
**Richtlinie
DKD-R 4-2**

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

Blatt 1

Kalibrieren von Normalen für die
Rauheitsmesstechnik

Herausgegeben von der Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis „Rauheit“ seines Fachausschusses „Länge“.

Copyright © 2003 by DKD

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen zusammengeschlossen. Sie werden von der Akkreditierungsstelle des DKD bei der PTB akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten DKD-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.

Kalibrierungen durch DKD-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.

Im DKD werden Kalibriermöglichkeiten für elektrische Messgrößen, für Länge, Winkel und weitere geometrische Größen, für Rauheit, Koordinaten- und Formmesstechnik, für Zeit und Frequenz, für Kraft, Drehmoment, Beschleunigung, Druck, Durchfluss, Temperatur, Feuchte, medizinische Messgrößen, akustische Messgrößen, optische Messgrößen, ionisierende Strahlung und weitere Messgrößen angeboten.

Veröffentlichungen: siehe Internet

Anschrift:

Deutscher Kalibrierdienst bei der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig
Postfach 33 45, D-38023 Braunschweig
Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-19 01
Fax: (05 31) 5 92-19 05
E-Mail: dkd@ptb.de
Internet: www.dkd.info

Vorwort

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

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

Die Richtlinie wurde vom Fachausschuss „Länge“ in Zusammenarbeit mit der PTB erstellt und vom Beirat des DKD verabschiedet. Mit der Veröffentlichung wird sie für alle DKD-Kalibrierlaboratorien verbindlich, sofern keine eigene, von der Akkreditierungsstelle genehmigte Verfahrensanweisung vorliegt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
1 Geltungsbereich	6
2 Begriffe, Definitionen.....	6
3 Normale/Normalmessenrichtungen.....	6
4 Umgebungsbedingungen.....	6
5 Kalibrierung	6
5.1 Kalibrierfähigkeit	6
5.1.1 Glasnormale.....	6
5.1.2 Metallische Normale	7
5.2 Kalibrierverfahren	7
5.3 Kalibrierumfang / Durchführung der Kalibrierung	7
5.3.1 Kalibrierung mit dem Tastschnittverfahren.....	7
5.3.2 Bewertung der Messergebnisse	8
6 Messunsicherheit	9
6.1 Gerätefunktion.....	9
6.2 λ_s -Filter	10
6.3 c-Filter	10
6.4 Kennwertfunktion.....	11
6.5 Unbekannte systematische Abweichungen	11
7 Dokumentation der Messergebnisse.....	12
8 Verwendete Begriffe und Abkürzungen	12
9 Zitierte Normen und weitere Unterlagen	13

Anhang A: Messunsicherheit beim Kalibrieren von Raunormalen.....	15
1 Einleitung	15
2 Gerätefunktion G	15
2.1 Beschreibung des Modells.....	15
2.2 Kalibrierfaktor	16
2.2.1 Modell für Kalibrierfaktor	16
2.2.2 Modell für Pt_m	17
2.3 Unsicherheit des Gesamtprofils.....	18
3 Bestimmung der Unsicherheit der Eingangsgrößen.....	19
3.1 Bezugsnormal (Tiefeneinstellnormal)	19
3.2 Messort	19
3.3 Wiederholpräzision der Antastung bei der Kalibrierung.....	19
3.4 Topografie des Normalen	19
3.5 Führungsabweichung.....	21
3.6 Grundrauschen.....	21
3.7 Plastische Verformung	21
3.8 Tastspitzenradius	22
4 Kurzwelliges Tiefpassfilter für die Rauheit	23
5 Tiefpassfilter für die Welligkeit.....	23
6 Kennwertfunktion.....	24
7 Zusammenstellung der Einflussgrößen	25
7.1 Ohne λ_s -Filterung.....	25
7.2 Mit λ_s -Filterung.....	26
8 Unbekannte systematische Abweichungen.....	27
9 Literatur.....	28
10 Vergleichsunsicherheiten	29
Anhang B: Messunsicherheit der Tiefe des Profils eines Tiefeneinstellnormalen mit der Rauheit der Referenzfläche und Lokalisierung des Messortes im Topografie-Term	30
1. Kalibrierfaktor.....	30
1.1 Bezugsnormal	30
1.2 Unterschied Messort - Kalibrierort.....	30
1.3 Wiederholpräzision.....	30
2. Topografie des Normalen	30
2.1 Rauheit der Referenzfläche	30
2.2 Lokalisierung des Messortes	31
3. Führungsabweichung des Gerätes	31
4. Grundrauschen	31
5. Plastische Verformung	31
6. Unsicherheit der Punkte des Gesamtprofils	32
7. Kennwertfunktion.....	32
7.1 Messunsicherheit der Profiltiefe Pt	32
7.2 Messunsicherheit der Rillentiefe D	33
8. Auswertung mit Filterung	34
8.1 Unsicherheit der Profiltiefe Pt	35
8.2 Unsicherheit der Rillentiefe D	35
9. Zusammenfassung der Messunsicherheit von Profiltiefe Pt und Rillentiefe D	36

Anhang C: Messunsicherheit der Tiefe des Profils eines Tiefeneinstellnormals mit der Standardabweichung der Rillentiefe als Topografie-Term..... 40

- 1. Kalibrierfaktor..... 40
 - 1.1 Bezugsnormal 40
 - 1.2 Unterschied Messort - Kalibrierort..... 40
 - 1.3 Wiederholpräzision..... 40
- 2. Topografie des Normals 40
- 3. Führungsabweichung des Gerätes 41
- 4. Grundrauschen 41
- 5. Plastische Verformung 41
- 6. Unsicherheit der Punkte des Gesamtprofils 41
- 7. Kennwertfunktion..... 41
 - 7.1 Messunsicherheit der Profiltiefe P_t 41
 - 7.2 Messunsicherheit der Rillentiefe D 42
- 8. Auswertung mit Filterung 44
 - 8.1 Unsicherheit der Profiltiefe P_t 44
 - 8.2 Unsicherheit der Rillentiefe D 44
- 9. Zusammenfassung der Messunsicherheit von Profiltiefe P_t und Rillentiefe D 45

Anhang D: Messunsicherheit der Tiefe des Profils eines Tiefeneinstellnormals mit dem Range der Rillentiefe als Topografie-Term..... 49

- 1. Kalibrierfaktor..... 49
 - 1.1 Bezugsnormal 49
 - 1.2 Unterschied Messort - Kalibrierort..... 49
 - 1.3 Wiederholpräzision..... 49
- 2. Topografie des Normals 49
- 3. Führungsabweichung des Gerätes 50
- 4. Grundrauschen 50
- 5. Plastische Verformung 50
- 6. Unsicherheit der Punkte des Gesamtprofils 50
- 7. Kennwertfunktion..... 50
 - 7.1 Messunsicherheit der Profiltiefe P_t 50
 - 7.2 Messunsicherheit der Rillentiefe D 51
- 8. Auswertung mit Filterung 53
 - 8.1 Unsicherheit der Profiltiefe P_t 53
 - 8.2 Unsicherheit der Rillentiefe D 53
- 9. Zusammenfassung der Messunsicherheit von Profiltiefe P_t und Rillentiefe D 54

1 Geltungsbereich

Dieses Blatt gilt für die Kalibrierung von Normalen der Typen A, C, D und E entsprechend ISO 5436 - 1. Diese Normale werden in der Rauheitsmesstechnik nach dem Tastschnittverfahren eingesetzt.

2 Begriffe, Definitionen

Es gelten die Begriffserklärungen in ISO 5436 -1 und darin zitierte Normen.

3 Normale/Normalmesseinrichtungen

Die Rückführung der im Abschnitt 5.3 – Kalibrierumfang / Durchführung der Kalibrierung mit dem Tastschnittverfahren - genannten Normale/Normalmesseinrichtungen muss durch Kalibrierung mit geeigneten Messsystemen sichergestellt werden, deren Anschluss an die nationalen Normale in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) nachgewiesen ist. Zur Kalibrierung des Tastschnittgerätes ist die DKD-Richtlinie DKD-R 4-2 Blatt 2 anzuwenden.

4 Umgebungsbedingungen

Der Einfluss der Umgebungsbedingungen wird durch Rauheitsmessungen auf einem Planglas ermittelt. Dabei ist die bestmögliche Auflösung des Messsignals einzustellen und eine Taststrecke auf einem kratzerfreien Planglassektor zu suchen. Diese Strecke wird unter den selben Messbedingungen wie bei der Kalibrierung des Normalen (entsprechend DIN ISO 4288 und DIN ISO 3274) fünf mal abgetastet. Das arithmetische Mittel der Rz-Werte ist im Kalibrierschein als Rz_0 anzugeben und bei der Messunsicherheitsbetrachtung gemäß Kapitel 6 zu berücksichtigen.

5 Kalibrierung

5.1 Kalibrierfähigkeit

Zur Ermittlung der Kalibrierfähigkeit sind die Normale auf geeignete Art und Weise zu reinigen (z. B. mit einem in Isopropanol getränkten fusselfreien Tuch oder Wattestäbchen).

Zur schnellen und kostengünstigen Beurteilung der Kalibrierfähigkeit empfiehlt sich eine visuelle Begutachtung. Dabei wird zwischen Glasnormalen und metallischen Normalen unterschieden.

5.1.1 Glasnormale

Die Glasnormale sind auf Kratzer, Gebrauchsspuren und Ausbrüche zu untersuchen. Dazu hat sich eine 10-fache Vergrößerung (z. B. Lupe) bewährt, womit alle messtechnisch relevanten Beschädigungen erkannt werden können.

Im Bereich der Messfläche dürfen nicht mehr als 2 kritische bzw. 4 leichte Beschädigungen vorhanden sein. Ansonsten ist das Normal als nicht kalibrierfähig einzustufen. Unter kritischen Beschädigungen sind Ausbrüche bzw. tiefe oder lange Kratzer zu verstehen, die das Messergebnis wesentlich beeinflussen (z. B. Kratzer, die diagonal über die Messfläche verlaufen).

Unter leichten Beschädigungen sind solche zu verstehen, die sich durch geringfügige Variation des Messstellenplanes nicht mehr auf das Messergebnis auswirken.

5.1.2 Metallische Normale

Die Gebrauchsspuren und Fertigungsdefekte metallischer Normale müssen in ihrer Auswirkung auf die Kalibrierfähigkeit bewertet werden. Dazu eignet sich eine visuelle Begutachtung mit ca. 10-facher Vergrößerung. Unter schrägem Lichteinfall werden die Gesamtstruktur und alle Kratzer erkannt, unter senkrechtem Lichteinfall nur noch die für die Kalibrierfähigkeit kritischen Kratzer. Außerhalb der Messrichtung verlaufende kritische Kratzer schränken die zugelassene Messfläche ein. Wird die nutzbare Messfläche dadurch zu klein, ist das Normal als nicht kalibrierfähig einzustufen.

In Messrichtung liegend, führen mehr als 8 kritische Kratzer zur Einschränkung der zugelassenen Messfläche. Bei gleichmäßiger Verteilung dieser Kratzer über die Messfläche wird das Normal als nicht kalibrierfähig eingestuft.

5.2 Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung erfolgt nach dem Tastschnittverfahren gemäß DIN ISO 3274 bzw. DIN 4772 mittels Geräten mit Bezugsflächentastsystem. Tiefeneinstellnormale können auch interferenzoptisch gemäß VDI/VDE 2604 kalibriert werden.

5.3 Kalibrierumfang / Durchführung der Kalibrierung

5.3.1 Kalibrierung mit dem Tastschnittverfahren

Die Normale sollten bestmöglich für den Gesamtumfang der Kalibrierung mechanisch ausgerichtet werden. Die Abweichung der Ausrichtung, gemessen um den elektrischen Nullpunkt, muss kleiner als 10 % des nominellen Messbereiches des Tasters sein. Bei der Kalibrierung ist darauf zu achten, dass der kleinstmögliche Messbereich des Tastschnittgerätes gewählt wird. Für Pt-Messungen gelten die in Kap. 5.3.1.1 aufgeführten gesonderten Bedingungen.

Die minimale Anzahl der zu erfassenden Tastschnitte richtet sich nach dem Typ des zu kalibrierenden Normals und ist Tabelle 1 zu entnehmen:

Typ gemäß ISO 5436-1:	Anzahl der Tastschnitte
A	5
C	12
D	12
E	3

Tabelle 1: Mindestanzahl der Tastschnitte

Die Verteilung der Tastschnitte erfolgt nach einem Messstellenplan, der im Kalibrierschein zu dokumentieren ist. Dieser ist abhängig von der Art des zu kalibrierenden Normals. Dabei wird unterschieden zwischen:

➤ Typ A (Tiefeneinstellnormale)

Zur Kalibrierung sind ca. 75 % der Rillenlänge auszunutzen, wobei die Tastschnitte symmetrisch in gleichbleibendem Abstand in y-Richtung über die Rillenlänge zu verteilen sind.

➤ Typ C (Geometriernormale)

Die Tastschnitte sind über die gesamte Messfläche gleichmäßig zu verteilen, wobei jeweils ca. 75 % der Länge und Breite der Messfläche auszunutzen sind.

➤ Typ D (Raunormale)

– Typ D1

Die Tastschnitte sind über die gesamte Messfläche gleichmäßig zu verteilen, wobei jeweils ca. 75 % der Länge und Breite der Messfläche auszunutzen sind. Im besonderen Fall der PTB-Raunormale für die Grenzwellenlänge 0,8 mm hat sich der in Bild 1 abgebildete Messstellenplan bewährt.

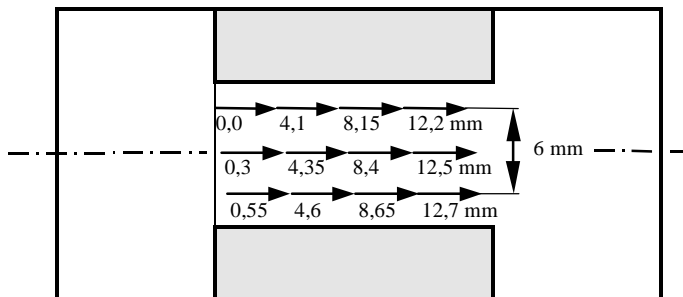


Bild 1: PTB-Messstellenplan für Grenzwellenlänge 0,8 mm

– Typ D2

Die 12 Tastschnitte sind gleichmäßig auf der Messfläche zu verteilen.

➤ Typ E (Kugel)

Es sind 3 Tastschnitte über den Zenit der Kugel durchzuführen.

5.3.1.1 Tiefeneinstellnormal

Zur Kalibrierung von Tiefeneinstellnormalen können zwei verschiedene Auswerteverfahren angewandt werden:

- Regressionsverfahren nach ISO 5436-1
- Bestimmung von Pt nach DIN EN ISO 4287

Mit dem Regressionsverfahren nach ISO 5436-1 wird das Maß der Tiefe von Tiefeneinstellnormalen mit der besten Reproduzierbarkeit und der kleinsten Messunsicherheit weitergegeben.

Bei der Kalibrierung nach dem Verfahren b) sind wesentlich höhere Anforderungen an die Profilausrichtung zu stellen als beim Regressionsverfahren. Der Ausrichtefehler darf hierbei 50 % der Messunsicherheit des Normalen, jedoch 20 nm nicht überschreiten. Die Tastlänge ist so zu wählen, dass sie ca. das 3-fache der Rillenbreite beträgt, wobei sich die Rille in der Mitte der Taststrecke befinden muss. Wird eine Tiefpassfilterung angewendet, dann hat sich ein λ_s von 8 μm bewährt.

5.3.1.2 Raunormale

Die Messbedingungen sind gemäß DIN EN ISO 4288 / DIN EN ISO 3274 zu wählen. Abweichungen von diesen Regelungen sind nur in begründeten Ausnahmefällen zulässig. Außerdem muss auf diese Abweichungen im Kalibrierschein gesondert hingewiesen werden.

5.3.2 Bewertung der Messergebnisse

Aus den durchgeführten Messungen ist ein Mittelwert zu bilden, der als Ergebnis im Kalibrierschein anzugeben ist. Des Weiteren ist die Standardunsicherheit der Messwerte zu ermitteln und bei der Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets gemäß Kapitel 6 zu berücksichtigen.

Die Einzelwerte sind auf Fehlmessungen und Normalbeschädigungen zu untersuchen. Es darf maximal ein Ausreißer durch den Messwert einer Kontrollmessung ersetzt werden. Sollten noch weitere Ausreißer entdeckt werden, so ist die zugelassene Messfläche einzuschränken oder die Messwerte sind bei der Ermittlung des Kalibrierergebnisses zu berücksichtigen.

6 Messunsicherheit

Für ein Tastschnittgerät nach DIN EN ISO 3274 wird ein Modell aufgestellt, nach dem aus dem ertasteten Profil $z_e(x)$ über eine Kette von Funktionen die Werte für die Oberflächenkenngrößen bestimmt werden. Für die Berechnung der Messunsicherheit entsprechend GUM wird von innen nach außen berechnet, wie sich die Unsicherheit der Eingangsgrößen auf die Unsicherheit des Ergebniswertes nach Anwenden der betreffenden Funktion auswirkt. Das Ergebnis ist dann die Eingangsgröße für die Unsicherheitsberechnung der nächsten Funktion.

In Anhang A ist ein ausführliches Beispiel für die Berechnung der Messunsicherheit von Raunormalen dargestellt. Darauf aufbauend wird in den Anhängen B, C und D die Messunsicherheit für ein Tiefeneinstellnormal unter verschiedenen Modellannahmen berechnet.

Wert K der Oberflächen-Kenngröße P : $K = P\{Fc[Fs(G(z_e(x)))]\}$

Erläuterung:

Gerätefunktion : $G(z_e(x)) = z_g(x)$ durch Gerätefunktion beeinflusste Daten (Gesamtprofil)

λ_s -Filter: $Fs(z_g(x)) = z_s(x)$ λ_s -beeinflusste Daten (Primärprofil)

λ_c -Filter: $Fc(z_s(x)) = z_c(x)$ λ_c -beeinflusste Daten (Rauheitsprofil)

Kennwertfunktion: $P(z_c(x)) = K$ Kennwertfunktion P berechnet den Wert K der Oberflächenkenngröße P

Die Funktionen von innen nach außen:

6.1 Gerätefunktion

$$z_g(x) = C \cdot \{z_e(x) + z_{ref}(x) + z_0(x) + z_{pl}(x) + z_{sp}(x)\} = C \cdot z_u(x)$$

Die Punkte des Gesamtprofils $z_g(x)$ enthalten die Einflüsse des Normalen, des Gerätes und der Wechselwirkung zwischen beiden und die Auswirkung der Umgebungseinflüsse.

Es bedeuten:

C	Kalibrierfaktor
z_g	Gesamtprofil
z_e	ertastetes Profil
z_{ref}	Profil der Referenzebene
z_0	Grundrauschen des Gerätes
z_{pl}	Plastische Verformung der Oberfläche
z_{sp}	Profiländerung durch Tastspitzengeometrie
z_u	unkorrigierte Profildaten

Für die Unsicherheit $u^2(z_g)$ ergibt sich wie im Anhang A hergeleitet,

$$\begin{aligned}
 u^2(z_g) = & \\
 & u^2(Pt_n) \quad \text{Unsicherheit des Bezugsnormals (Tiefeneinstellnormal)} \\
 & + u^2(\Delta Pt) \quad \text{Unsicherheit der Maßübertragung vom Bezugsnormal} \\
 & + u^2(b) \quad \text{Wiederholpräzision der Antastung des Bezugsnormals} \\
 & + u^2(z_e) \quad \text{Unsicherheit des ertasteten Profils durch Streuung auf dem Normal} \\
 & + u^2(z_{\text{ref}}) \quad \text{Unsicherheit des Referenzprofils} \\
 & + u^2(z_0) \quad \text{Unsicherheit durch Grundrauschen des Gerätes} \\
 & + u^2(z_{\text{pl}}) \quad \text{Unsicherheit durch nicht genaue Kenntnis der plastischen Verformung} \\
 & + u^2(z_{\text{sp}}) \quad \text{Unsicherheit durch nicht genaue Kenntnis der Tastspitzengeometrie}
 \end{aligned}$$

Zahlenwerte für diese Eingangsgrößen lassen sich durch gezieltes Messen bestimmen oder mit Erfahrungswerten belegen. Sie wirken sich je nach Kenngröße oder Normaltyp aus, so dass sich unterschiedliche Zusammenstellungen ergeben, für die im Anhang einige Beispiele gegeben werden.

6.2 λ_s -Filter

Für die Messpunkte des Primärprofils gilt $z_s = Fs(z_g) = C \cdot Fs(z_u)$, für deren Unsicherheit nach /1/:

$$u^2(z_s) = u^2(C) \cdot Pt_n^2 + f_s^2 \cdot u^2(z_u).$$

$$f_s = \sqrt{\frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_s \cdot \sqrt{2}}} \quad \text{bei idealem Filter, } \Delta x = \text{Messpunktabstand, } \alpha = \sqrt{\frac{\log 2}{\pi}} = 0,4697$$

λ_s = Grenzwellenlänge des kurzwelligen Tiefpassfilters

λ_s [μm]	Δx [μm]	f_s
2,5	0,5	0,55
8	1,5	0,53
8	0,5	0,31

Bei den Werten, die für λ_s und die Taststrecken, die in der DIN EN ISO 4287 vorgeschrieben sind, ist die Wirkung des kurzwelligen Filters also etwa gleich und verringert die Unsicherheit der Profilpunkte des gefilterten Profils ungefähr um die Hälfte.

6.3 λ_c -Filter

Nach der Filterung mit λ_c gilt für die Punkte des Welligkeitsprofils

$$u(w) = \sqrt{\frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_c \cdot \sqrt{2}}} \cdot u(z_s) = f_c \cdot u(z_s) \quad \text{bei idealem Filter.}$$

λ_c [μm]	Δx [μm]	f_c
250	0,5	0,055
800	0,5	0,031
2500	1,5	0,017

Für die Punkte des Rauheitsprofils gilt $z_c = z_s - w$,

für die Unsicherheit. $u^2(z_c) = u^2(z_s) - (2 \cdot \sqrt{2} - 1) \cdot u^2(w) \cong u^2(z_s) \quad /1/$

Wegen des kleinen Wertes für f_c ist die Unsicherheit $u^2(z_c)$ der Punkte des Rauheitsprofils praktisch gleich der Unsicherheit $u^2(z_s)$ der Punkte des λ_s - gefilterten Profils.

6.4 Kennwertfunktion

Die Unsicherheit $u_{\text{sys}}(K)$ eines Kennwertes hängt je nach seinem Algorithmus sehr unterschiedlich mit der Unsicherheit der Messpunkte des Rauheitsprofils zusammen. Bei der Berechnung der Unsicherheit ist zu berücksichtigen, dass durch die Filterung mit λ_c und λ_s die Daten des Welligkeitsprofils w bzw. des Rauheitsprofils z_c korreliert sind.

Das Ergebnis ist die systematische Unsicherheit des Kennwertes $u_{\text{sys}}(K)$.

6.5 Unbekannte systematische Abweichungen

In der Messkette können unbekannt systematische Abweichungen auftreten durch:

- Offengelassene Festlegungen in den Algorithmen der Kenngrößen in der DIN EN ISO 4287
- Zugelassene Abweichungen in den Filtern in der DIN EN ISO 11562, z. B. durch Näherungen in den Filteralgorithmen
- Unsicherheit durch Linearitätsabweichungen des Wandlers, Bandbreitenbeschränkung des Verstärkers, Auflösung des A/D Wandlers
- Abweichungen der Tastspitze von der Nennform
- Unsicherheit des Messpunktes in Vorschubrichtung

Daher müssen für die Unsicherheitsberechnung bei den Funktionen unbekannt systematische Abweichungen berücksichtigt werden. Durch Software-Normale entsprechend DIN EN ISO 5436-2 können diese Abweichungen genauer lokalisiert werden. Für die messtechnische Praxis werden diese Unsicherheiten durch Vergleichsmessungen, z. B. in Ringvergleichen, an verkörperten Normalen nach DIN EN ISO 5436-1 mit möglichst unterschiedlichen Geräten und unterschiedlichen Realisierungen der Algorithmen herausgefunden. Diese Unsicherheiten $u_v(K)$ sind in einer Tabelle abgelegt, die statistisch abgesicherte Vergleichsergebnisse in Abhängigkeit von Kenngröße, Normaltyp und Messbereich enthält. Diese werden quadratisch zu der systematischen Unsicherheit addiert.

Die erweiterte Messunsicherheit des Kennwertes K (Überdeckungswahrscheinlichkeit = 95%) ist

$$U(K) = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{sys}}^2(K) + u_v^2(K)}$$

In dem Modell sind folgende Einflussgrößen, die sich grundsätzlich auswirken könnten, nicht berücksichtigt, da sie innerhalb üblicher Labor-Umgebungsbedingungen entweder vernachlässigbaren Einfluss haben oder im Modell indirekt durch die Art der Nutzung berücksichtigt sind: Temperatur von Normal und Gerät, Drift des Normal, Luftdruck, -temperatur und -feuchte.

7 Dokumentation der Messergebnisse

Die ermittelten Messergebnisse für die Rauheitskenngrößen sind im Kalibrierschein zu dokumentieren. Die Dokumentation umfasst die errechneten Mittelwerte mit der jeweils zugehörigen erweiterten Messunsicherheit, der Standardunsicherheit, sowie den minimalen und maximalen Messwerten. Eine Aufzeichnung des Primärprofils ist Bestandteil des Kalibrierscheins oder als Anlage beizufügen. Die Vorgaben von DKD-5 sind einzuhalten.

Der Einfluss der Umgebungsbedingungen ist mit dem Rz -Wert der Grundstörungsmessungen (Rz_0) anzugeben (siehe Kapitel 4).

8 Verwendete Begriffe und Abkürzungen

C	Kalibrierfaktor
$z_e(x)$	ertastetes Profil
$z_{\text{ref}}(x)$	Profil der Referenzebene
$z_0(x)$	Grundrauschen des Gerätes
$z_{\text{pl}}(x)$	Plastische Verformung der Oberfläche
$z_{\text{sp}}(x)$	Profiländerung durch Tastspitzenabweichung
$z_g(x) = G(z_e(x))$	durch Gerätefunktion beeinflusste Daten (Gesamtprofil)
$z_s(x) = F_s(z_g(x))$	λ_s -beeinflusste Daten (Primärprofil)
$z_c(x) = F_c(z_s(x))$	λ_c -beeinflusste Daten (Rauheitsprofil)
$z_u(x)$	unkorrigierte Profildaten
$P(z_c(x))$	Kennwertfunktion = Rechenvorschrift zur Bestimmung eines Kennwertes P
K	Wert eines Kennwertes P
λ_s	Grenzwellenlänge des kurzwelligen Tiefpassfilters
Δx	Messpunktabstand
λ_c	Grenzwellenlänge des langwelligen Tiefpassfilters
f_s	Filterfaktor als Funktion von $\lambda_s/\Delta x$
f_c	Filterfaktor als Funktion von $\lambda_c/\Delta x$
u_{sys}	Systematische Unsicherheitskomponente
u_v	Unbekannte Unsicherheitskomponente, durch Vergleichsmessungen belegt
u_n	Unsicherheit des Tiefeneinstellnormals (Bezugsnormal)
Pt_n	Profiltiefe (entsprechend DIN EN ISO 4287) des Bezugsnormals
D_n	Rillentiefe (entsprechend DIN EN ISO 5436) des Bezugsnormals
G	Gradient in der Tiefe des Bezugsnormals
Pt_m	Profiltiefe (entsprechend DIN EN ISO 4287) des zu messenden Normals
D_m	Rillentiefe (entsprechend DIN EN ISO 5436) des zu messenden Normals
r_t	Tastspitzenradius
A	Ausrichtabweichung
Pt_r	Rauschen im Bereich der Referenzlinienabschnitte
Rz_0	Gemittelte Rautiefe gemessen auf einem Planglas unter den Messbedingungen des Messobjektes
z_h	oberster Profilpunkt
z_l	unterster Profilpunkt

9 Zitierte Normen und weitere Unterlagen

Lit.-Stelle bzw. Norm (Ausgabe)	Titel
DIN 1319-3	Grundbegriffe der Meßtechnik; Begriffe für die Meßunsicherheit und für die Beurteilung von Meßgeräten und Meßeinrichtungen
DIN 1319-4	Grundbegriffe der Meßtechnik; Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen
DIN 4768 (1974) (ersetzt)	Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten Begriffe, Meßbedingungen Beiblatt 1 (1978) Umrechnung der Meßgröße R_a in R_z und umgekehrt
DIN 4768 (1990) (ersetzt)	Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten Begriffe, Meßbedingungen Beiblatt 1 (1978) Umrechnung der Meßgröße R_a in R_z und umgekehrt
DIN V 32950 (04.97) ISO/TR 14638	Geometrische Produktspezifikation (GPS) Übersicht
DIN EN ISO 3274 (04.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten
DIN EN ISO 4287 (10.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
DIN EN ISO 4288 (04.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
DIN EN ISO 5436-1	Oberflächenbeschaffenheit: Normale Teil 1 Maßverkörperungen
DIN EN ISO 5436-2	Oberflächenbeschaffenheit: Normale Teil 2 Software-Normale
DIN EN ISO 11562 (09.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern
DIN EN ISO 12085 (05.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Motifkenngrößen
DIN EN ISO 12179 (Entwurf 07.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Kalibrierung von Tastschnittgeräten

Lit.-Stelle bzw. Norm (Ausgabe)	Titel
DIN EN ISO 13565-1 (04.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften Teil 1: Filterung und allgemeine Meßbedingungen
DIN EN ISO 13565-2 (04.98)	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve
DKD-3 (1998)	Ermittlung von Meßunsicherheiten
DKD-5 (1999)	Anleitung zum Erstellen eines DKD-Kalibrierscheines
DKD-R 4-2 Blatt 2	Richtlinie zum Kalibrieren von Tastschnittgeräten im Deutschen Kalibrierdienst (DKD)
DIN EN 13005	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
/1/	M. Krystek: Einfluss des Wellenfilters auf die Unsicherheit eines Messergebnisses bei Rauheitsmessungen. Tagungsband der DIN- Tagung „GPS 99“, 5.-67.-Mai 1999, Mainz, S. 4-1 – 4-11. Beuth-Verlag, ISBN 3-410-14534-6

Anhang A: Messunsicherheit beim Kalibrieren von Raunormalen

1 Einleitung

Für ein Tastschnittgerät nach DIN EN ISO 3274 wird ein Modell aufgestellt, nach dem aus dem ertasteten Profil $z_e(x)$ über eine Kette von Funktionen die Werte für die Oberflächenkenngrößen bestimmt werden. Für die Berechnung der Messunsicherheit entsprechend GUM wird von innen nach außen berechnet, wie sich die Unsicherheit der Eingangsgrößen auf die Unsicherheit des Ergebniswertes nach Anwenden der betreffenden Funktion auswirkt. Das Ergebnis ist dann die Eingangsgröße für die Unsicherheitsberechnung der nächsten Funktion.

Wert K der Oberflächen-Kenngröße P : $K = P\{Fc[Fs(G(z_e(x)))]\}$

Funktion	Wirkung	Ergebnis
Gerätekfunktion :	$G(z_e(x))= z_g(x)$	durch Gerätekfunktion beeinflusste Daten (Gesamtprofil)
λ_s -Filterfunktion	$Fs(z_g(x))= z_s(x)$	λ_s -beeinflusste Daten (Primärprofil)
λ_c -Filterfunktion	$Fc(z_s(x))= z_c(x)$	λ_c -beeinflusste Daten (Rauheitsprofil)
Kennwertfunktion:	$P(z_c(x))= K$	Kennwertfunktion P berechnet den Wert K der Oberflächenkenngröße P

In dieser Reihenfolge werden die Funktionen im Folgenden behandelt.

2 Gerätefunktion G

2.1 Beschreibung des Modells

Die Daten des ertasteten Profils $z_e(x)$ werden mit einem Kalibrierfaktor C multipliziert, der sich aus der Kalibrierung des Gerätes mit einem kalibrierten Tiefeneinstellnormal (Bezugsnormal) entsprechend DIN EN ISO 5436-1 ergibt (Anhang A Bild 1).

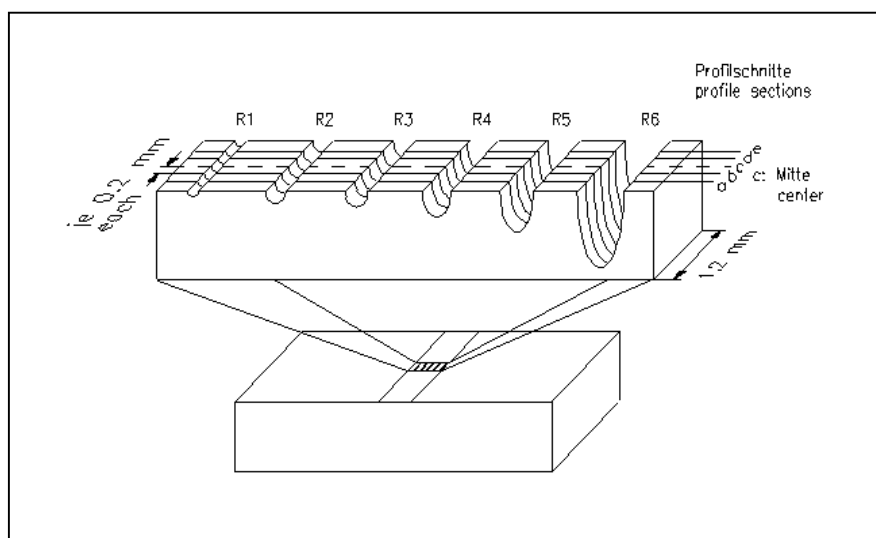


Bild 1: Tiefeneinstellnormal nach DIN EN ISO 5436-1 mit 6 Rillen und Plan der kalibrierten Stellen

Das Gesamtprofil $z_g(x)$ enthält neben dem ertasteten Profil $z_e(x)$ (Begriff entsprechend DIN EN ISO 3274) Einflüsse, die aus dem Gerät, seiner Wechselwirkung mit dem Messobjekt und aus der Umgebung stammen. Die Werte des Gesamtprofils $z_g(x)$ sind die Eingangsdaten für die weitere Signalverarbeitung. Es ergibt sich folgendes Modell:

$$z_g(x) = C \cdot [z_e(x) + z_{ref}(x) + z_0(x) + z_{pl}(x) + z_{sp}(x)] = C \cdot z_u \quad (1)$$

Es bedeuten:

C	Kalibrierfaktor
z_e	ertastetes Profil
z_g	Gesamtprofil
z_{ref}	Profil der Referenzebene
z_0	Grundrauschen des Gerätes
z_{pl}	Plastische Verformung der Oberfläche
z_{sp}	Profiländerung durch Tastspitzenabweichung
z_u	unkorrigierte Profildaten

Für die Unsicherheit der Profilkpunkte ergibt sich nach der Produktregel der Differentialrechnung

$$u^2(z_g) = u^2(C) \cdot z_u^2 + u^2(z_u) \cdot C^2 \quad (2)$$

2.2 Kalibrierfaktor

2.2.1 Modell für Kalibrierfaktor

Der Kalibrierfaktor C wird aus der gemessenen Tiefe Pt_m bzw. D_m und der aus dem Kalibrierschein des Tiefeneinstellnormals bekannten Tiefe Pt_n bzw. D_n bestimmt. Es gilt das Modell

$$C = \frac{Pt_n}{Pt_m} \text{ bzw. } C = \frac{D_n}{D_m}$$

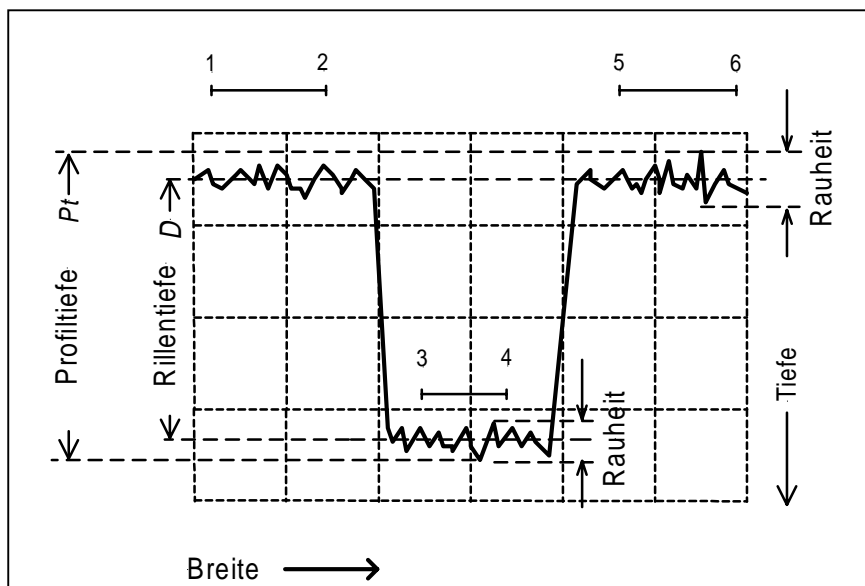


Bild 2: Profilauswertung an einem Tiefeneinstellnormal Typ A1 (DIN EN ISO 5436 und DIN EN ISO 4287).

1-2, 5-6: Profillinienabschnitte auf der Referenzebene, 3-4 Profillinienabschnitt im Rillengrund

Die Größen im Zähler und Nenner sind jede für sich wieder unsicher, so dass

$$u^2(C) = \frac{1}{Pt_m^4} \cdot [Pt_n^2 \cdot u^2(Pt_m) + Pt_m^2 \cdot u^2(Pt_n)] \text{ ist.} \quad (3)$$

Da bei einem kalibrierten Gerät $Pt_m \approx Pt_n$ ist ($C = 1$), wird

$$u^2(C) = \frac{1}{Pt_m^2} \cdot [u^2(Pt_m) + u^2(Pt_n)].$$

Der erste Summand in Gl. 2 ist dann

$$u^2(C) \cdot z_u^2 = \frac{z_u^2}{Pt_m^2} \cdot [u^2(Pt_m) + u^2(Pt_n)].$$

Hier wird deutlich, wie sich eine zu kleine Kalibrierrille auf die Unsicherheit der Kalibrierung auswirkt. Die Tiefe Pt_m des Bezugsnormals wird üblicherweise von der gleichen Größe wie der Erwartungswert z_u der unkorrigierten Profilpunkte gewählt. Daher wird der Quotient

$$\frac{z_u^2}{Pt_m^2} = 1 \text{ gesetzt und der erste Summand aus Gl. 2 wird}$$

$$u^2(C) \cdot z_u^2 = u^2(Pt_m) + u^2(Pt_n). \text{ Damit ist Gl. 2 umgeformt zu}$$

$$u^2(z_g) = u^2(Pt_m) + u^2(Pt_n) + u^2(z_u) \quad (4)$$

$u^2(Pt_n)$ lässt sich aus dem Kalibrierschein des Tiefeneinstellnormals entnehmen.

2.2.2 Modell für Pt_m

Bei der Messung der Profiltiefe Pt_m wird nicht genau der Ort getroffen, an dem die Rille kalibriert wurde. Die gemessene Profiltiefe Pt_m enthält neben Pt_n einen in y-Richtung ortsabhängigen Teil ΔPt (Anhang A Bild 3) und eine Komponente b , die die Wiederholpräzision des Antastvorganges beschreibt.

$$Pt_m = Pt_n + \Delta Pt + b$$

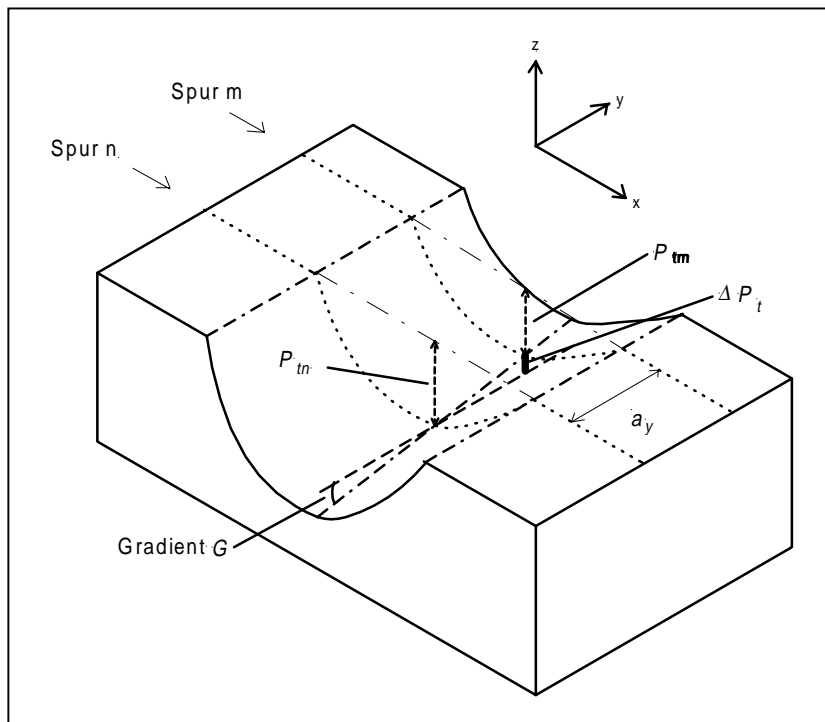


Bild 3: Unsicherheit bei der Weitergabe des Tiefenmaßes:

Spur n: Spur beim Kalibrieren der Rille,

Spur m: Spur bei der Weitergabe,

$a_y = y_n - y_m$: Abweichung der Spurpositionierung,

$\Delta Pt = Pt_n - Pt_m$: Abweichung in der Tiefenbestimmung

Die Unsicherheit von Pt_m ist

$$u^2(Pt_m) = u^2(\Delta Pt) + u^2(b).$$

$u^2(b)$: Wiederholpräzision des Antastvorganges an der Kalibrierrille.

2.3 Unsicherheit des Gesamtprofils

Für die Unsicherheit $u^2(z_g)$ der Messpunkte des Gesamtprofils ergibt sich

$$u^2(z_g) =$$

$$u^2(Pt_n), \text{ Unsicherheit des Bezugsnormals (Tiefeneinstellnormal)} \quad (5.1)$$

$$+ u^2(\Delta Pt), \text{ Unsicherheit der Maßübertragung vom Bezugsnormal} \quad (5.2)$$

$$+ u^2(b), \text{ Wiederholpräzision der Antastung des Bezugsnormals} \quad (5.3)$$

$$+ u^2(z_e), \text{ Unsicherheit des ertasteten Profils durch Streuung auf dem Normal} \quad (5.4)$$

$$+ u^2(z_{ref}), \text{ Unsicherheit des Referenzprofils} \quad (5.5)$$

$$+ u^2(z_0), \text{ Unsicherheit durch Grundrauschen des Gerätes} \quad (5.6)$$

$$+ u^2(z_{pl}), \text{ Unsicherheit durch nicht genaue Kenntnis der plastischen Verformung} \quad (5.7)$$

$$+ u^2(z_{sp}), \text{ Unsicherheit durch nicht genaue Kenntnis der Tastspitzengeometrie} \quad (5.8)$$

Im Kapitel 3 werden für diese acht Eingangsgrößen Zahlenwerte bzw. Gleichungen für deren Berechnung genannt und deren statistische Eigenschaften beschrieben. Da diese Eingangsgrößen sich je nach zu berechnendem Kennwert und Typ des Normalen unterschiedlich auswirken, werden je nach Fall die zutreffenden Eingangsgrößen zusammengestellt und die Gesamtmessunsicherheit bestimmt. Ein Beispiel für den Fall ohne λ_s ist in der Tabelle in Kap. 7.1 angegeben, für die Filterung mit λ_s in Kap. 7.2.

3 Bestimmung der Unsicherheit der Eingangsgrößen

3.1 Bezugsnormal (Tiefeneinstellnormal)

Die Messunsicherheit (U_n) der Profiltiefe Pt_n des Bezugsnormals ist im Kalibrierschein mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ angegeben. Dieser Wert ist eine statistisch abgesicherte Größe. Daher ist die empirische Standardunsicherheit:

$$u^2(Pt_n) = \frac{1}{4} \cdot U_n^2.$$

Typische Werte sind $U_n = 10$ nm (bei einer Rillentiefe von 250 nm) bis $U_n = 50$ nm (bei einer Rillentiefe von 10 μ m).

3.2 Messort

Die Bestimmung der Rillentiefe bei der Kalibrierung des Gerätes geschieht nicht unbedingt an der gleichen Stelle wie bei der Kalibrierung der Rille. Aufgrund eines Gradienten in Rillenrichtung $G = \partial Pt / \partial y$ führt eine ortsabhängige Unsicherheit in y-Richtung zu einer Unsicherheit in der Tiefenmessung (Anhang A Bild 3). Innerhalb von $2a_y$ ist jeder Ort gleich wahrscheinlich.

$$u^2(\Delta Pt) = \frac{1}{3} \cdot (a_y \cdot G)^2$$

Der Gradient G hat je nach Tiefe und Qualität der Rille Werte zwischen 10 nm/mm und 40 nm/mm.

3.3 Wiederholpräzision der Antastung bei der Kalibrierung

Die Unsicherheit durch die Wiederholpräzision des Antastvorganges beim Kalibrieren wird durch die Standardunsicherheit des Mittelwertes von Pt_m aus m_w Messungen bei der Tiefenbestimmung der Kalibrierrille, also $\frac{1}{\sqrt{m_w}} s(Pt_m)$ an der nominell gleichen Stelle beschrieben.

$$u^2(b) = \frac{1}{m_w} s^2(Pt_m) = s^2(\overline{Pt_m})$$

Es wird eine Gaußverteilung der Unsicherheit angenommen. Ein typisches $m_w = 5$ ist für eine Gaußverteilung zwar etwas klein, aufgrund des kleinen Wertes von $s(Pt_m)$ bleibt aber der effektive Freiheitsgrad der Gesamt-Unsicherheit genügend groß.

3.4 Topografie des Normalen

Das Normal hat trotz seiner gleichmäßigen Struktur in y-Richtung (Anhang A Bild 4) noch eine statistische Natur.

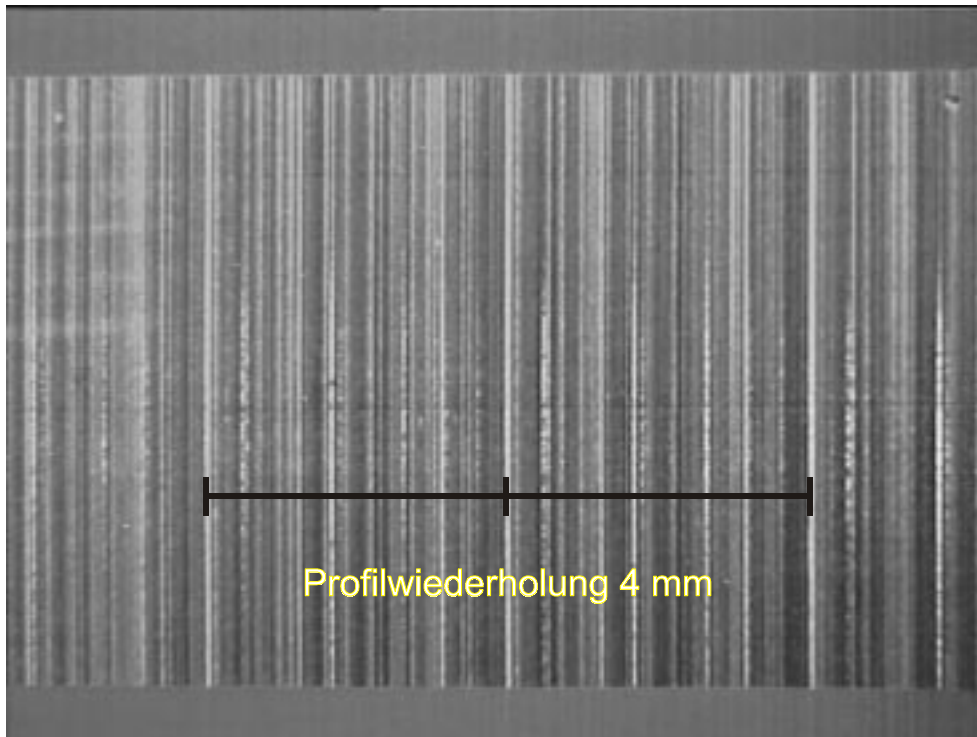


Bild 4: Raunormal mit Profilwiederholung Typ D1, DIN EN ISO 5436-1

Dies äußert sich in einer statistischen Schwankung der gemessenen Kenngrößen in Abhängigkeit von x und y . Das wird bei den Raunormalen durch den Messstellenplan (Anhang A Bild 5) mit räumlich in x - und y -Richtung versetzten Messungen berücksichtigt.

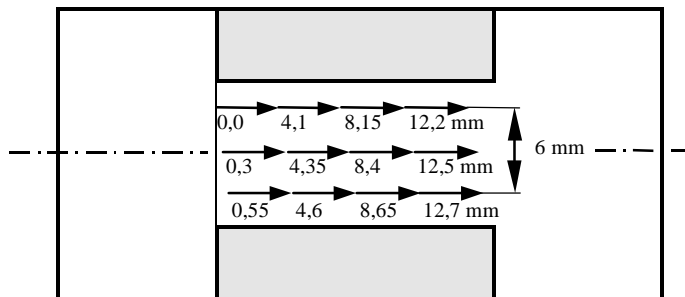


Bild 5: Messstellenplan für Raunormal (Typ D1, DIN EN ISO 5436-1)

Für die Anzahl der Profilschnitte wird $n = 12$ genommen. Für die Ergebnisse wird eine Gaußverteilung angenommen.

Bei vielen Auswertungen wird bereits häufig die Standardunsicherheit der Einzelwerte der Kenngrößen ausgegeben. Die Standardabweichung des Mittelwertes $\frac{s(R_z)}{\sqrt{n}}$ kann als Schätz-

wert für die Unsicherheit des Wertes von R_z genommen werden. Um zu der hier benötigten Unsicherheit der Profilmittelwerte zu kommen, muss berücksichtigt werden, dass durch den mittelnden Algorithmus von R_z die Unsicherheit von R_z um dessen „Glättungsfaktor“ S kleiner ist als die Unsicherheit der Profilmittelwerte. Dies wird in Kap. 6 veranschaulicht.

Für die Unsicherheitskomponente Gl. 5.4 des Gesamtprofils ergibt sich

$$u^2(z_e) = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot s^2(Rz).$$

3.5 Führungsabweichung

Der Summand nach Gleichung 5.5 enthält die Unsicherheitseinflüsse durch Führungsabweichungen von der Geraden. Die Anteile der langwelligen Abweichungen werden in diesem Kapitel, die der kurzwelligen in Kapitel 3.6 behandelt.

Die langwelligen Teile der Führungsabweichungen werden im W-Profil durch die Kenngröße Wt erfasst, ebenso Driften während der Messzeit. Es wird eine Messstrecke auf einem Planglas mit dem Teil der Vorschubeinheit gemessen, der auch für die spätere Oberflächennmessung benutzt wird. Es muss mechanisch bestmöglich ausgerichtet werden. Die Messungen werden fünf Mal an gleicher Stelle des Normalen und der Führung wiederholt. Der Mittelwert Wt_0 aus fünf Messungen, ermittelt mit $\lambda_c = 0,8$ mm, wird weiter verwendet. Unter der Annahme einer Rechteckverteilung gilt:

$$u^2(z_{ref}) = \frac{1}{3} \left(\frac{Wt_0}{2} \right)^2.$$

3.6 Grundrauschen

Beim Messen eines Profils überlagert sich das Grundrauschen, das von der Führung, von elektrischen und mechanischen Einflussgrößen verursacht wird, unmittelbar dem Messprofil. Diese Wirkung wird isoliert gemessen, wenn das Rauschen Rz_0 auf einem guten Planglas gemessen wird. Erfahrungsgemäß lässt sich auf guten Plangläsern mit guten Tastschnittgeräten ein Rz_0 unter 10 nm erreichen. Durch eine Mittelung mehrerer dieser Profilschnitte wird der zeitliche Verlauf der Grundstörungen mit erfasst. Daher wird zur Bestimmung des Summanden in Gleichung 5.6 das R-Profil der Planglasmessung ausgewertet. Dabei ist darauf zu achten, dass sich diese Messung auf den Teil der Vorschubeinheit erstreckt, der später bei der Durchführung des Messstellenplanes auf dem Normal benutzt wird. Der Mittelwert aus fünf Messungen $\overline{Rz_0}$ wird weiterverwendet. Um zur Unsicherheit der Profilpunkte zu gelangen, muss wieder der „Glättungsfaktor“ des Rz-Algorithmus berücksichtigt werden. Unter Annahme einer rechteckverteilten Größe gilt:

$$u^2(z_0) = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{12} \cdot \left(\overline{Rz_0} \right)^2.$$

3.7 Plastische Verformung

Beim Abtasten tritt in Abhängigkeit von Werkstoff, Antastkraft und Tastspitzenradius eine plastische Verformung der Oberfläche ein. Solange die Verformung beim Kalibriervorgang und beim späteren Messvorgang die selbe ist, wäre sie vernachlässigbar. Durch nicht genaue Wiederholung des Antastortes und dessen örtlicher Oberflächenbedingungen (Härte, bereits vorhandene Spur, etc.) ist die ungenaue Kenntnis der plastischen Verformung als Unsicherheitskomponente für das Profil einzubeziehen.

Erfahrungen mit den üblichen Messbedingungen (Tastspitzenradius = 2 µm, Tastkraft = 0,7 mN, Härte des Normalen = 450 HV) haben plastische Verformungen zwischen den Grenzwerten

von 10 nm bis 20 nm, also eine Spanne von $2a_{pl} = 10$ nm ergeben $/2/$. Unter Annahme einer rechteckverteilten Größe gilt für den Summanden in Gl. 5.7:

$$u^2(z_{pl}) = \frac{a_{pl}^2}{3}$$

3.8 Tastspitzenradius

Der Summand in Gl. 5.8 wirkt sich bei den Normalen aus, die empfindlich gegenüber der Tastspitzengeometrie sind, also z. B. Normale vom Typ D nach DIN EN ISO 5436-1. Das ertastete Profil ist gegenüber der wahren Oberfläche durch den endlichen Tastspitzenradius verändert. Nach DIN EN ISO 3274 ist dieser Einfluss der Tastspitze mit dem Nennradius bereits Bestandteil des ertasteten Profils für die weitere Auswertung. Abweichungen von dem im Kalibrierschein angegebenen Tastspitzenradius führen zu unsicheren z-Positionen.

Die Simulation bei der Abtastung desselben Profils mit verschiedenen Tastspitzenradien ergab die in Bild 6 dargestellten Zusammenhänge. Daraus ergibt sich für R_z und R_{z1max} eine Änderung von -20 nm pro 1 μm Änderung des Tastspitzenradius, für R_a eine Abhängigkeit von -5 nm/ μm .

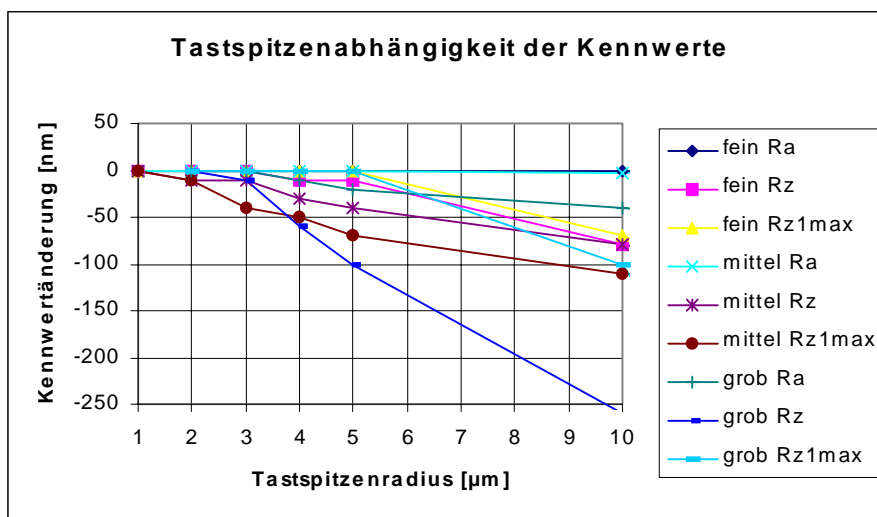


Bild 6: Abhängigkeit der Kennwerte vom Tastspitzenradius

Unter Berücksichtigung des „Glättungsfaktors“ von R_z ist also

$$\frac{\partial z}{\partial r_t} = -\frac{1}{S} \cdot \frac{20 \text{ nm}}{\mu\text{m}}$$

Die Unsicherheit des bei der Messung wirksamen Tastspitzenradius wird mit $u(r_t) = 1 \mu\text{m}$ abgeschätzt und eine Rechteckverteilung angenommen. Die Eingangsgröße r ist unsicher im Bereich $r_{\text{soll}} \pm 0,5 \mu\text{m}$

$$u^2(z_{sp}) = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{20 \text{ nm}}{\mu\text{m}} \cdot 0,5 \mu\text{m} \right)^2$$

Die Zusammenstellung der Eingangsgrößen für den bisher betrachteten Fall ohne λ_s erfolgt in der Tabelle in Kap. 7.1.

4 Kurzweiliges Tiefpassfilter für die Rauheit

In das Modell für die Punkte des Primärprofils $z_s = Fs(z_g)$ geht das Modell der z_g entsprechend Gl. 1 ein, wobei die Filterfunktion Fs sich nur auf die aktuell gemessenen Profildaten z_u auswirkt und nach /1/ als Faktor f_s ausgedrückt werden kann. Tabelle 1 enthält die Filterfaktoren für übliche Tiefpasswellenlängen λ_s , wobei $f_s^2 = \frac{\Delta x}{\alpha \cdot \lambda_s \cdot \sqrt{2}}$, Δx der Messpunktabstand

und $\alpha = \sqrt{\frac{\log 2}{\pi}} = 0,4697$ ist.

λ_s [μm]	Δx [μm]	f_s
2,5	0,5	0,55
8	1,5	0,53
8	0,5	0,31

Tabelle 1: Filterfaktoren für verschiedene Tiefpasswellenlängen

Bei den Werten, die für λ_s und die Messpunktabstände, die in DIN EN ISO 4287 vorgeschrieben sind, ist die Wirkung des kurzweiligen Filters auf die Profilpunkte also etwa gleich und verringert die Unsicherheit der Profilpunkte des gefilterten Profils ungefähr um die Hälfte. Aus $z_s = C \cdot Fs(z_u)$ wird für die Unsicherheit der z_s entsprechend der Produktregel

$$u^2(z_s) = u^2(C) \cdot Fs^2(z_u) + C^2 \cdot u^2(Fs(z_u)). \quad (5)$$

Im ersten Produkt wird $Fs^2(z_u) = Pt_n^2$ repräsentativ ersetzt und im zweiten Produkt ist $u^2(Fs(z_u)) = f_s^2 \cdot u^2(z_u)$. Damit wird Gl. 5 unter Berücksichtigung von Gl. 1 zu

$$u^2(z_s) = u^2(C) \cdot Pt_n^2 + f_s^2 \cdot u^2(z_g) \quad (6)$$

Die Zusammenstellung der Eingangsgrößen für diesen Fall erfolgt in der Tabelle 4 in Kap. 7.2.

5 Tiefpassfilter für die Welligkeit

Nach der Filterung mit λ_c gilt für die Punkte des Welligkeitsprofils

$$u(w) = \sqrt{\frac{\Delta x}{\alpha \lambda_c \sqrt{2}}} \cdot u(z_s) = f_c \cdot u(z_s) \text{ bei idealem Filter.}$$

λ_c [μm]	f_c
250	0,055
800	0,031
2500	0,017

Tabelle 2: Filterfaktoren für verschiedene Welligkeitsfilter

Für die Punkte des Rauheitsprofils gilt $z_c = z_s - w$,

für deren Unsicherheit $u^2(z_c) = u^2(z_s) - (2 \cdot \sqrt{2} - 1) \cdot u^2(w) \cong u^2(z_s)$.

Wegen des kleinen Wertes der Unsicherheit der Punkte des Welligkeitsprofils $u(w)$ ist die Unsicherheit der Punkte des Rauheitsprofils $u(z_c)$ praktisch gleich der Unsicherheit $u(z_s)$ der Punkte des λ_s - gefilterten Profils.

6 Kennwertfunktion

Von den Punkten des Rauheitsprofils $z_c(x)$ berechnet sich der Wert K des Kennwertes entsprechend dem Algorithmus des Kennwertes. Die Unsicherheit $u_{\text{sys}}(K)$ einer Kenngröße kann sich in Abhängigkeit von ihrem Algorithmus sehr stark von der Unsicherheit der Profilmunkte unterscheiden. Dies wird beschrieben durch z. B. $u_{\text{sys}}(Rz) = S(Rz) \cdot u(z_g)$, wobei $S(Rz)$ der "Glättungsfaktor" von Rz ist. Um den Einfluss des Algorithmus zu zeigen, wird im folgenden Beispiel die Auswirkung des Algorithmus von Rz berechnet, wobei zur Vereinfachung unkorrelierte Profildaten angenommen werden. Für die gemittelte Rautiefe Rz gilt:

$Rz = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 (p_i - v_i)$, wobei p_i und v_i die maximalen und minimalen Messwerte aus den fünf

Teilmessstrecken sind. Die Unsicherheit der Kenngröße ist entsprechend der Summenregel:

$$u^2(Rz) = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial Rz}{\partial p_i} \right)^2 \cdot u^2(p_i) + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial Rz}{\partial v_i} \right)^2 \cdot u^2(v_i).$$

Da $\frac{\partial Rz}{\partial p_i} = \frac{\partial Rz}{\partial v_i} = \frac{1}{5}$ für alle i ist, ist

$$u^2(Rz) = \frac{1}{25} \left(\sum_{i=1}^5 u^2(p_i) + \sum_{i=1}^5 u^2(v_i) \right).$$

Da die Unsicherheiten der Spitzenwerte $u(p_i) = u(v_i) = u(z_s)$ gleich denen der Einzelwerte sind, ist

$$u^2(Rz) = \frac{10}{25} \cdot u^2(z_s), \text{ bzw. } u(Rz) = \sqrt{\frac{10}{25}} \cdot u(z_s) = \sqrt{\frac{10}{25}} \cdot f_s \cdot u(z_g)$$

Durch die mittelnde Wirkung des Algorithmus von Rz ist die Unsicherheit der Ergebnisgröße

um den Faktor $S(Rz) = \sqrt{\frac{10}{25}}$ kleiner als die Unsicherheit der Profilmunkte.

7 Zusammenstellung der Einflussgrößen

7.1 Ohne λ s-Filterung

In Spalte 4 und 7 sind für ein Raunormal mit $Rz = 3 \mu\text{m}$ typische Werte für die Eingangsgrößen und ihre Varianzbeiträge aufgeführt.

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensitivi- täts- Koeff.	Ermittl.- methode, Verteilung	Varianz [nm^2]
3.1	Bezugsnormal	$\frac{1}{4} \cdot U_n^2$	$U_n = 15 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	56
3.2	Unterschied Messort - Kalibrierort	$\frac{1}{3} \cdot (a_y \cdot G)^2$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	G	B Rechteck	1,3
3.3	Wiederhol- präzision	$s^2(\overline{Pt_n})$	$s = 3 \text{ nm}$	1	B Gauß	9
3.4	Topografie	$\frac{1}{S^2} \cdot \frac{s^2(Rz)}{n}$	$s(Rz) = 50 \text{ nm}$	1	A Gauß	521
3.5	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 50 \text{ nm}$	1	B Rechteck	0
3.6	Grundrauschen	$\frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{12} \cdot (\overline{Rz_0})^2$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	83
3.7	Plast. Verform.	$\frac{a_{pl}^2}{3}$	$a_{pl} = 5 \text{ nm}$	1	B Rechteck	8,3
3.8	Tastspitze	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{S^2} \cdot \left(\frac{20\text{nm}}{\mu\text{m}} \cdot u(r_{sp}) \right)^2$	$u(r_{sp}) = 0,5 \mu\text{m}$	-20 nm/mm	B Rechteck	83
		$u^2(z_g)$				761,6

Tabelle 3: Zusammenstellung der Eingangsgrößen, Punkte des Gesamtprofils

Im Beispiel ist $u(z_g) = 27,6 \text{ nm}$

3.5 entfällt bei R-Kenngrößen aufgrund der Welligkeits-Filterung

3.7 entfällt bei Glasnormalen

Wird die komplette Gleichung für die systematische Unsicherheitskomponente von Rz aufgestellt, ergibt sich in der Summe der Spalte 3 in Tabelle 3:

$$u_{\text{sys}}^2(Rz) = S^2 \cdot u^2(z_g) = S^2 \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot U_n^2 + \frac{1}{3} \cdot (a_y \cdot G)^2 + s^2(\overline{Pt_n}) + \frac{1}{S^2} \cdot \frac{s^2(Rz)}{n} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{12} \cdot (\overline{Rz_0})^2 + \frac{a_{pl}^2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{S^2} \cdot \left(\frac{20nm}{\mu m} \cdot u(r_{sp}) \right)^2 \right] \quad (7)$$

Da S kleiner als 1 ist und unter Vernachlässigung der regelmäßig kleinen Eingangsgrößen kann folgende Näherung gemacht werden:

$$u_{\text{sys}}^2(Rz) \geq \frac{1}{4} \cdot U_n^2 + \frac{s^2(Rz)}{n} + \frac{Rz_0^2}{12} \quad (8)$$

7.2 Mit λ s-Filterung

In Spalte 4 und 7 sind für ein Raunormal mit $Rz = 3 \mu m$ typische Werte für die Eingangsgrößen und ihre Varianzbeiträge aufgeführt.

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensitivi- täts- Koeff.	Ermittl.- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
3.1	Bezugsnormal	$\frac{1}{4} \cdot U_n^2$	$U_n = 15 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	56
3.2	Unterschied Messort - Kalibrierort	$\frac{1}{3} \cdot (a_y \cdot G)^2$	$a_y = 100 \mu m$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	G	B Rechteck	1,3
3.3	Wiederhol- präzision	$s^2(\overline{Pt_n})$	$s = 3 \text{ nm}$	1	B Gauß	9
3.4	Topografie	$\frac{1}{S^2} \cdot \frac{s^2(Rz)}{n} \cdot f_s^2$	$s(Rz) = 50 \text{ nm}$	1	A Gauß	130
3.5	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12} \cdot f_s^2$	$Wt_0 = 50 \text{ nm}$	1	B Rechteck	0
3.6	Grundrauschen	$\frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{12} \cdot (\overline{Rz_0})^2 \cdot f_s^2$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	25
3.7	Plast. Verform.	$\frac{a_{pl}^2}{3} \cdot f_s^2$	$a_{pl} = 5 \text{ nm}$	1	B Rechteck	2,5
3.8	Tastspitze	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{S^2} \cdot \left(\frac{20nm}{\mu m} \cdot u(r_{sp}) \right)^2 \cdot f_s^2$	$u(r_{sp}) = 0,5 \mu m$	-20 nm/mm	B Rechteck	2,5
		$u^2(z_s)$				226,3

Tabelle 4: Zusammenstellung der Eingangsgrößen, Punkte des Primärprofils

Bemerkungen:

Im Beispiel ist $u(z_s) = 15 \text{ nm}$

3.5 entfällt bei R-Kenngrößen aufgrund der Welligkeits-Filterung

3.7 entfällt bei Glasnormalen

Wird die komplette Gleichung für die systematische Unsicherheitskomponente von Rz aufgestellt, ergibt sich in der Summe der Spalte 3 in Tabelle 4:

$$u_{\text{sys}}^2(Rz) = S^2 \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot U_n^2 + \frac{1}{3} \cdot (a_y \cdot G)^2 + s^2(\overline{Pt_n}) + f_s^2 \times \left(\frac{1}{S^2} \cdot \frac{s^2(Rz)}{n} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{12} \cdot \overline{Rz_0}^2 + \frac{a_{pl}^2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{S^2} \cdot \left(\frac{20nm}{\mu m} \cdot u(r_{sp}) \right)^2 \right) \right] \quad (9)$$

Entsprechend den Betrachtungen in den Kapiteln 3.4, 3.6 und 3.8 werden die Schätzwerte für die Unsicherheiten der Profilpunkte aus den Schätzwerten von Oberflächenkenngrößen bestimmt und die glättende Wirkung der λ s-Filterung berücksichtigt.

Da S kleiner als 1 ist und unter Vernachlässigung der regelmäßig kleinen Eingangsgrößen kann folgende Näherung gemacht werden:

$$u_{\text{sys}}^2(Rz) \geq \frac{1}{4} \cdot U_n^2 + \frac{s^2(Rz)}{n} + \frac{Rz_0^2}{12} \quad (10)$$

Diese Zusammenstellung ist die gleiche wie in Gl.8, nur mit dem Unterschied, dass hier λ s-gefilterte Schätzwerte einzusetzen sind.

8 Unbekannte systematische Abweichungen

In der Messkette können unbekannt systematische Abweichungen auftreten durch:

- Offengelassene Festlegungen in den Algorithmen der Kenngrößen in DIN EN ISO 4287
- Zugelassene Abweichungen in den Filtern in DIN EN ISO 11562, z. B. durch Näherungen in den Filteralgorithmen
- Unsicherheit durch Linearitätsabweichungen des Wandlers, Bandbreitenbeschränkung des Verstärkers, Auflösung des A/D – Wandlers
- Abweichung der Tastspitze von der Nennform
- Unsicherheit der Messpunkte in Vorschubrichtung

Daher müssen für die Unsicherheitsberechnung bei den Funktionen unbekannt systematische Abweichungen berücksichtigt werden. Durch Software-Normale entsprechend DIN EN ISO 5436-2 könnten diese Abweichungen genauer lokalisiert werden. Für die messtechnische Praxis werden diese Unsicherheiten durch Vergleichsmessungen, z. B. in Ringvergleichen, an verkörperten Normalen nach DIN EN ISO 5436-1 mit möglichst unterschiedlichen Geräten und unterschiedlichen Realisierungen der Algorithmen herausgefunden. Als Schätzwert für die Unsicherheiten dienen die Standardabweichungen der Mittelwerte der Schätzwerte der Kenngrößen $s_v(K)$, wobei die Mittelung über die jeweils beteiligten Laboratorien (Anzahl m) erfolgte. Die Unsicherheiten $u_v(K) = \frac{s_v(K)}{\sqrt{m}}$ sind in einer Tabelle in Abhängigkeit von Kenn-

größe, Normaltyp und Messbereich und Filterung zusammengestellt und werden quadratisch zu der systematischen Unsicherheitskomponente addiert.

$$u^2(K) = u_{\text{sys}}^2(K) + u_v^2(K)$$

Die Vergleichsunsicherheiten $u_v(K)$ eines DKD-Ringvergleiches sind in der Tabelle 5 in Kapitel 10 angegeben. Die erweiterte Messunsicherheit des Wertes K der Kenngröße P (Überdeckungswahrscheinlichkeit = 95%) ist

$$U(K) = 2 \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot U_n^2 + \frac{s^2(K)}{n} + \frac{K_0^2}{12} + u_v^2(K) \right]^{1/2}$$

K_0 ist dabei der Messwert der Kenngröße auf dem Planglas. Diese Herleitung bestätigt die bisher in den Kalibrierlaboratorien des DKD praktizierte, aus der Erfahrung gewonnene Berechnung.

Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit ist der Näherungsschritt von Gl. 9 zu Gl. 10 etwas grob. Insbesondere bei stark mittelnden Kenngrößen ($S \ll 1$) wie z. B. Ra oder Rq bekommt der erste Summand in Gl. 9 durch das Aufrunden von S zu 1 ein zu großes Gewicht. Dies kann dadurch berücksichtigt werden, dass eine Näherung für den Glättungsfaktor eingesetzt wird: $S(K) = \frac{K}{R_z}$. Dabei ist K stellvertretend für den Schätzwert von Ra , Rq ,

Rpk , Rvk , Rk , auf einem Raunormal gemessen, dessen gemittelte Rautiefe R_z ist.

$$U(K) = 2 \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot \frac{K^2}{R_z^2} U_n^2 + \frac{s^2(K)}{n} + \frac{K_0^2}{12} + u_v^2(K) \right]^{1/2}$$

9 Literatur

/1/ M. Krystek:

Einfluss des Wellenfilters auf die Unsicherheit eines Messergebnisses bei Rauheitsmessungen. Tagungsband der DIN-Tagung „GPS 99“, 05.-06. Mai 1999, Mainz, S. 4-1 – 4-11. Beuth-Verlag, ISBN 3-410-14534-6

/2/ R. Krüger-Sehm, M. Krystek:

Uncertainty Analysis of Roughness Measurement

Proceedings of X. Int. Colloquium on Surfaces, Additional papers, 31.01. – 02.02.2000, Chemnitz

10 Vergleichsunsicherheiten

		Kennwerte mit λ_s									Kennwerte ohne λ_s								
		λ_c in mm	Ra	Rz1max	Rz	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	Ra	Rz1max	Rz	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	
Typ																			
GN	G	2,5	0,2	0,3	0,2						0,5	0,3	0,3						
	G	0,8	0,2	0,3	0,4						0,4	0,3	0,3						
	M	0,8	0,3	0,4	0,4						0,2	0,2	0,2						
	F	0,8	0,4	0,3	0,4						0,5	0,3	0,5						
	F	0,25	0,6	0,6	0,5						0,5	0,5	0,5						
Anz. d. Laboratorien			9								4								
RN	Gg	2,5	0,5	0,6	0,7	0,3	0,3	0,6	0,2	0,1	0,4	0,5	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	
	G	0,8	0,5	0,6	0,5	0,3	0,5	0,5	0,2	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	
	M	0,8	0,4	0,3	0,5	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,5	0,5	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	
	F	0,8	0,3	0,7	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	1,1	0,3	0,9	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	
Anz. d. Laboratorien			7								5								
SFRN	G	0,25	0,3	1,3	0,5	0,4	1,6	0,2	0,6	0,2	0,6	1,5	0,6	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	
	M	0,25	0,3	1,2	0,8	0,5	2,1	0,3	0,4	0,1	0,4	0,8	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	
	F	0,25	0,9	2,1	1,9	1,1	1,6	0,8	0,4	0,5	1	2,4	1,9	0,6	0,3	0,2	0,2	0,2	
Anz. d. Laboratorien			6								4								

Tabelle 5: Vergleichsunsicherheiten u_v für die Messunsicherheitsberechnung in DKD-Laboratorien, Werte in % vom Messwert, nach RV 97

Anhang B: Messunsicherheit der Tiefe des Profils eines Tiefeneinstellnormals mit der Rauheit der Referenzfläche und Lokalisierung des Messortes im Topografie-Term

Die in Kap. 2 des Anhanges A allgemein hergeleiteten Unsicherheitsquellen werden in diesem Beispiel auf die Gegebenheiten der Tiefeneinstellnormale übertragen. In den Beispielwerten wird ein Glasnormal mit einem Nennwert 3 µm angenommen.

1. Kalibrierfaktor

1.1 Bezugsnormal

Die Unsicherheit des Bezugsnormals (kalibriertes Tiefeneinstellnormal) ist laut Kalibrierschein z. B. $U_n = 10$ nm, bei $k = 2$ ist

$$u^2(Pt_n) = \frac{U_n^2}{4} = 25 \text{ nm}^2$$

1.2 Unterschied Messort - Kalibrierort

$u^2(Pt_{my}) = \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$. Mit $a_y = 100$ µm und $G = 20$ nm/mm (Anhang A Bild 3) ist

$$u^2(Pt_{my}) = \frac{(100 \text{ µm})^2 \cdot (20 \text{ nm/mm})^2}{3} = 1,33 \text{ nm}^2$$

1.3 Wiederholpräzision

Als Schätzwert für die Unsicherheit bei der Antastung des Bezugsnormals wird die empirische Standardabweichung des Mittelwertes aus m_w Wiederholungsmessungen am selben Ort genommen:

$u^2(b) = \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} = s_w^2(\overline{Pt_m})$. Mit einem typischen Wert für die empirische Varianz

$$s_w(\overline{Pt_m}) = 2 \text{ nm} \text{ ist } u^2(b) = 4 \text{ nm}^2.$$

2. Topografie des Normals

2.1 Rauheit der Referenzfläche

Die Referenz- und Messflächen des zu messenden Prüflings haben eine Rest-Rauheit mit typischen Peak-Valley-Werten von $Pt_r = 10$ nm. Als Schätzwert für die Unsicherheit der Profilmessung wird

$s(\overline{Pt_r}) = \frac{s(Pt_r)}{\sqrt{m_t}}$, die Standardabweichung des Mittelwertes von Pt_r genommen.

Dabei ist Pt_r die Rauheit, gemessen auf der Referenzfläche in der Nähe der zu messenden Rille. Bei beispielhaft $m_t = 5$ Messungen hat Pt_r eine empirische Standardabweichung von 5 nm.

$$u^2(z_e) = \frac{s^2(Pt_r)}{m_t} = 5 \text{ nm}^2$$

2.2 Lokalisierung des Messortes

Die Rillentiefe ist in Richtung der Längsachse der Rille i . Allg. nicht konstant. Aufgrund eines unsicheren Messortes ist daher die aktuell gemessene Höhe unsicher. Die Einflussgröße und der Sensitivitätskoeffizient sind die gleichen wie bei der Messung des Bezugsnormals zur Bestimmung des Kalibrierfaktors in Kap.1.2.

$u_{top}^2(z_e) = \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$. In diesem Fall ist natürlich der Gradient G des zu kalibrierenden Normals einzusetzen. Im Beispielfall werden o.B.d.A. die gleichen Werte wie in Kap. 1.2 angenommen.

$$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} = \frac{(100 \mu\text{m})^2 \cdot (20 \text{ nm} / \text{mm})^2}{3} = 1,33 \text{ nm}^2$$

Bemerkung: Dieser Term muss nur beim Vergleichen von Messergebnissen auf gleicher Hierarchieebene verwendet werden, z. B. in einem Ringvergleich. Jeder der Beteiligten muss bei sich die Unsicherheit berücksichtigen, die durch einen ungenauen Messort entsteht.

Im Zuge der Weitergabe von Einheiten wird dagegen in der höheren Hierarchiestufe das Ergebnis der Kalibrierung des Tiefeneinstellnormals als frei von Ortsunsicherheit betrachtet und die Unsicherheit des Messortes bei der Bestimmung des Kalibrierfaktors in der niedrigeren Hierarchiestufe in Kap. 1.2 berücksichtigt.

3. Führungsabweichung des Gerätes

Für die Führungsabweichungen im benutzten Bereich der Führung des Gerätes wird $Wt_0 \leq 20 \text{ nm}$ angenommen. Der Varianzbeitrag ist

$$u^2(z_{ref}) = \frac{Wt_0^2}{12} = \frac{(20 \text{ nm})^2}{12} = 33 \text{ nm}^2.$$

4. Grundrauschen

Das Grundrauschen auf einem Planglas sei $Rz_0 = 20 \text{ nm}$.

$$u^2(z_{pl}) = \frac{Rz_0^2}{12} = 33 \text{ nm}^2.$$

5. Plastische Verformung

Bei einem Glasnormal ist die plastische Verformung vernachlässigbar klein.

6. Unsicherheit der Punkte des Gesamtprofils

Aus der Summe dieser Unsicherheiten ergibt sich die Varianz der Punkte des Gesamtprofils.

$$u^2(z_g) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} + \frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{Rz_0^2}{12}$$

Die ersten drei enthalten die Unsicherheit des Anschlusses, die letzten vier die Unsicherheitsbeiträge aus dem Messvorgang. Die Summanden dieser Gleichung sind in der Tabelle in Kapitel 9 aufgelistet. Mit den Beispielzahlenwerten aus den Kapiteln 1 bis 4 ergibt sich

$$u(z_g) = 10,2 \text{ nm.}$$

7. Kennwertfunktion

7.1 Messunsicherheit der Profiltiefe Pt

Die Profiltiefe Pt ist im ausgerichteten Profil die Differenz zwischen dem höchstem z-Wert auf der Referenzebene (z_h) und dem tiefsten z-Wert im Rillengrund (z_l). Beim Ausrichten werden die Profilpunkte unterschiedlich angehoben, wobei aufgrund von Rauheit und Ebenheitsabweichungen eine Ausrichtabweichung auftritt. Dadurch verändert sich die Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt abhängig davon, wo diese liegen, um maximal A . Der Erwartungswert von A ist im Mittel mehrerer Messungen null. Es gilt das Modell für Pt :

$$Pt = z_h - z_l + A.$$

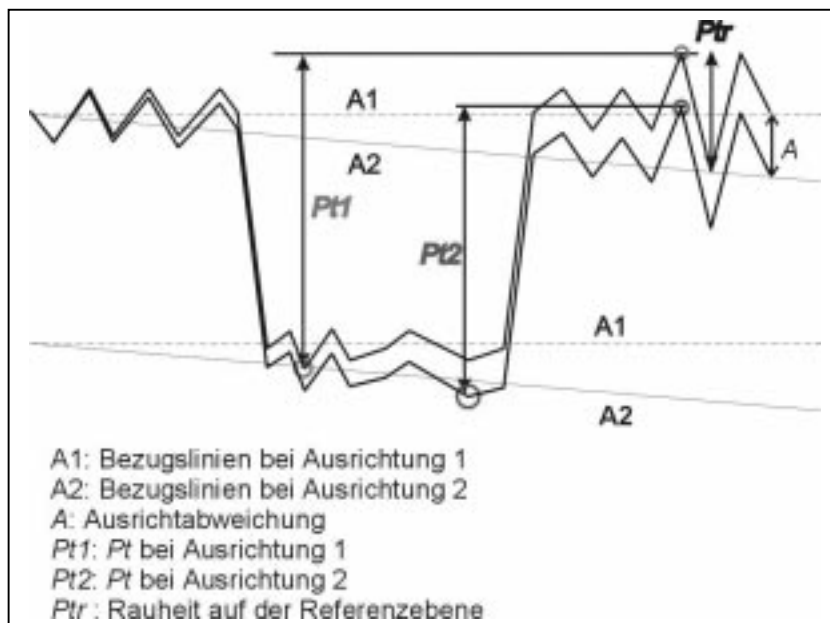


Bild 7: Unsicherheit von Pt durch Ausrichtabweichung

Für die Unsicherheit der Profiltiefe Pt gilt:

$$u^2(Pt) = \left(\frac{\partial Pt}{\partial z_h}\right)^2 \cdot u^2(z_h) + \left(\frac{\partial Pt}{\partial z_l}\right)^2 \cdot u^2(z_l) + \left(\frac{\partial Pt}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(A).$$

Die ersten beiden Sensitivitätskoeffizienten sind 1. Der dritte beschreibt im Prinzip den cosinus-Faktor, der sich mit der Ausrichtung ändert. Aufgrund der kleinen Winkel und deren Änderungen ist er ausreichend genau gleich eins. Die Unsicherheit der z -Werte $u(z_h)$ und $u(z_l)$ sind gleich der der Punkte des Gesamtprofils $u(z_g)$. Als Schätzwert für die Variabilität der Ausrichtabweichung $u(A)$ dient der Spitzenwert Pt_r der Rauheit bzw. die Ebenheitsabweichungen der Profilanteile in den Referenzlinienabschnitten, die in die Auswertung einbezogen werden. Innerhalb von Pt_r wird eine Rechteckverteilung angenommen.

$$u^2(Pt) = 2 \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot (Pt_r)^2.$$

Auf Tiefeneinstellnormalen ist ein üblicher Wert für $Pt_r = 10 \text{ nm}$. Damit bestimmt sich die Varianz von Pt

$$u^2(Pt) = 2 \cdot (10,2 \text{ nm})^2 + \frac{1}{12} \cdot (10 \text{ nm})^2,$$

und die Standardmessunsicherheit von Pt ist $u(Pt) = 14,7 \text{ nm}$.

Mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit zu

$$U(Pt) = 29,4 \text{ nm}.$$

7.2 Messunsicherheit der Rillentiefe D

Als Näherung für die Berechnung der Rillentiefe D entsprechend DIN EN ISO 5436-1 wird das folgende Modell angenommen. Am ausgerichteten Profil wird die Differenz der Mittelwerte der „Profilabschnitte oben“ und des „Profilabschnittes unten“ gebildet (Anhang A Bild 2). Werden die Referenzlinienabschnitte mit der Ausrichtabweichung A ausgerichtet, wird das Profil verzerrt und D verändert. Das Modell: $D = \bar{z}_h - \bar{z}_l + A$. Der Erwartungswert von A ist im Mittel mehrerer Messungen null.

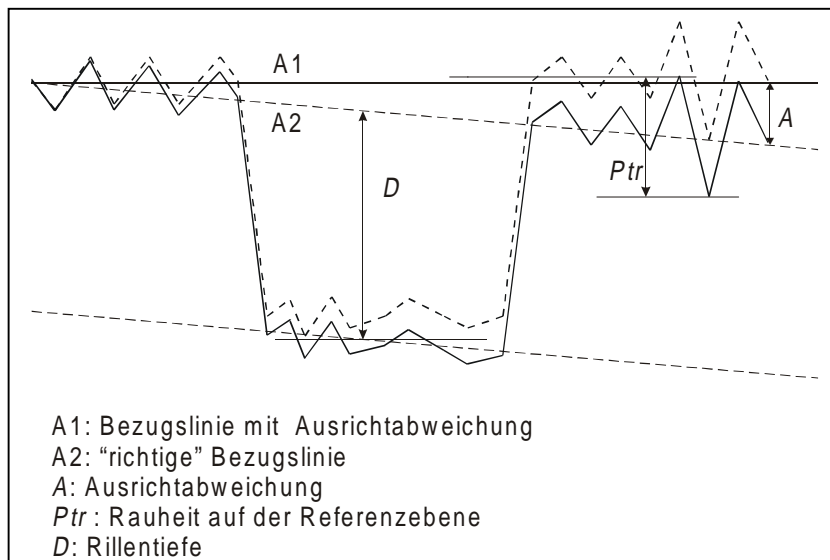


Bild 8: Unsicherheit von D durch Ausrichtabweichung

$$D = \frac{1}{n_h} \cdot \sum_{i=1}^{n_h} z_{ghi} - \frac{1}{n_l} \cdot \sum_{i=1}^{n_l} z_{gli} + A. \text{ Für die Unsicherheit gilt die Summenregel}$$

$$u^2(D) = \sum_{i=1}^{n_h} \left(\frac{\partial D}{\partial z_{ghi}}\right)^2 \cdot u^2(z_{ghi}) + \sum_{i=1}^{n_l} \left(\frac{\partial D}{\partial z_{gli}}\right)^2 \cdot u^2(z_{gli}) + \left(\frac{\partial D}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(A).$$

$$\frac{\partial D}{\partial z_{ghi}} = \frac{1}{n_h} \text{ für } i = 1 \text{ bis } n_h, \quad \frac{\partial D}{\partial z_{gli}} = \frac{1}{n_l} \text{ für } i=1 \text{ bis } n_l, \quad u(z_{ghi}), u(z_{gli}) = u(z_g).$$

Der Cosinus-Faktor $\frac{\partial D}{\partial A}$ ist bei den gegebenen kleinen Winkeln und deren Änderungen genügend genau 1.

Als Schätzwert für $u(A)$ gilt im Gegensatz zur Betrachtung der Unsicherheit von Pt die folgende Betrachtung: Aufgrund der Definition von D (Probenentnahme in der Mitte und am Rand des Profilschnittes) kann sich die Ausrichtabweichung nur mit dem halben Betrag von Pt_r auswirken.

$$u^2(D) = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2.$$

Die Mittelwertbildung über die Profilpunkte wirkt nur auf die zufälligen Abweichungen in z_g , so dass die Standardmessunsicherheit

$$u^2(D) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot \left[\frac{\overline{Rz_0}}{12}\right]^2$$

$$u(D) = 8,6 \text{ nm.}$$

Mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ist die erweiterte Messunsicherheit $U(D) = 17,2 \text{ nm}$.

8. Auswertung mit Filterung

Bei der Auswertung mit λ_s wird die Unsicherheit der Punkte des Primärprofils durch den Glättungsfaktor f_s der Filterfunktion in Abhängigkeit vom kurzwelligen Tiefpassfilter λ_s und Messpunkt Abstand Δx verändert (Anhang A, Kapitel 4).

λ_s [μm]	Δx [μm]	f_s
2,5	0,5	0,55
8	1,5	0,53
8	0,5	0,31

Tabelle 1: Filterfaktoren für verschiedene Tiefpass-Filterwellenlängen.

Der Filterfaktor f_s wirkt sich nur auf die aktuell gemessenen zufälligen Größen aus, so dass für die Unsicherheit der Punkte des Primärprofils gilt:

$$u^2(z_s) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{Wt_0^2}{12} + f_s^2 \cdot \left[\frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t} + \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} + \frac{\overline{Rz_0}}{12} \right]$$

Werden die gleichen Werte für die Eingangsgrößen wie in den Kapiteln 1 bis 4 eingesetzt, wird - bei einer Filterung mit $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$ und $\Delta x = 0,5 \mu\text{m}$ - $u(z_s) = 8,1 \text{ nm}$.

Bei der praktischen Berechnung ist darauf zu achten, aus welcher Quelle die Werte für die Eingangsgrößen stammen: Wenn die Schätzwerte für die Eingangsgrößen (Pt_m, Pt_r, Wt_0, Rz_0) aus bereits gefilterten Profildaten entstanden sind, ist in ihnen die Wirkung des kurzwelligen Tiefpassfilters bereits eingeschlossen. Werden die gefilterten Werte für die Berechnung von $u(z_s)$ gemäß der obigen Gleichung genommen, darf daher der Filterfaktor f_s nicht noch einmal angebracht werden. Das Berechnungsschema wird dann das gleiche wie in Kapitel 7, nur mit den Werten der gefilterten Eingangsgrößen.

8.1 Unsicherheit der Profiltiefe Pt

Aus der Unsicherheit der Profilpunkte und der Ausrichtabweichung ist

$$u^2(Pt) = 2 \cdot u^2(z_s) + \frac{1}{12} \cdot (Pt_r)^2$$

und $u(Pt) = 11,4 \text{ nm}$.

8.2 Unsicherheit der Rillentiefe D

Wie in Kap. 7.2 mittelt der Algorithmus von D abschnittsweise über die gefilterten Profilpunkte.

$$u^2(D) = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot u^2(z_s) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2$$

Die Mittelung wirkt sich nur auf die zufälligen Abweichungen in den z_s aus, so dass

$$u^2(D) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + f_s^2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2 + \frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t} + \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot \left(\frac{\overline{Rz_0}}{12}\right)^2 \right]$$

und $u(D) = 7,9 \text{ nm}$

9. Zusammenfassung der Messunsicherheit von Profiltiefe Pt und Rillentiefe D

Für die Beispielwerte wurde ein Tiefeneinstellnormal mit Nennwert von $Pt = 3 \mu\text{m}$ angenommen und für die Eingangsgrößen typische Werte eingesetzt.

Profiltiefe Pt , Auswertung ohne Filterung

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$\frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w}$	$s_w(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	5
2.1	Topografie	$\frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t}$	$s_t(Pt_r) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	5
2.2	Messort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$\frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	33
6	Varianz der Profilpunkte	Summe dieser Spalte			$u^2(z_g)$	103,66
						Unsicher- heit [nm]
6	Unsicherheit der Profilpunkte				$u(z_g)$	10,2
7.1	Unsicherheit der Profiltiefe	$[2 \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot Pt_r^2]^{1/2}$	$Pt_r = 10 \text{ nm},$		$u(Pt)$	14,7
	Erweiterte Unsicherheit der Profiltiefe	$k \cdot u(Pt)$			$U(Pt)$	29,4

Rillentiefe D , Auswertung ohne Filterung

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \text{ } \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$\frac{s_w^2(D_m)}{m_w}$	$s_w(D_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	5
2.1	Topografie	$\frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t}$	$s_t(Pt_r) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	5
2.2	Messort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \text{ } \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}) \cdot \frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$ $n_h, n_l = 100$	1	A Rechteck	0,7
7.2	Profilausrichtung	$\frac{1}{12} \cdot (\frac{Pt_r}{2})^2$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$	1	A Rechteck	2,1
7.2	Varianz der Rillentiefe	Summe dieser Spalte			$u^2(D)$	73,46
						Unsicher- heit [nm]
7.2	Unsicherheit der Rillentiefe				$u(D)$	8,6
	Erweiterte Unsicherheit der Rillentiefe	$k \cdot u(D)$			$U(D)$	17,2

Profiltiefe Pt , Auswertung mit Filterung $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$f_s^2 \cdot \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w}$	$s_w(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	0,5
2.1	Topografie	$f_s^2 \cdot \frac{s_t^2(Pt_r)}{m_t}$	$s_t(Pt_r) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	0,5
2.2	Messort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$f_s^2 \cdot \frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	3,2
8	Varianz der Profilpunkte	Summe dieser Spalte			$u^2(z_s)$	64,86
						Unsicher- heit [nm]
8	Unsicherheit der Profilpunkte				$u(z_s)$	8,1
8.1	Unsicherheit der Profiltiefe	$[2 \cdot u^2(z_g) +$ $f_s^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot Pt_r^2]^{1/2}$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$,		$u(Pt)$	11,4
	Erweiterte Unsicherheit der Profiltiefe	$k \cdot u(Pt)$			$U(Pt)$	22,8

Rillentiefe D , Auswertung mit Filterung $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$f_s^2 \cdot \frac{s_w^2(D_m)}{m_w}$	$s_w(D_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	0,5
2.1	Topografie	$f_s^2 \cdot \frac{s_r^2(Pt_r)}{m_t}$	$s_r(Pt_r) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	0,5
2.2	Messort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$f_s^2 \cdot \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot \frac{Rz_0^2}{12}$	$Rz_0 = 20 \text{ nm}$ $n_h, n_l = 100$	1	A Rechteck	0,06
8.2	Profilausrichtung	$f_s^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$	1	A Rechteck	0,2
8.2	Varianz der Rillentiefe	Summe dieser Spalte			$u^2(D)$	61,92
						Unsicher- heit [nm]
8.2	Unsicherheit der Rillentiefe				$u(D)$	7,9
	Erweiterte Unsicherheit der Rillentiefe	$k \cdot u(D)$			$U(D)$	15,8

Anhang C: Messunsicherheit der Tiefe des Profils eines Tiefeneinstellnormals mit der Standardabweichung der Rillentiefe als Topografie-Term

Die in Kap. 2 des Anhanges A allgemein hergeleiteten Unsicherheitsquellen werden in diesem Beispiel auf die Gegebenheiten der Tiefeneinstellnormale übertragen. In den Beispielwerten wird ein Glasnormal mit einem Nennwert $3 \mu\text{m}$ angenommen.

1. Kalibrierfaktor

1.1 Bezugsnormal

Die Unsicherheit des Bezugsnormals (kalibriertes Tiefeneinstellnormal) ist laut Kalibriererschein z. B. $U_n = 10 \text{ nm}$, bei $k = 2$ ist

$$u^2(Pt_n) = \frac{U_n^2}{4} = 25 \text{ nm}^2$$

1.2 Unterschied Messort - Kalibrierort

$u^2(Pt_{my}) = \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$. Mit $a_y = 100 \mu\text{m}$ und $G = 20 \text{ nm/mm}$ (Anhang A Bild 3) ist

$$u^2(Pt_{my}) = \frac{(100 \mu\text{m})^2 \cdot (20 \text{ nm/mm})^2}{3} = 1,33 \text{ nm}^2$$

1.3 Wiederholpräzision

Als Schätzwert für die Unsicherheit bei der Antastung des Bezugsnormals wird die empirische Standardabweichung des Mittelwertes von Pt_m aus m_w Wiederholungsmessungen am selben Ort genommen:

$$u^2(b) = \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} = s_w^2(\overline{Pt_m}). \text{ Mit einem typischen Wert für die empirische Varianz}$$

$$s_w(\overline{Pt_m}) = 2 \text{ nm} \text{ ist } u^2(b) = 4 \text{ nm}^2.$$

2. Topografie des Normals

In Richtung der Längsachse ist die Rillentiefe des zu messenden Prüflings i. Allg. nicht konstant. Ein typischer Wert ist eine Schwankungsbreite von 40 nm . Daher wird die Rillentiefe an m_t verschiedenen Stellen der Rille bestimmt. Als Schätzwert für die Unsicherheitskomponente der Profilmessung wird die Standardabweichung des Mittelwertes von Pt_m genommen:

$$s_t(\overline{Pt_m}) = \frac{s_t(Pt_m)}{\sqrt{m_t}}. \text{ Diese Betrachtung setzt voraus, dass die Rillentiefe zufällig und nicht sy-}$$

stematisch schwankt. Bei typischen $m_t = 5$ Profilschnitten hat Pt_m eine empirische Standardabweichung von 5 nm . Bei dieser Betrachtung steht also die wenig arbeitsaufwändige Weitergabe des Mittelwertes der Rillentiefe im Vordergrund, wobei auf eine genaue Positionierung der Messstelle verzichtet wird.

$$u^2(z_e) = \frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t} = 5 \text{ nm}^2$$

3. Führungsabweichung des Gerätes

Für die Führungsabweichungen im benutzten Bereich der Führung des Gerätes wird $Wt_0 \leq 20$ nm angenommen. Der Varianzbeitrag ist

$$u^2(z_{ref}) = \frac{Wt_0^2}{12} = \frac{(20 \text{ nm})^2}{12} = 33 \text{ nm}^2.$$

4. Grundrauschen

Das Grundrauschen auf einem Planglas sei $Rz_0 = 20$ nm.

$$u^2(z_{pl}) = \frac{Rz_0^2}{12} = 33 \text{ nm}^2.$$

5. Plastische Verformung

Bei einem Glasnormal ist die plastische Verformung vernachlässigbar klein.

6. Unsicherheit der Punkte des Gesamtprofils

Aus der Summe dieser Unsicherheiten ergibt sich die Varianz der Punkte des Gesamtprofils.

$$u^2(z_g) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} + \frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{Rz_0^2}{12}$$

Die ersten drei enthalten die Unsicherheit des Anschlusses, die letzten drei die Unsicherheitsbeiträge aus dem Messvorgang. Die Summanden dieser Gleichung sind in der Tabelle in Kapitel 9 aufgelistet. Mit den Beispielszahlenwerten aus den Kapiteln 1 bis 4 ergibt sich:

$$u(z_g) = 10,1 \text{ nm}.$$

7. Kennwertfunktion

7.1 Messunsicherheit der Profiltiefe Pt

Die Profiltiefe Pt ist im ausgerichteten Profil die Differenz zwischen dem höchstem z-Wert auf der Referenzebene (z_h) und dem tiefsten z-Wert im Rillengrund (z_l). Beim Ausrichten werden die Profilmere unterschiedlich angehoben, wobei aufgrund von Rauheit und Ebenheitsabweichungen eine Ausrichtabweichung auftritt. Dadurch verändert sich die Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt abhängig davon, wo diese liegen, um maximal A . Der Erwartungswert von A ist im Mittel mehrerer Messungen null. Es gilt das Modell für Pt :

$$Pt = z_h - z_l + A.$$

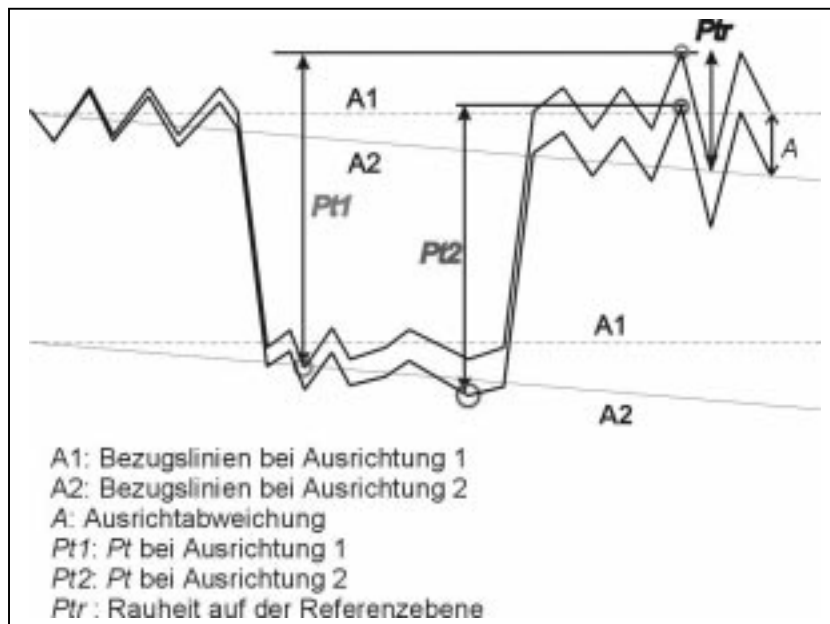


Bild 7: Unsicherheit von Pt durch Ausrichtabweichung

Für die Unsicherheit der Profiltiefe Pt gilt:

$$u^2(Pt) = \left(\frac{\partial Pt}{\partial z_h}\right)^2 \cdot u^2(z_h) + \left(\frac{\partial Pt}{\partial z_l}\right)^2 \cdot u^2(z_l) + \left(\frac{\partial Pt}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(A).$$

Die ersten beiden Sensitivitätskoeffizienten sind 1. Der dritte beschreibt im Prinzip den cosinus-Faktor, der sich mit der Ausrichtung ändert. Aufgrund der kleinen Winkel und deren Änderungen ist er ausreichend genau gleich eins. Die Unsicherheit der z -Werte $u(z_h)$ und $u(z_l)$ sind gleich der der Punkte des Gesamtprofils $u(z_g)$. Als Schätzwert für die Variabilität der Ausrichtabweichung $u(A)$ dient der Spitzenwert Pt_r der Rauheit bzw. die Ebenheitsabweichungen der Profilateile in den Referenzlinienabschnitten, die in die Auswertung einbezogen werden. Innerhalb von Pt_r wird eine Rechteckverteilung angenommen.

$$u^2(Pt) = 2 \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot (Pt_r)^2.$$

Auf Tiefeneinstellnormalen ist ein üblicher Wert für $Pt_r = 10$ nm. Damit bestimmt sich die Varianz von Pt

$$u^2(Pt) = 2 \cdot (10,1 \text{ nm})^2 + \frac{1}{12} \cdot (10 \text{ nm})^2,$$

und die Standardmessunsicherheit von Pt ist $u(Pt) = 14,6$ nm

Mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit zu $U(Pt) = 29,2$ nm.

7.2 Messunsicherheit der Rillentiefe D

Als Näherung für die Berechnung der Rillentiefe D entsprechend DIN EN ISO 5436-1 wird das folgende Modell angenommen. Am ausgerichteten Profil wird die Differenz der Mittelwerte der „Profilabschnitte oben“ und des „Profilabschnittes unten“ gebildet (Anhang A Bild 2). Werden die Referenzlinienabschnitte mit der Ausrichtabweichung A ausgerichtet, wird das Profil verzerrt und D verändert. Das Modell: $D = \bar{z}_h - \bar{z}_l + A$. Der Erwartungswert von A ist im Mittel mehrerer Messungen null.

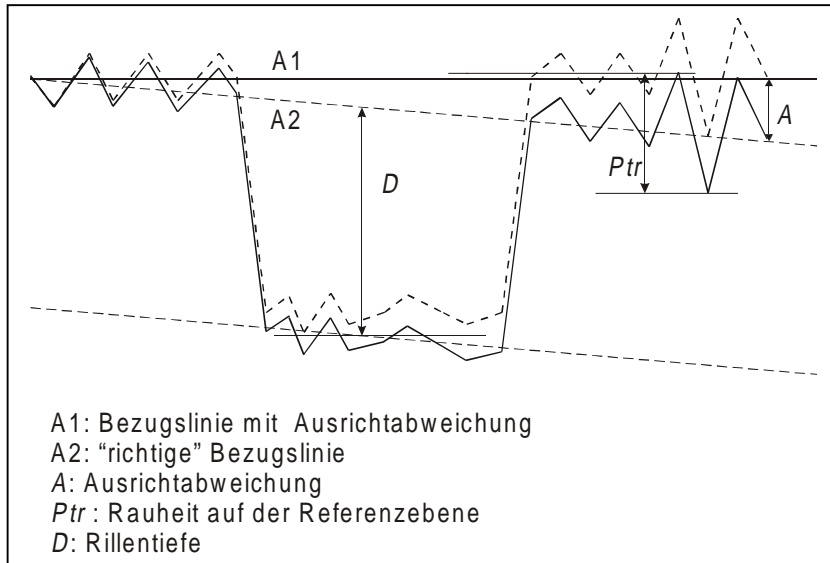


Bild 8: Unsicherheit von D durch Ausrichtabweichung

$$D = \frac{1}{n_h} \cdot \sum_{i=1}^{n_h} z_{ghi} - \frac{1}{n_l} \cdot \sum_{i=1}^{n_l} z_{gli} + A. \text{ Für die Unsicherheit gilt die Summenregel}$$

$$u^2(D) = \sum_{i=1}^{n_h} \left(\frac{\partial D}{\partial z_{ghi}} \right)^2 \cdot u^2(z_{ghi}) + \sum_{i=1}^{n_l} \left(\frac{\partial D}{\partial z_{gli}} \right)^2 \cdot u^2(z_{gli}) + \left(\frac{\partial D}{\partial A} \right)^2 \cdot u^2(A).$$

$$\frac{\partial D}{\partial z_{ghi}} = \frac{1}{n_h} \text{ für } i = 1 \text{ bis } n_h, \quad \frac{\partial D}{\partial z_{gli}} = -\frac{1}{n_l} \text{ für } i = 1 \text{ bis } n_l, \quad u(z_{ghi}), u(z_{gli}) = u(z_g).$$

Der Cosinus-Faktor $\frac{\partial D}{\partial A}$ ist bei den gegebenen kleinen Winkeln und deren Änderungen genügend genau 1.

Als Schätzwert für $u(A)$ gilt im Gegensatz zur Betrachtung der Unsicherheit von Pt die folgende Betrachtung: Aufgrund der Definition von D (Probenentnahme in der Mitte und am Rand des Profilschnittes) kann sich die Ausrichtabweichung nur mit dem halben Betrag von Pt_r auswirken.

$$u^2(D) = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2.$$

Die Mittelwertbildung über die Profilpunkte wirkt nur auf die zufälligen Abweichungen in z_g , so dass die Standardmessunsicherheit

$$u^2(D) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2 + \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot \left[\frac{\overline{Rz_0}^2}{12} \right]$$

$$u(D) = 8,5 \text{ nm.}$$

Mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ist die erweiterte Messunsicherheit $U(D) = 17 \text{ nm.}$

8. Auswertung mit Filterung

Bei der Auswertung mit λ_s wird die Unsicherheit der Punkte des Primärprofils durch den Glättungsfaktor f_s der Filterfunktion in Abhängigkeit vom kurzwelligen Tiefpassfilter λ_s und Messpunktabstand Δx verändert (Anhang A, Kapitel 4).

λ_s [μm]	Δx [μm]	f_s
2,5	0,5	0,55
8	1,5	0,53
8	0,5	0,31

Tabelle 1: Filterfaktoren für verschiedene Tiefpass-Filterwellenlängen.

Der Filterfaktor f_s wirkt sich nur auf die aktuell gemessenen zufälligen Größen aus, so dass für die Unsicherheit der Punkte des Primärprofils gilt:

$$u^2(z_s) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t} + \frac{Wt_0^2}{12} + f_s^2 \cdot \left[\frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \frac{\overline{Rz_0}^2}{12} \right]$$

Werden die gleichen Werte für die Eingangsgrößen wie in den Kapiteln 1 bis 4 eingesetzt, wird - bei einer Filterung mit $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$ und $\Delta x = 0,5 \mu\text{m}$ - $u(z_s) = 8,5 \text{ nm}$.

Bei der praktischen Berechnung ist darauf zu achten, welcher Natur die Eingangsgrößen sind: Wenn die Schätzwerte für die Eingangsgrößen (Pt_m , Pt_r , Wt_0 , Rz_0) aus bereits gefilterten Profildaten entstanden sind, ist in ihnen die Wirkung des kurzwelligen Tiefpassfilters bereits eingeschlossen. Werden die gefilterten Werte für die Berechnung von $u(z_s)$ gemäß der obigen Gleichung genommen, darf daher der Filterfaktor f_s nicht noch einmal angebracht werden. Das Berechnungsschema wird dann das gleiche wie in Kapitel 6, nur mit den Werten der gefilterten Eingangsgrößen.

8.1 Unsicherheit der Profiltiefe Pt

Aus der Unsicherheit der Profilpunkte und der Ausrichtabweichung ist

$$u^2(Pt) = 2 \cdot u^2(z_s) + \frac{1}{12} \cdot (Pt_r)^2$$

und $u(Pt) = 11,7 \text{ nm}$.

8.2 Unsicherheit der Rillentiefe D

Wie in Kap. 7.2 mittelt der Algorithmus von D abschnittsweise über die gefilterten Profilpunkte.

$$u^2(D) = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot u^2(z_s) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2$$

Die Mittelung wirkt sich nur auf die zufälligen Abweichungen in den z_s aus, so dass

$$u^2(D) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t} + \frac{Wt_0^2}{12} + f_s^2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2 + \frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot \left(\frac{\overline{Rz_0}^2}{12} \right) \right]$$

und $u(D) = 8,1 \text{ nm}$

9. Zusammenfassung der Messunsicherheit von Profiltiefe Pt und Rillentiefe D

Für die Beispielwerte wurde ein Tiefeneinstellnormal mit Nennwert von $Pt = 3 \mu\text{m}$ angenommen und für die Eingangsgrößen typische Werte eingesetzt.

Profiltiefe Pt , Auswertung ohne Filterung

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$\frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w}$	$s_w(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t}$	$s_t(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	5
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$\frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	33
6	Varianz der Profilpunkte	Summe dieser Spalte			$u^2(z_g)$	102,33
						Unsicher- heit [nm]
6	Unsicherheit der Profilpunkte				$u(z_g)$	10,1
7.1	Unsicherheit der Profiltiefe	$[2 \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot Pt_r^2]^{1/2}$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$,		$u(Pt)$	14,6
	Erweiterte Unsicherheit der Profiltiefe	$k \cdot u(Pt)$			$U(Pt)$	29,2

Rillentiefe D , Auswertung ohne Filterung

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \text{ } \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$\frac{s_w^2(D_m)}{m_w}$	$s_w(D_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t}$	$s_t(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	5
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}) \cdot \frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$ $n_h, n_l = 100$	1	A Rechteck	0,7
7.2	Profil- ausrichtung	$\frac{1}{12} \cdot (\frac{Pt_r}{2})^2$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$	1	A Rechteck	2,1
7.2	Varianz der Rillentiefe	Summe dieser Spalte			$u^2(D)$	72,13
						Unsicher- heit [nm]
7.2	Unsicherheit der Rillentiefe				$u(D)$	8,5
	Erweiterte Unsicherheit der Rillentiefe	$k \cdot u(D)$			$U(D)$	17

Profiltiefe Pt , Auswertung mit Filterung $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensitivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$f_s^2 \cdot \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w}$	$s_w(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	0,5
2	Topografie über Rillennlänge	$\frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t}$	$s_t(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	5
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$f_s^2 \cdot \frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	3,2
8	Varianz der Profilpunkte	Summe dieser Spalte			$u^2(z_s)$	68,03
						Unsicher- heit [nm]
8	Unsicherheit der Profilpunkte				$u(z_s)$	8,2
8.1	Unsicherheit der Profiltiefe	$[2 \cdot u^2(z_g) +$ $f_s^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot Pt_r^2]^{1/2}$	$Pt_r = 10 \text{ nm},$		$u(Pt)$	11,7
	Erweiterte Unsicherheit der Profiltiefe	$k \cdot u(Pt)$			$U(Pt)$	23,4

Rillentiefe D , Auswertung mit Filterung $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$f_s^2 \cdot \frac{s_w^2(D_m)}{m_w}$	$s_w(D_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	0,5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{s_t^2(Pt_m)}{m_t}$	$s_t(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_t = 5$	1	A Gauß	5
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$f_s^2 \cdot \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot \frac{Rz_0^2}{12}$	$Rz_0 = 20 \text{ nm}$ $n_h, n_l = 100$	1	A Rechteck	0,06
8.2	Profil- ausrichtung	$f_s^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$	1	A Rechteck	0,2
8.2	Varianz der Rillentiefe	Summe dieser Spalte			$u^2(D)$	65,09
						Unsicher- heit [nm]
8.2	Unsicherheit der Rillentiefe				$u(D)$	8,1
	Erweiterte Unsicherheit der Rillentiefe	$k \cdot u(D)$			$U(D)$	16,2

Anhang D: Messunsicherheit der Tiefe des Profils eines Tiefeneinstellnormals mit dem Range der Rillentiefe als Topografie-Term

Die in Kap. 2 des Anhanges A allgemein hergeleiteten Unsicherheitsquellen werden in diesem Beispiel auf die Gegebenheiten der Tiefeneinstellnormale übertragen. In den Beispielwerten wird ein Glasnormal mit einem Nennwert 3 µm angenommen.

1. Kalibrierfaktor

1.1 Bezugsnormal

Die Unsicherheit des Bezugsnormals (kalibriertes Tiefeneinstellnormal) ist laut Kalibriererschein z. B. $U_n = 10 \text{ nm}$, bei $k = 2$ ist

$$u^2(Pt_n) = \frac{U_n^2}{4} = 25 \text{ nm}^2$$

1.2 Unterschied Messort - Kalibrierort

$u^2(Pt_{my}) = \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$. Mit $a_y = 100 \text{ µm}$ und $G = 20 \text{ nm/mm}$ (Anhang A Bild 3) ist

$$u^2(Pt_{my}) = \frac{(100 \text{ µm})^2 \cdot (20 \text{ nm/mm})^2}{3} = 1,33 \text{ nm}^2$$

1.3 Wiederholpräzision

Als Schätzwert für die Unsicherheit bei der Antastung des Bezugsnormals wird die empirische Standardabweichung des Mittelwertes von Pt_m aus m_w Wiederholungsmessungen am selben Ort genommen:

$$u^2(b) = \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} = s_w^2(\overline{Pt_m}). \text{ Mit einem typischen Wert für die empirische Varianz}$$

$$s_w(\overline{Pt_m}) = 2 \text{ nm} \text{ ist } u^2(b) = 4 \text{ nm}^2.$$

2. Topografie des Normals

In Richtung der Längsachse ist die Rillentiefe des zu messenden Prüflings i. Allg. nicht konstant. Ein typischer Wert ist eine Schwankungsbreite von 20 nm. Daher wird die Rillentiefe an m_t verschiedenen Stellen der Rille bestimmt. Als Schätzwert für die Unsicherheitskomponente der Profilpunkte dient die Standardabweichung des Variationsbereiches $r(Pt_m)$, (r : „Range“) unter der Annahme einer Rechteckverteilung:

$$u^2(z_e) = s_t^2(Pt_m) = \frac{r^2(Pt_m)}{12}. \text{ Bei dieser Betrachtung steht also die wenig arbeitsaufwändige}$$

Weitergabe des Mittelwertes der Rillentiefe im Vordergrund, wobei auf eine genaue Positionierung der Messstelle verzichtet wird.

3. Führungsabweichung des Gerätes

Für die Führungsabweichungen im benutzten Bereich der Führung des Gerätes wird $Wt_0 \leq 20$ nm angenommen. Der Varianzbeitrag ist

$$u^2(z_{ref}) = \frac{Wt_0^2}{12} = \frac{(20 \text{ nm})^2}{12} = 33 \text{ nm}^2.$$

4. Grundrauschen

Das Grundrauschen auf einem Planglas sei $Rz_0 = 20$ nm.

$$u^2(z_{pl}) = \frac{Rz_0^2}{12} = 33 \text{ nm}^2.$$

5. Plastische Verformung

Bei einem Glasnormal ist die plastische Verformung vernachlässigbar klein.

6. Unsicherheit der Punkte des Gesamtprofils

Aus der Summe dieser Unsicherheiten ergibt sich die Varianz der Punkte des Gesamtprofils.

$$u^2(z_g) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} + \frac{r^2(Pt_m)}{12} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{Rz_0^2}{12}$$

Die ersten drei enthalten die Unsicherheit des Anschlusses, die letzten drei die Unsicherheitsbeiträge aus dem Messvorgang. Die Summanden dieser Gleichung sind in der Tabelle in Kapitel 9 aufgelistet. Mit den Beispielzahlenwerten aus den Kapiteln 1 bis 4 ergibt sich:

$$u(z_g) = 11,4 \text{ nm}.$$

7. Kennwertfunktion

7.1 Messunsicherheit der Profiltiefe Pt

Die Profiltiefe Pt ist im ausgerichteten Profil die Differenz zwischen dem höchsten z -Wert auf der Referenzebene (z_h) und dem tiefsten z -Wert im Rillengrund (z_l). Beim Ausrichten werden die Profilmomente unterschiedlich angehoben, wobei aufgrund von Rauheit und Ebenheitsabweichungen eine Ausrichtabweichung auftritt. Dadurch verändert sich die Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt abhängig davon, wo diese liegen, um maximal A . Der Erwartungswert von A ist im Mittel mehrerer Messungen null. Es gilt das Modell für Pt :

$$Pt = z_h - z_l + A.$$

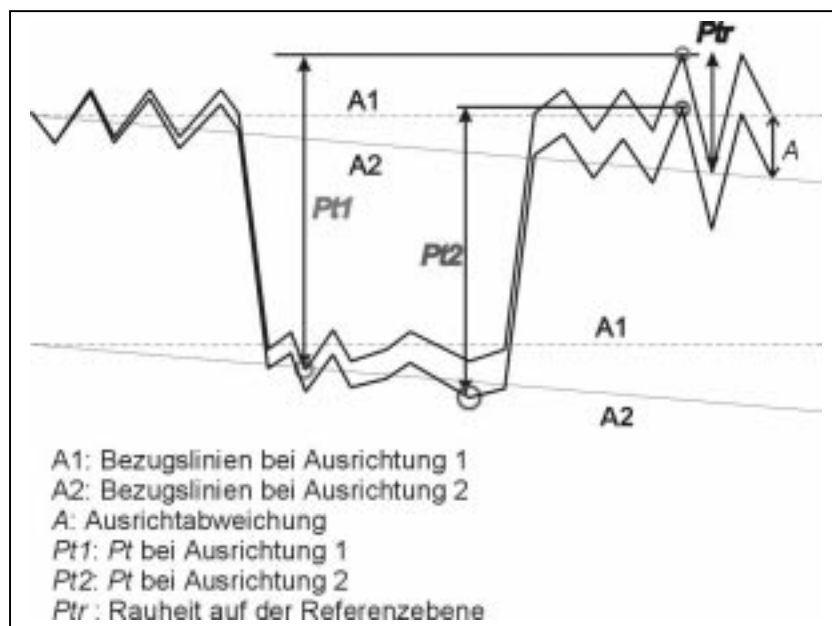


Bild 7: Unsicherheit von Pt durch Ausrichtabweichung

Für die Unsicherheit der Profiltiefe Pt gilt:

$$u^2(Pt) = \left(\frac{\partial Pt}{\partial z_h}\right)^2 \cdot u^2(z_h) + \left(\frac{\partial Pt}{\partial z_l}\right)^2 \cdot u^2(z_l) + \left(\frac{\partial Pt}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(A).$$

Die ersten beiden Sensitivitätskoeffizienten sind 1. Der dritte beschreibt im Prinzip den cosinus-Faktor, der sich mit der Ausrichtung ändert. Aufgrund der kleinen Winkel und deren Änderungen ist er ausreichend genau gleich eins. Die Unsicherheit der z -Werte $u(z_h)$ und $u(z_l)$ sind gleich der der Punkte des Gesamtprofils $u(z_g)$. Als Schätzwert für die Variabilität der Ausrichtabweichung $u(A)$ dient der Spitzenwert Pt_r der Rauheit bzw. die Ebenheitsabweichungen der Profilateile in den Referenzlinienabschnitten, die in die Auswertung einbezogen werden. Innerhalb von Pt_r wird eine Rechteckverteilung angenommen.

$$u^2(Pt) = 2 \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot (Pt_r)^2.$$

Auf Tiefeneinstellnormalen ist ein üblicher Wert für $Pt_r = 10$ nm. Damit bestimmt sich die Varianz von Pt

$$u^2(Pt) = 2 \cdot (11,4 \text{ nm})^2 + \frac{1}{12} \cdot (10 \text{ nm})^2,$$

und die Standardmessunsicherheit von Pt ist $u(Pt) = 16,4$ nm

Mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit zu $U(Pt) = 33$ nm.

7.2 Messunsicherheit der Rillentiefe D

Als Näherung für die Berechnung der Rillentiefe D entsprechend DIN EN ISO 5436-1 wird das folgende Modell angenommen. Am ausgerichteten Profil wird die Differenz der Mittelwerte der „Profilabschnitte oben“ und des „Profilabschnittes unten“ gebildet (Anhang A Bild 2). Werden die Referenzlinienabschnitte mit der Ausrichtabweichung A ausgerichtet, wird das Profil verzerrt und D verändert. Das Modell: $D = \bar{z}_h - \bar{z}_l + A$. Der Erwartungswert von A ist im Mittel mehrerer Messungen null.

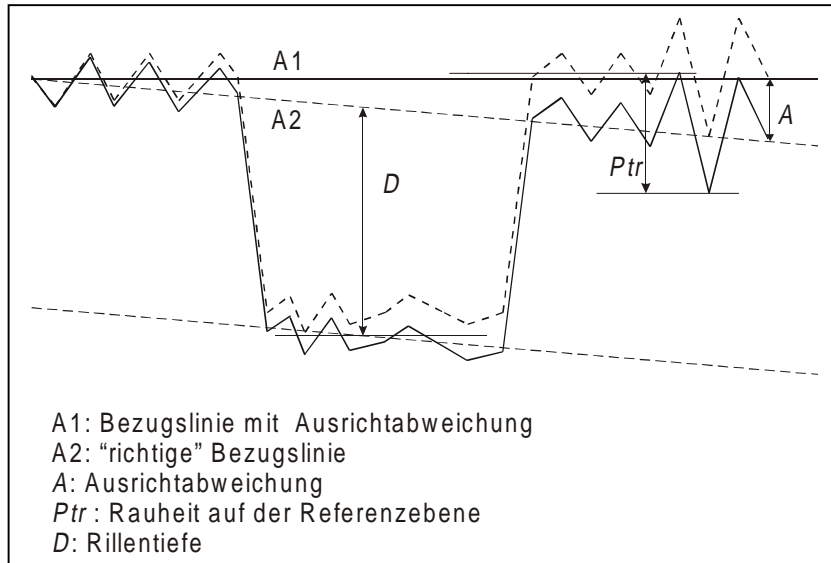


Bild 8: Unsicherheit von D durch Ausrichtabweichung

$$D = \frac{1}{n_h} \cdot \sum_{i=1}^{n_h} z_{ghi} - \frac{1}{n_l} \cdot \sum_{i=1}^{n_l} z_{gli} + A. \text{ Für die Unsicherheit gilt die Summenregel}$$

$$u^2(D) = \sum_{i=1}^{n_h} \left(\frac{\partial D}{\partial z_{ghi}} \right)^2 \cdot u^2(z_{ghi}) + \sum_{i=1}^{n_l} \left(\frac{\partial D}{\partial z_{gli}} \right)^2 \cdot u^2(z_{gli}) + \left(\frac{\partial D}{\partial A} \right)^2 \cdot u^2(A).$$

$$\frac{\partial D}{\partial z_{ghi}} = \frac{1}{n_h} \text{ für } i = 1 \text{ bis } n_h, \quad \frac{\partial D}{\partial z_{gli}} = \frac{1}{n_l} \text{ für } i=1 \text{ bis } n_l, \quad u(z_{ghi}), u(z_{gli}) = u(z_g).$$

Der Cosinus-Faktor $\frac{\partial D}{\partial A}$ ist bei den gegebenen kleinen Winkeln und deren Änderungen genügend genau 1.

Als Schätzwert für $u(A)$ gilt im Gegensatz zur Betrachtung der Unsicherheit von Pt die folgende Betrachtung: Aufgrund der Definition von D (Probenentnahme in der Mitte und am Rand des Profilschnittes) kann sich die Ausrichtabweichung nur mit dem halben Betrag von Pt_r auswirken.

$$u^2(D) = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2.$$

Die Mittelwertbildung über die Profilpunkte wirkt nur auf die zufälligen Abweichungen in z_g , so dass die Standardmessunsicherheit

$$u^2(D) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \frac{r^2(Pt_m)}{12} + \frac{Wt_0^2}{12} + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2 + \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot \left[\frac{\overline{Rz_0}}{12} \right]^2$$

$$u(D) = 10 \text{ nm.}$$

Mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ist die erweiterte Messunsicherheit $U(D) = 20 \text{ nm.}$

8. Auswertung mit Filterung

Bei der Auswertung mit λ_s wird die Unsicherheit der Punkte des Primärprofils durch den Glättungsfaktor f_s der Filterfunktion in Abhängigkeit vom kurzwelligen Tiefpassfilter λ_s und Messpunktabstand Δx verändert (Anhang A, Kapitel 4).

λ_s [μm]	Δx [μm]	f_s
2,5	0,5	0,55
8	1,5	0,53
8	0,5	0,31

Tabelle 1: Filterfaktoren für verschiedene Tiefpass-Filterwellenlängen.

Der Filterfaktor f_s wirkt sich nur auf die aktuell gemessenen zufälligen Größen aus, so dass für die Unsicherheit der Punkte des Primärprofils gilt:

$$u^2(z_s) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{r^2(Pt_m)}{12} + \frac{Wt_0^2}{12} + f_s^2 \cdot \left[\frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w} + \frac{\overline{Rz_0}^2}{12} \right]$$

Werden die gleichen Werte für die Eingangsgrößen wie in den Kapiteln 1 bis 4 eingesetzt, wird - bei einer Filterung mit $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$ und $\Delta x = 0,5 \mu\text{m}$ - $u(z_s) = 9,8 \text{ nm}$.

Bei der praktischen Berechnung ist darauf zu achten, welcher Natur die Eingangsgrößen sind: Wenn die Schätzwerte für die Eingangsgrößen (Pt_m , Pt_r , Wt_0 , Rz_0) aus bereits gefilterten Profildaten entstanden sind, ist in ihnen die Wirkung des kurzwelligen Tiefpassfilters bereits eingeschlossen. Werden die gefilterten Werte für die Berechnung von $u(z_s)$ gemäß der obigen Gleichung genommen, darf daher der Filterfaktor f_s nicht noch einmal angebracht werden. Das Berechnungsschema wird dann das gleiche wie in Kapitel 6, nur mit den Werten der gefilterten Eingangsgrößen.

8.1 Unsicherheit der Profiltiefe Pt

Aus der Unsicherheit der Profilpunkte und der Ausrichtabweichung ist

$$u^2(Pt) = 2 \cdot u^2(z_s) + \frac{1}{12} \cdot (Pt_r)^2$$

und $u(Pt) = 13,9 \text{ nm}$.

8.2 Unsicherheit der Rillentiefe D

Wie in Kap. 7.2 mittels der Algorithmus von D abschnittsweise über die gefilterten Profilpunkte.

$$u^2(D) = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot u^2(z_s) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2$$

Die Mittelung wirkt sich nur auf die zufälligen Abweichungen in den z_s aus, so dass

$$u^2(D) = \frac{U_n^2}{4} + \frac{a_y^2 \cdot G^2}{3} + \frac{r^2(Pt_m)}{12} + \frac{Wt_0^2}{12} + f_s^2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2} \right)^2 + \frac{s_w^2(D_m)}{m_w} + \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l} \right) \cdot \left(\frac{\overline{Rz_0}^2}{12} \right) \right]$$

und $u(D) = 9,6 \text{ nm}$

9. Zusammenfassung der Messunsicherheit von Profiltiefe Pt und Rillentiefe D

Für die Beispielwerte wurde ein Tiefeneinstellnormal mit Nennwert von $Pt = 3 \mu\text{m}$ angenommen und für die Eingangsgrößen typische Werte eingesetzt.

Profiltiefe Pt , Auswertung ohne Filterung

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$\frac{s_w^2(Pt_m)}{m_w}$	$s_w(Pt_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{r^2(Pt_m)}{12}$	$r(Pt_m) = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$\frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	33
6	Varianz der Profilpunkte	Summe dieser Spalte			$u^2(z_s)$	130,33
						Unsicher- heit [nm]
6	Unsicherheit der Profilpunkte				$u(z_s)$	11,4
7.1	Unsicherheit der Profiltiefe	$[2 \cdot u^2(z_g) + \frac{1}{12} \cdot Pt_r^2]^{1/2}$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$,		$u(Pt)$	16,4
	Erweiterte Unsicherheit der Profiltiefe	$k \cdot u(Pt)$			$U(Pt)$	33

Rillentiefe D , Auswertung ohne Filterung

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensi- tivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \text{ } \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$\frac{s_w^2(D_m)}{m_w}$	$s_w(D_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{r^2(Pt_m)}{12}$	$r(Pt_m) = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}) \cdot \frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$ $n_h, n_l = 100$	1	A Rechteck	0,7
7.2	Profil- ausrichtung	$\frac{1}{12} \cdot (\frac{Pt_r}{2})^2$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$	1	A Rechteck	2,1
7.2	Varianz der Rillentiefe	Summe dieser Spalte			$u^2(D)$	100,13
						Unsicher- heit [nm]
7.2	Unsicherheit der Rillentiefe				$u(D)$	10
	Erweiterte Unsicherheit der Rillentiefe	$k \cdot u(D)$			$U(D)$	20

Profiltiefe P_t , Auswertung mit Filterung $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensitivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$f_s^2 \cdot \frac{s_w^2(P_{t_m})}{m_w}$	$s_w(P_{t_m}) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	0,5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{r^2(P_{t_m})}{12}$	$r(P_{t_m}) = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	33
3	Führungs- abweichung	$\frac{W_{t_0}^2}{12}$	$W_{t_0} = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$f_s^2 \cdot \frac{\overline{Rz_0}^2}{12}$	$\overline{Rz_0} = 20 \text{ nm}$	1	A Rechteck	3,2
8	Varianz der Profilpunkte	Summe dieser Spalte			$u^2(z_g)$	96,03
						Unsicher- heit [nm]
8	Unsicherheit der Profilpunkte				$u(z_g)$	9,8
8.1	Unsicherheit der Profiltiefe	$[2 \cdot u^2(z_g) +$ $f_s^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot P_{t_r}^2]^{1/2}$	$P_{t_r} = 10 \text{ nm},$		$u(P_t)$	13,9
	Erweiterte Unsicherheit der Profiltiefe	$k \cdot u(P_t)$			$U(P_t)$	28

Rillentiefe D , Auswertung mit Filterung $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$

Kapitel	Eingangsgröße Stichwort	Berechnung der Eingangsgröße	Beispielwert	Sensitivitäts- koeff.	Ermittlungs- methode, Verteilung	Varianz [nm ²]
1.1	Bezugsnormal	$\frac{U_n^2}{4}$	$U_n = 10 \text{ nm}$ $k = 2$ aus Kalibrierschein	1	B Gauß	25
1.2	Unterschied Messort – Kalibrierort	$\frac{a_y^2 \cdot G^2}{3}$	$a_y = 100 \mu\text{m}$ $G = 20 \text{ nm/mm}$	1	B Rechteck	1,33
1.3	Wiederhol- Präzision	$f_s^2 \cdot \frac{s_w^2(D_m)}{m_w}$	$s_w(D_m) = 5 \text{ nm}$ $m_w = 5$	1	A Gauß	0,5
2	Topografie über Rillenlänge	$\frac{r^2(Pt_m)}{12}$	$r(Pt_m) = 20 \text{ nm}$	1	A	33
3	Führungs- abweichung	$\frac{Wt_0^2}{12}$	$Wt_0 = 20 \text{ nm}$	1	B Rechteck	33
4	Grundrauschen	$f_s^2 \cdot \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right) \cdot \frac{Rz_0^2}{12}$	$Rz_0 = 20 \text{ nm}$ $n_h, n_l = 100$	1	A Rechteck	0,06
8.2	Profilausrichtung	$f_s^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{Pt_r}{2}\right)^2$	$Pt_r = 10 \text{ nm}$	1	A Rechteck	0,2
8.2	Varianz der Rillentiefe	Summe dieser Spalte			$u^2(D)$	93,09
						Unsicher- heit [nm]
8.2	Unsicherheit der Rillentiefe				$u(D)$	9,6
	Erweiterte Unsicherheit der Rillentiefe	$k \cdot u(D)$			$U(D)$	20