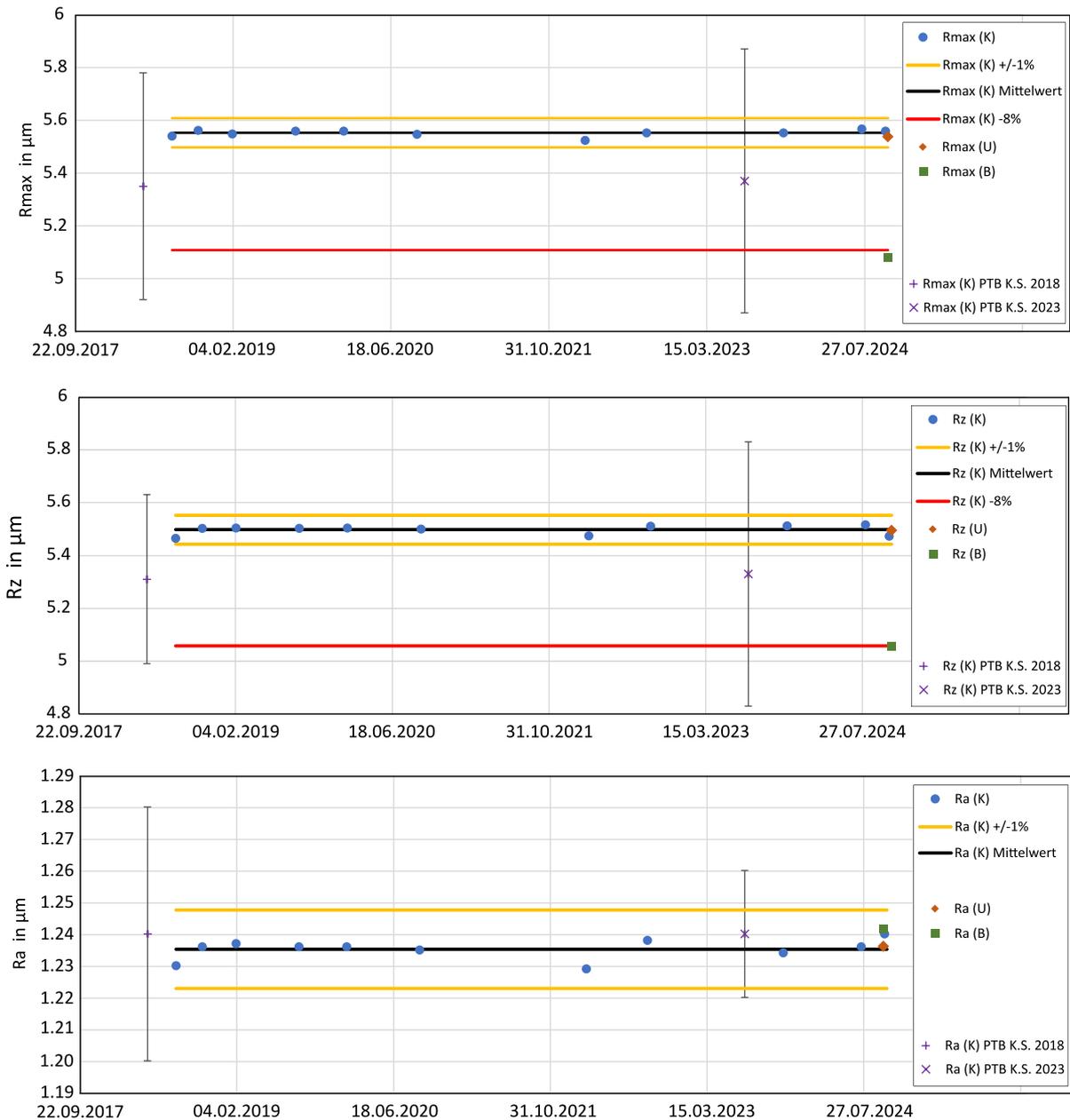
Die in den Abschnitten 3 und 4 beschriebenen Methoden verwenden die in Anhang A und B aufgeführten Algorithmen.

Jene Algorithmen wurden im DAkkS-akkreditierten Kalibrierlabor der Firma HOMMEL ETAMIC JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH in Villingen-Schwenningen gegen Langzeitmesswerte aus Zweikufentastermessungen (SN 85064) an einem Gebrauchsnormal für Feinblechoberflächen (SN 8044, Oberflächenprofil wie in Abb. 3) validiert.

Dieses Gebrauchsnormal wird seit Anfang 2018 regelmäßig zur Überprüfung des dortigen Kalibriermessplatzes für Rauheitsnormale verwendet, sodass eine großzügige Datenbasis zur Verfügung steht.

In Abb. 6 werden die Langzeitmesswerte aus Zweikufentastermessungen (K) für die Kenngrößen  $R_{max}$  (nach DIN 4768:1985 [6]),  $R_z$  und  $R_a$  (jeweils nach DIN EN ISO 4287:1998 [7]) den Ergebnissen aus einer Messung mit einem Bezugsebenentaster (B) und der Umrechnungsmethode (U) unter Verwendung der Bezugsebenentastermessung gegenübergestellt. Auf eine Gegenüberstellung der Messwerte für  $R_{pc}$  (nach DIN EN 10049) wird aus den in Abschnitt 4 beschriebenen Gründen verzichtet.

Zum Vergleich werden in Abb. 6 auch die Referenzergebnisse aus zwei Kalibrierungen durch die PTB aus dem Jahr 2018 (K.S. 57317 PTB 18) und aus dem Jahr 2023 (K.S. 57029 PTB 23), die mit



**Abbildung 6** Vergleich von Langzeitmesswerten der Kenngrößen  $R_{\max}$  nach DIN 4768:1985 (*oben*),  $R_z$  nach DIN EN ISO 4287:1998 (*mitte*) und  $R_a$  nach DIN EN ISO 4287:1998 (*unten*) aus den Messungen mit Zweikufentastern (K) mit Ergebnissen aus einer Messung mit einem Bezugsebenentaster (B), sowie mit der Umrechnungsmethode (U) und zwei PTB-Referenzkalibrierungen aus den Jahren 2018 und 2023. Die Filterung wurde bei den Daten von HOMMEL ETAMIC mit  $\lambda_s = 8,3333 \mu\text{m}$  und den Daten in den Kalibrierscheinen mit  $\lambda_s = 8,0 \mu\text{m}$  durchgeführt.

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	17 / 25

einem Zweikufentaster (SN 099824) gleicher Bauart durchgeführt wurden, dargestellt. Die Unsicherheitsbalken stellen dabei die in den Kalibrierscheinen angegebenen erweiterten Messunsicherheiten dar.

- Die Langzeitmesswerte aus Zweikufentastermessungen (K) schwanken nur minimal um einen gemeinsamen Mittelwert und weichen gleichzeitig stets weniger als  $\pm 1\%$  von diesem ab.
- Die PTB-Referenzwerte für  $R_{\max}$  und  $R_z$  weichen um mehr als  $1\%$  vom Mittelwert der Langzeitmessungen ab. Als Ursache werden die realen geometrischen Abweichungen des Zweikufentasters der PTB von der idealen Geometrie vermutet. Dieser Umstand ist im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt. Dadurch überdecken die erweiterten Messunsicherheiten der PTB-Referenzen den Wertebereich der Langzeitmessungen sehr gut.
- Die Messwerte aus der Bezugsebenentastermessung (B) sind bei  $R_{\max}$  und  $R_z$  ca.  $8\%$  kleiner, bei  $R_a$  ca.  $0,5\%$  größer als die Messwerte der Zweikufentastermessungen (K).
- Die Messwerte aus der Umrechnungsmethode (U), die das Messprofil der Bezugsebenentastermessung (B) verwendet, liegen nahezu perfekt auf den jeweiligen Mittelwertsgeraden, die die Langzeitmesswerte aus den Zweikufentastermessungen (K) repräsentieren.

Die Ergebnisse dieses Vergleiches validieren die Umrechnungsmethode in außerordentlicher Weise. Aufgrund der geringen Abweichungen zu den Messwerten des über einen langen Zeitraum verwendeten Gebrauchsnormals ist bei Anwendung der Umrechnungsmethode eine Reduktion der erweiterten Messunsicherheiten zu empfehlen.

## 6 Zusammenfassung

Dieser Expertenbericht stellt ein Verfahren für die Kalibrierung von Raunormalen für die Darstellung der Blechoberflächenbeschaffenheit vor, durch das auf den Einsatz von Zweikufentastern im Kalibrierbetrieb verzichtet werden kann.

Bei Anwendung des Verfahrens werden mit Bezugsflächentastern aufgenommene Profile in Kufentasterprofile umgerechnet. Dies ist für die Rautiefenkenngrößen, die die extremalen Profilhöhen quantifizieren,  $R_z$ ,  $R_{z\max}$  und  $R_{zx}$  relevant. Bei Feinblechen mit typischen  $R_z$ -Kennwerten im Bereich von  $5\ \mu\text{m}$  bis  $5,5\ \mu\text{m}$  unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen Kufen- und Bezugsflächentastermessungen um etwa  $0,6\ \mu\text{m}$ . Die Unsicherheit des Umrechnungsverfahrens liegt ungefähr bei  $0,1\ \mu\text{m}$ . Für die Bestimmung der Kenngrößen arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$  und Spitzenzahl  $R_{Pc}$  bzw.  $R_{pc}$  gibt es keine signifikante Änderung der Werte, so dass für diese keine Umrechnung erforderlich ist.

Durch die Verwendung der Umrechnungsmethode werden Umbauzeiten eingespart und es entfallen Unsicherheitsanteile, die die Form- und Lagetoleranzen der Zweikufentaster abbilden. Eine Reduktion der kleinsten akkreditierten Messunsicherheiten ist damit empfohlen.

	Rauheitsmesstechnik: Umrechnung von Profilen aus Bezugsflächentastermessungen in Kufentasterprofile <a href="https://doi.org/10.7795/550.20250116">https://doi.org/10.7795/550.20250116</a>	DKD-E 4-2	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	18 / 25

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Grochalski et al., *Differences in Roughness Parameter Values from Skid and Skidless Contact Stylus Profilometers*, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15(1), 2021, 58–70, [doi: 10.12913/22998624/130453](https://doi.org/10.12913/22998624/130453)
- [2] DIN EN 10049:2013, *Messung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra und der Spitzenzahl R<sub>pc</sub> an metallischen Flacherzeugnissen*
- [3] Akkreditierungsurkunde, Kalibrierlaboratorium HOMMEL ETAMIC JENOPTIK Industrial Metrology GmbH, 2023, <https://www.hommel-etamic.com/-/media/websitedocuments/certificates/npc/dakks-dkd-akkreditierung-metrology-2023-11.pdf>
- [4] Villarrubia, *Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction, and Tip Estimation*, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **102**(4), 425-454, 1997, [doi: 10.6028/jres.102.030](https://doi.org/10.6028/jres.102.030).
- [5] DIN EN ISO 21920-2:2022-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 2: *Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit* (ISO 21920-2:2021, korrigierte Fassung 2022-06); internationale Fassung: ISO 21920-2:2021, Corrected version 2022-06, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [6] DIN 4768:1985 zuletzt erschienen als 4768:1990-05 Ermittlung der Rauheitskenngrößen  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Meßbedingungen (zurückgezogen)
- [7] DIN EN ISO 4287:1998 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: *Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit* (zurückgezogen, durch die Norm ISO 21920-2 [5] ersetzt)

## Anhang A Quellcode zum Umrechnungsalgorithmus: Kufentaster

Profile, die mit einem Bezugsflächentaster gemessen wurden, können näherungsweise mit der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methode in Profile, die den mit Kufentastern gemessenen Profilen entsprechen, umgerechnet werden. Der Algorithmus `skidline` berechnet die Kufenbahn  $z_{\text{Kufenbahn}}$ , Gl. (7).

Der Algorithmus `skidline` wird wie folgt aufgerufen:

```
x_skid, z_skid, sin_skid = skid_model.skidline(x_B, ze_B, dtip, dkk, w_k, Rkufe)
#
# falls es eine Messung der Topographie der Kufens selbst gibt:
# csp_le, csp_ri sind die Pointer auf die Datenstrukturen, die die kubischen Splines
# enthalten mit: from scipy.interpolate import CubicSpline
# csp_le = scipy.interpolate.CubicSpline(x_Kufetopo_le, z_Kufetopo_le)
# wobei le fuer left steht, welches die vordere Kufe ist
# ri fuer right hintere
#
x_skid, z_skid, sin_skid = skid_model.skidline(x_B, ze_B, dtip, dkk, w_k, Rkufe, [1], \
                                             csp_le, csp_ri)
#
#
# Berechnung des umgerechneten Profils
# ze_B: Profil des Bezugsflaechentasters nach Erosion der Tastspitzengeometrie
# iB_1: Startindex fuer den Anfang des Profils, falls Punkte am Anfang
#       wegzulassen sind, beispielsweise solche vom Normal bevor die
#       Rauheitsstruktur anfaengt
#
z_fake = ze_B[iB_1:iB_1+len(z_skid)] - z_skid[iB_1:len(z_skid)]
```

Die folgenden Funktionen gehören zum Modul `skid_model`

```
def skidline(x, z, dtip, dkk, w_k, radius_k, *xtz):
    # if a model exists describing a straightness deviation
    # as a cosine: a * cos(2 pi (x - x_0) / wl)
    # then xtz is filled
    # xtz[0][0]: amplitude, xtz[0][1]: wl, xtz[0][2] x_0 of skid 1 (close to tip)
    # xtz[1][0]: amplitude, xtz[1][1]: wl, xtz[1][2] x_0 of skid 2 (other side to tip)

    x_k1_left = dtip - 0.5 * w_k
    x_k1_right = dtip + 0.5 * w_k
    x_k2_left = x_k1_left + dkk
    x_k2_right = x_k1_right + dkk
    dx = x[1] - x[0]
    n_dist_from_end = int(np.ceil(x_k2_right/dx))
    n_data = len(x)

    n_use = n_data - n_dist_from_end

    x_skid = np.zeros(n_use)
    z_skid = np.zeros(n_use)
    sin_skid = np.zeros(n_use)
```

```

    for i_d in range(0, n_use):
#
# Schritt 1: Indexmengen der Punkte unter den Kufen
#
        i_k1 = np.where(((x[i_d]+x_k1_left) < x) & (x < (x[i_d]+x_k1_right)))[0]
        i_k2 = np.where(((x[i_d]+x_k2_left) < x) & (x < (x[i_d]+x_k2_right)))[0]
#
# Schritt 2: Startwerte der Beruehrpunkte
#
        r_A, nvec = get_touchpoints_initial(x[i_k1], z[i_k1], x[i_k2], z[i_k2])
        readyflag = 0
        iter = 0
#
# Schritt 3: Iterative Ermittlung der Kufenberuehrung
#
        while (readyflag == 0) and (iter < 5):
            z_skidcurv1 = skid_curvature(x[i_k1], radius_k, nvec)
            z_skidcurv2 = skid_curvature(x[i_k2], radius_k, nvec)

            if len(xtz) > 0:
                if len(xtz[0]) == 3:
                    z_skidcurv1 += skid_formdeviation_cos(x[i_k1]-np.mean(x[i_k1]),\
                                                         xtz[0][0], xtz[0][1], xtz[0][2])
                    z_skidcurv2 += skid_formdeviation_cos(x[i_k2]-np.mean(x[i_k2]),\
                                                         xtz[1][0], xtz[1][1], xtz[1][2])
                elif len(xtz[0]) == 1:
                    skid1_formdev = xtz[1](x[i_k1]-np.mean(x[i_k1]))
                    z_skidcurv1 += skid1_formdev
                    z_skidcurv2 += xtz[2](x[i_k2]-np.mean(x[i_k2]))
            readyflag, r_A, nvec = get_touchpoint_iterate(r_A, nvec, x[i_k1], \
                                                         z[i_k1]+z_skidcurv1, x[i_k2], z[i_k2]+z_skidcurv2)
            iter += 1
#
# in Schritt 5: Bestimmung der Kufenbahn Gl. (7)
#
        r_tip = get_skidreference_pt(r_A, nvec, x[i_d])
        x_skid[i_d] = r_tip[0]
        z_skid[i_d] = r_tip[1]
        sin_skid[i_d] = nvec[0]
    return x_skid, z_skid, sin_skid

```

Die Funktion `skid_formdeviation_cos` stellt eine rein für Testzwecke verwendete erste, provisorische Modellgleichung dar, zu der die Ergebnisse hier nicht weiter behandelt wurden. Die in diesem Artikel berichteten Ergebnisse beziehen sich auf die kubischen Splines in `skid1_formdev`.

Die in der Funktion `skidline` aufgerufenen Funktionen sind

- o `get_touchpoints_initial`
- o `skid_curvature`
- o `get_touchpoint_iterate`

Die Startwerte für die Berührungspunkte des Profils mit den Kufen werden aus dem Abstand zur Näherungsgeraden ermittelt, die horizontal liegt. Der Normalenvektor zur Geraden, die die beiden Berührungspunkte verbindet wird nach Gl. (3) berechnet.

```
def get_touchpoints_initial(x_k1, z_k1, x_k2, z_k2):
#
# in Schritt 2: Berechnen des Normalenvektors nach Gl. (3)
#
    i_k1 = np.argmax(z_k1)
    i_k2 = np.argmax(z_k2)
    r_A = np.array([x_k1[i_k1], z_k1[i_k1]])
    r_k2 = np.array([x_k2[i_k2], z_k2[i_k2]])
    nvec = get_normalvec(r_A, r_k2)
    return r_A, nvec
```

Die Unterfunktion zur Berechnung des Normalenvektors ist hier dargestellt:

```
def get_normalvec(rk1, rk2):
#
# Normalenvektor zur Geraden, die die beiden
# Kufenberuehrpunkte rk1 und rk2 verbindet
# Gl. (4)
#
    u = rk2 - rk1
    mue = np.sqrt(u[0]**2 + u[1]**2)
    u /= mue
    n = np.array([-u[1], u[0]])
    return n
```

Innerhalb der Iterationsschleife wird jeweils die kreisförmige Kontur der Kufen vom Profil subtrahiert, damit einfach die Hessesche Normalform zur Berechnung der Abstände, Gl. (5), verwendet werden kann. Die Kreissegmente sind bezüglich der Richtung der Geraden aus dem vorherigen Iterationsschritt ausgerichtet.

```
def skid_curvature(x_skid, R_skid, nvec):
#
# in Schritt 3:
# nach unten geoeffnet, Pol auf Null, der Rest negative Werte
# fuer Subtraktion vom Profil des Bezugsflaechentasters
#
    x_skid -= (np.mean(x_skid) - R_skid*nvec[0])
    z_skid = np.sqrt(R_skid**2 - x_skid**2) - R_skid + x_skid * nvec[0]
    z_max = np.max(z_skid)
    z_skid -= z_max
    return z_skid
```

Zu den auf diese Weise gekrümmten Profilabschnitten werden im nächsten Iterationsschritt wieder die Berührungspunkte, sowie der Normalenvektor zur Geraden, die die beiden Punkte verbindet, ermittelt. Die Funktion dazu sieht wie folgt aus:

```
def get_touchpoint_iterate(r_A, nvec, x_k1, z_k1, x_k2, z_k2):
#
# in Schritt 3: Berechnung der Gl. (4)
#
    tiny = 1e-7
    d_A = nvec[0]*r_A[0] + nvec[1]*r_A[1]
    d_k1 = nvec[0]*x_k1 + nvec[1]*z_k1 - d_A
    d_k2 = nvec[0]*x_k2 + nvec[1]*z_k2 - d_A
    i_k1 = np.argmax(d_k1)
    i_k2 = np.argmax(d_k2)
    r_A = np.array([x_k1[i_k1], z_k1[i_k1]])
    r_k2 = np.array([x_k2[i_k2], z_k2[i_k2]])
    nvec = get_normalvec(r_A, r_k2)
    if (d_k1[i_k1] > tiny) or (d_k2[i_k2] > tiny):
        readyflag = 0
    else:
#
# in Schritt 4: Terminieren, wenn positivwertige
# Abstände nicht mehr vorkommen
#
        readyflag = 1
    return readyflag, r_A, nvec
```

Das in der aufrufenden Umgebung mit `ze_B` bezeichnete Array enthält entweder die Profilhöhen nach Erosion, oder die Rohdaten, je nachdem, ob eine Tastspitzenkorrektur durchgeführt wird. Falls das Array `ze_B` das erodierte Profil darstellt, wird das Array `z_fake`, das das auf eine fingierte Kufentastermessung umgerechnete Profil darstellt, dilatiert. Die Algorithmen zum Erodieren und Dilatieren werden in Anhang B gezeigt.

## Anhang B Umrechnung der Tastspitzengeometrien

Die Umrechnung der Tastspitzenradien wird, sofern diese erforderlich sind, durch Anwendung der morphologischen Operationen Erosion und Dilation durchgeführt. Eine mögliche Implementierung für Messungen mit Antastrichtung vertikal zur Oberfläche wurde von John Villarrubia im Jahr 1997 mit Quellcode in der Programmiersprache C publiziert [4]. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde eine Portierung nach Python eingesetzt.

Die Erosion wird mit folgender Funktion realisiert:

```
def erodewithapex_profile(x_raw, z_raw, circ_radius, halfconeangle, x_hwidth):
    n_tip_r, z0_tip = make_conetip(circ_radius, halfconeangle, x_hwidth, \
                                   x_raw[1]-x_raw[0])

    z_erode = np.copy(z_raw)
    for k in range(0, n_tip_r):
        z_tip = z_raw[k] + z0_tip[n_tip_r-k:]
        i_tip = np.arange(0, len(z0_tip[n_tip_r-k:]), dtype=int)
        iabove = np.where(z_erode[i_tip] > z_tip)[0]
        if (len(iabove) > 0):
            z_erode[i_tip[iabove]] = z_tip[iabove]
    for k in range(n_tip_r, len(z_erode)-n_tip_r):
        z_tip = z_raw[k] + z0_tip
        i_tip = np.arange(k-n_tip_r, k+n_tip_r+1, dtype=int)
        iabove = np.where(z_erode[i_tip] > z_tip)[0]
        if (len(iabove) > 0):
            z_erode[i_tip[iabove]] = z_tip[iabove]
    for k in range(len(z_erode)-n_tip_r, len(z_erode)):
        j = len(z_erode) - k
        z_tip = z_raw[k] + z0_tip[0:n_tip_r+j]
        i_tip = np.arange(k-n_tip_r, k-n_tip_r+len(z_tip), dtype=int)
        iabove = np.where(z_erode[i_tip] > z_tip)[0]
        if (len(iabove) > 0):
            z_erode[i_tip[iabove]] = z_tip[iabove]
    return z_erode
```

Die zu Beginn der Funktion `erodewithapex_profile` aufgerufene Unterfunktion `make_conetip` stellt das strukturierende Element für die Erosions- und Dilationsoperationen dar.

```
def make_conetip(circ_radius, halfconeangle, hwidth, dx):
    x_transi = circ_radius * np.cos(halfconeangle)
    z_transi = circ_radius * (1.0 - np.sin(halfconeangle))
    x_tip_r = np.arange(0, hwidth, dx)
    n_tip_r = len(x_tip_r)
    i_circ = np.where(x_tip_r <= x_transi)[0]
    z_tip_r = np.zeros(n_tip_r)
    z_tip_r[i_circ] = circ_radius - np.sqrt(circ_radius**2 - x_tip_r[i_circ]**2)
    z_tip_r[max(i_circ)+1:] = z_transi + \
        (x_tip_r[max(i_circ)+1:] - x_transi) / np.tan(halfconeangle)
    z_tip = np.append(np.flip(z_tip_r), z_tip_r[1:])
    return n_tip_r-1, z_tip
```





Herausgeber:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**

Deutscher Kalibrierdienst

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

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

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