

## **EINFLÜSSE BEIM PRÜFEN VON MASS-, FORM- UND LAGETOLERANZEN**

*A. Gubesch, M. Knauer*

### **Kurzfassung**

Werden beim Konstruieren enge Toleranzen festgelegt, sind beim Messen oftmals große Anstrengungen erforderlich, um Unsicherheiten zu erzielen, die für das Treffen abgesicherter Prüfentscheidungen ausreichend gering sind. In dem Beitrag werden anhand ausgesuchter Beispiele Einflüsse beim Prüfen von Maß-, Form- und Lagetoleranzen und ihre Auswirkung auf Meßergebnis und Meßunsicherheit dargestellt. Ziel ist es, aus den beim Messen im Regelfall zu erwartenden Unsicherheiten Richtwerte für eine prüfgerechte Toleranzfestlegung abzuleiten. Eine Toleranz kann dann als prüfgerecht angesehen werden, wenn die zu erwartende Meßunsicherheit bis maximal 1/5 der Toleranz beträgt.

### **1 Einleitung**

Dem Konstrukteur stehen beim Entwickeln eines Produktes vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten offen. Häufig scheinen mehrere Lösungsalternativen geeignet, die gesetzten Anforderungen an das zu konstruierende Produkt zu erfüllen. Mit zunehmendem Fortschritt in der Konzeptionierung des Entwurfs werden Konstruktionsalternativen, die aufgrund gegebener Randbedingungen, wie z.B. Fertigungsverfahren, Termine und Kosten als nicht vorteilhaft erkannt werden, verworfen. Die als optimal erachtete Alternative wird schließlich detailliert ausgearbeitet. Erst in dieser späten Phase des Konstruktionsprozesses werden Art und Wert der zur Sicherstellung der Werkstückfunktion erforderlichen Toleranzen spezifiziert. Ähnlich wie für das Entwerfen der Werkstückgestalt selbst, sind auch beim Tolerieren oftmals verschiedene Lösungen möglich. Das Finden der optimalen Lösung für eine Tolerierungsaufgabe bedeutet, die in Frage kommenden Fertigungs- und Prüfverfahren zu analysieren, ihre Leistungsgrenzen abzuschätzen und Toleranzen darauf abgestimmt festzulegen, wobei das Augenmerk immer auf das Erfüllen der Werkstückfunktion gerichtet ist.

In DIN EN ISO 14253 Teil 1 sind Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen festgelegt, die beim Prüfen von Werkstücken beachtet werden müssen [1]. Zur Erfüllung der Spezifikation ist es demnach nicht ausreichend, wenn ein Meßergebnis innerhalb der Toleranz liegt, sondern es wird gefordert, daß sich das Ergebnis im sogenannten „Übereinstimmungsbereich“ befindet. Der Übereinstimmungsbereich ergibt sich durch Verringern der Toleranzgrenzen um den Wert der Meßunsicherheit. Bei Maßen wird der Unsicherheitsbereich sowohl an der oberen, als auch an der unteren Toleranzgrenze abgezogen, bei Form- und Lagetoleranzen nur an der oberen Toleranzgrenze. Ist die Unsicherheit im Verhältnis zur Toleranz zu groß, wird der Übereinstimmungsbereich so gering, daß sichere Prüfentscheidungen und eine wirtschaftliche Fertigung nicht mehr möglich sind. Während Tabellenwerke mit den im Regelfall erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten einzelner Verfahren zum Stand der Technik gehören, sind in der überwiegenden Zahl der Fälle für die erreichbaren Meßunsicherheiten keine a-priori Werte verfügbar. Die Meßunsicherheit muß dann basierend auf den Kenntnissen über die jeweils geeigneten Meßverfahren unter Berücksichtigung der Auswirkungen verschiedener Einflüsse, resultierend aus dem Zusammenspiel von Meßgerät, Meßobjekt und Umgebungsbedingungen abgeschätzt werden. In der ISO-Richtlinie „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM“ [2] ist eine standardisierte Vorgehensweise angegeben, wie die Unsicherheit einer Meßgröße unter Berücksichtigung aller bekannten Einflußfaktoren

zu bestimmen ist. Im folgenden werden Einflüsse, die beim Messen geometrischer Kenngrößen auftreten, wie z.B. Temperatureinfluß, mechanische Filterwirkung der Tastkugel sowie Einflüsse beim Messen von Werkstücken auf Drehtischen beschrieben.

## 2 Temperatureinflüsse

Seitens der Umgebung stellen die Temperatur bzw. Abweichungen von der Referenztemperatur als zeitliche und örtliche Temperaturgradienten den bedeutendsten Einflußfaktor beim Messen dar. Werkstücke weisen die Eigenschaft auf, ihre Abmessungen in Abhängigkeit von der Temperatur zu verändern. Die Größe der jeweiligen Änderung wird durch einen werkstoffspezifischen Längenausdehnungskoeffizienten charakterisiert. Um vergleichbare Meßergebnisse zu erhalten, müssen Längenmessungen immer auf eine bestimmte Temperatur bezogen werden. In ISO 1 ist diese auf 20 °C festgelegt [3]. Beim Durchführen von Präzisionsmessungen in klimatisierten Meßräumen werden große Anstrengungen unternommen, um sicherzustellen, daß sowohl Meßobjekt als auch das verwendete Vergleichsnormale die Bezugstemperatur von 20 °C aufweisen. Die temperaturbedingte Längendifferenz zwischen Werkstück und Normal beträgt

$$\Delta L = L_0(\alpha_{WS} \cdot \Delta T_{WS} - \alpha_N \cdot \Delta T_N) \quad (1)$$

mit  $L_0$ : Länge bei 20 °C,  $\alpha_{WS}$ ,  $\alpha_N$ : Längenausdehnungskoeffizient des Werkstücks bzw. des Normals,  $\Delta T_{WS}$ ,  $\Delta T_N$ : Abweichung der Werkstücktemperatur bzw. der Temperatur des Normals von 20 °C.

Formel (1) wird bei Messungen mit hohen Anforderungen an die erreichbare Genauigkeit zur rechnerischen Korrektur des Ergebnisses verwendet, wenn die Werte für Temperatur und Längenausdehnungskoeffizient von Werkstück und Normal bekannt sind. Tatsächlich sind diese Werte selbst mit Unsicherheiten behaftet. Um die Auswirkung der unsicheren Kenntnis von Temperatur und Längenausdehnungskoeffizient auf das Meßergebnis abzuschätzen, kann Beziehung (1) als Modellgleichung für die Größe  $\Delta L$  aufgefaßt werden und ein Unsicherheitsbudget entsprechend der Vorgehensweise des GUM für die Ermittlung der Gesamtunsicherheit dieser Größe aufgestellt werden. Die kombinierte Standardunsicherheit  $u_c$  der Längenänderung berechnet sich aus den Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen  $u_i$  jeweils multipliziert mit dem dazugehörigen Sensitivitäts- oder Empfindlichkeitskoeffizienten  $c_i$  gemäß

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_i)^2} \quad (2)$$

Eingangsgröße	Standardunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient $c_i$	Unsicherheitsbeitrag
Bezugslänge $L_0$	$u_{L_0}$	$\alpha_{WS} \cdot \Delta T_{WS} - \alpha_N \cdot \Delta T_N$	$c_1 \cdot u_{L_0}$
Temperatur Werkstück	$u_{T_{WS}}$	$L_0 \cdot \alpha_{WS}$	$c_2 \cdot u_{T_{WS}}$
Ausdehnungskoeffizient Werkstück	$u_{\alpha_{WS}}$	$L_0 \cdot \Delta T_{WS}$	$c_3 \cdot u_{\alpha_{WS}}$
Temperatur Normal	$u_{T_N}$	$L_0 \cdot \alpha_N$	$c_4 \cdot u_{T_N}$
Ausdehnungskoeffizient Normal	$u_{\alpha_N}$	$L_0 \cdot \Delta T_N$	$c_5 \cdot u_{\alpha_N}$

**Tabelle 1** Temperaturbedingte Unsicherheitsbeiträge bei Längenmessungen

Im vorliegenden Fall sind die in Tabelle 1 enthaltenen Größen relevant und es resultiert

$$u_c = \sqrt{(c_1 \cdot u_{L_0})^2 + (c_2 \cdot u_{TWS})^2 + (c_3 \cdot u_{\alpha WS})^2 + (c_4 \cdot u_{TN})^2 + (c_5 \cdot u_{\alpha N})^2} \quad (3)$$

Die Unsicherheitskomponente  $u_{L_0}$  hat den Wert Null, da die Länge des Werkstücks bei 20 °C als konstant angesehen wird. In Tabelle 2 sind Werte für die Unsicherheit der Längenänderung  $\Delta L$  für eine Bezugslänge von 100 mm unter der Annahme, daß Werkstück und Normal aus gleichem Werkstoff, z.B. Stahl (Längenausdehnungskoeffizient  $11,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , relative Unsicherheit 0,1) bestehen, zusammengefaßt. Bei Vorliegen der gleichen Temperatur und des gleichen Längenausdehnungskoeffizienten für Werkstück und Normal ist die Längendifferenz  $\Delta L$  gleich Null. Dennoch ist in weiteren Berechnungen ein Unsicherheitsbeitrag resultierend aus der unsicheren Kenntnis der tatsächlichen Werte zu berücksichtigen (vorletzte Spalte in Tabelle 2).

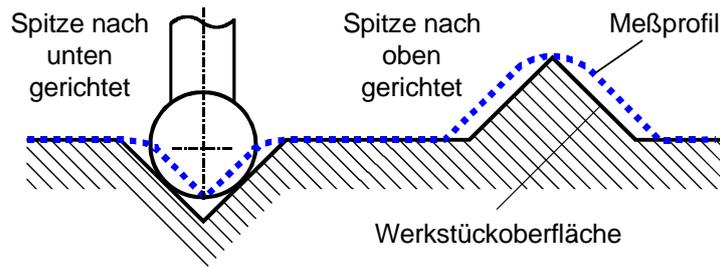
$L_0$ mm	$T_{WS}$ °C	$u_{TWS}$ °C	$\alpha_{WS}$ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$u_{\alpha WS}$ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$T_N$ °C	$u_{TN}$ °C	$\alpha_N$ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$u_{\alpha N}$ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$u_c$ µm	$u_{\Delta L}$ µm
100	20	0,1	11,6	1,16	20	0,1	11,6	1,16	0,16	0,0
100	20	0,5	11,6	1,16	20	0,5	11,6	1,16	0,82	0,0
100	20	1,0	11,6	1,16	20	1,0	11,6	1,16	1,64	0,0
100	21	0,1	11,6	1,16	20	0,1	11,6	1,16	0,20	0,67
100	21	0,5	11,6	1,16	20	0,5	11,6	1,16	0,83	0,67
100	21	1,0	11,6	1,16	20	1,0	11,6	1,16	1,65	0,67

**Tabelle 2** Beispiele für Unsicherheit der temperaturbedingten Längenänderung

Besteht ein Temperaturunterschied zwischen Werkstück und Normal, kann zur Kompensation der temperaturbedingten Längenänderung die Korrekturformel (1) angewandt werden. In die Unsicherheitsbewertung des Ergebnisses muß dennoch die Unsicherheit der Korrektur gemäß der vorletzten Spalte aus Tabelle 2 einbezogen werden. Findet keine rechnerische Kompensation des Temperatureinflusses statt, muß in die Unsicherheitsbetrachtung auch ein Anteil resultierend aus dem Wert der Längendifferenz  $\Delta L$  einbezogen werden (letzte Spalte in Tabelle 2). Die dann resultierende Standardunsicherheit würde sich wieder durch quadratische Addition von  $u_c$  und  $u_{\Delta L}$  ergeben.

### 3 Filterwirkung der Tastkugel

In der taktilen Meßtechnik werden Meßpunkte durch Antasten der Werkstückoberfläche mit einem Taster erfaßt. In der Oberflächenmeßtechnik werden Rauheitsprofile im Tastschnittverfahren üblicherweise mit Tastnadeln mit einem Spitzenradius von etwa 2 bis 10 µm gemessen [4]. In der Form- und Koordinatenmeßtechnik kommen meistens Tastkugeln mit einem Tastkugeldurchmesser größer als 0,5 mm zum Einsatz. Je größer der Tastkugeldurchmesser ist, um so stärker ist die mechanische Filterwirkung der Tastkugel auf das gemessene Profil, da größere Tastkugeln in Oberflächenvertiefungen nicht vollständig eindringen können. Am Beispiel einer 45° Spitze sind Einflüsse, die beim Antasten des Oberflächenprofils mit einer Tastkugel vorkommen, dargestellt (Bild 1). Die nach unten gerichtete Spitze wird in ihrer Amplitude nicht vollständig erfaßt, das Eindringen der Tastkugel in die Spitze erfolgt mit Verzögerung, was zum Abrunden der Winkelauslaufecken führt. Die Amplitude der nach oben gerichteten Spitze wird vollständig erfaßt, die gemessene Spitze ist allerdings abgerundet und in Profilrichtung verbreitert.



**Bild 1** Filterwirkung der Tastkugel beim Messen von Oberflächenprofilen

Ein eigens dafür entwickeltes Programm ermöglicht es, den Einfluß des Tastkugeldurchmessers beim Antasten eines Geraden-Profiles auf das resultierende Meßprofil zu untersuchen und in einer Animation zu visualisieren. Das Geraden-Profil kann z.B. das Ergebnis einer Rauheitsmessung an einem für den jeweiligen Herstellungsprozeß repräsentativen Werkstück sein. Mittels der Simulation mit verschiedenen Tastkugeldurchmessern, kann untersucht werden, wie stark Anteile des Oberflächenprofils durch die mechanische Filterwirkung der Tastkugel bei Koordinaten- oder Formmessungen unterdrückt werden.



**Bild 2** Einfluß des Tastkugeldurchmessers auf die gemessene Formabweichung eines Oberflächenprofils

In dem simulierten Oberflächenprofil aus Bild 2 sind Abweichungen enthalten, die der Oberflächenrauheit, der Welligkeit und der Form zuzuordnen sind. Die Auswertung der Meßpunkte des Originalprofils ergibt eine Geradheitsabweichung von  $326 \mu\text{m}$ , die Formabweichung der Profile, die sich nach dem Messen mit Tastern mit einem Durchmesser von 1 bzw. 3 mm ergeben, beträgt nur noch 188 bzw.  $159 \mu\text{m}$ . Am Zahlenbeispiel wird erkennbar, wie die Entscheidung für einen der beiden Taster, unter Umständen beim Prüfen der Geradheitstoleranz, das Prüfergebn beeinflusst. Wäre als Toleranzwert z.B.  $170 \mu\text{m}$  vorgegeben und eine Meßunsicherheit von  $5 \mu\text{m}$  zu erwarten, würde die Messung mit dem Tasterdurchmesser von 3 mm zu einem positiven Prüfergebn führen (das Ergebnis liegt innerhalb des Übereinstimmungsbereichs), während bei dem kleineren Tasterdurchmesser das gleiche Werkstück die Spezifikation nicht erfüllt, da die gemessene Formabweichung außerhalb des Übereinstimmungsbereichs liegt.

### 3 Einfluß von Verkippung und Exzentrizität beim Messen mit Drehtischgeräten

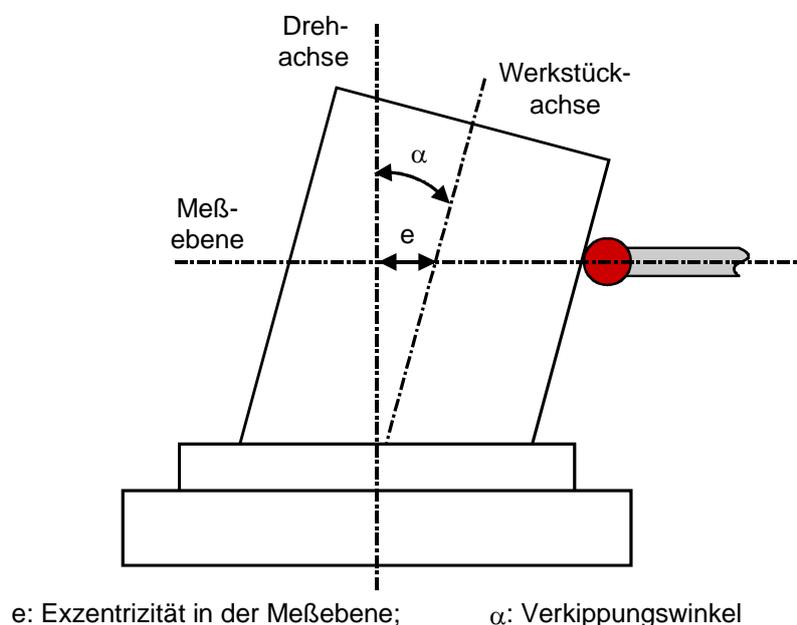
Drehtische mit einer Präzisionsdrehachse sind in vielen Fällen das Kernstück klassischer Formprüfgeräte. Darüber hinaus finden Drehtische Anwendung als Zusatzausrüstung kartesischer Koordinatenmeßgeräte. Hierbei können zwei Einsatzgebiete unterschieden werden. Zum einen werden Drehtische nur als Positionierhilfe verwendet, wodurch sich Vorteile beim Messen ergeben, wie z.B. kürzere Meßzeiten oder Verzicht auf kompliziert aufgebaute Tasterkonfigurationen. Die Rotationsachse wird dabei nicht als Meßachse verwendet.

Zum anderen wird die Rotationsachse des Drehtisches als echte Meßachse zusätzlich zu den kartesischen Geräteachsen genutzt. Das Messen mit mehreren gleichzeitig bewegten Achsen hat im Allgemeinen eine Vergrößerung der Meßunsicherheit zur Folge, da in diesem Fall mehrere Komponenten zur Gesamtunsicherheit beitragen.

Die zu messenden Werkstücke werden auf dem Drehtisch in der Regel in einem Backenfutter oder zwischen Spitzen eingespannt. Das Spannen zwischen Spitzen erfordert eine präzise Ausrichtung von Spitze und Gegenspitze sowie das Vorhandensein von Zentrierbohrungen an den Werkstücken. Beim Spannen im Futter ist immer damit zu rechnen, daß die Werkstückachse nicht genau mit der Drehachse übereinstimmt. Zur Kompensation des Aufspannfehlers kommen zwei unterschiedliche Konzepte zum Einsatz. In der Formprüftechnik wird grundsätzlich mechanisch ausgerichtet, d.h. das Werkstück wird auf dem Drehtisch solange gekippt und zentriert, bis der verbleibende Aufspannfehler eine vorgegebene Grenze unterschreitet. Die Meßtechnik mit Koordinatenmeßgeräten bezieht sich auf ein möglichst ideales Koordinatensystem. Dies gilt auch für die zusätzliche Drehachse [5], d.h. ein mechanisches Ausrichten ist nicht unbedingt erforderlich, es muß lediglich ein Werkstück-Koordinatensystem bestimmt werden, auf das sich nachfolgende Messungen beziehen. Unabhängig davon, welches der beiden Verfahren angewendet wird, verursacht der verbleibende Aufspannfehler Meßabweichungen, die sich im Meßergebnis auswirken. Mögliche Gründe für eine unvollkommene Ausrichtung sind

- Formabweichung der Meßelemente, aus denen die Bezugsachse berechnet wird,
- Antastfehler und Antastunsicherheit beim Messen,
- Art der verwendeten Auswerteverfahren.

Der Bedienerinfluß ist, bis auf die Möglichkeit Meßparameter, wie z.B. Meßgeschwindigkeit und Meßkraft einzustellen, bei einem automatisierten Meßablauf vernachlässigbar.

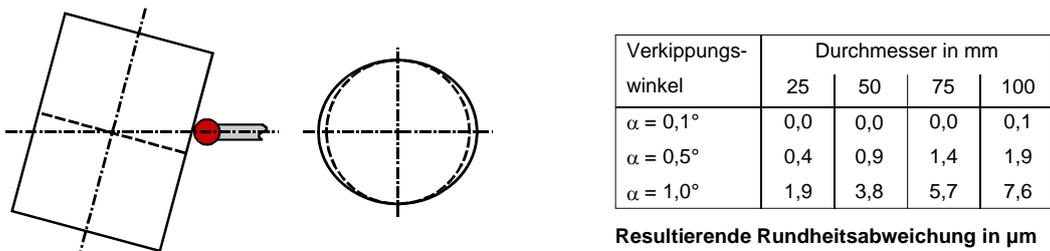


### Bild 3 Aufspannfehler eines Werkstücks auf einem Drehtisch

Der Aufspannfehler setzt sich im Allgemeinen aus zwei Komponenten zusammen: der Exzentrizität und der Verkippung (Bild 3). Die Exzentrizität in einer bestimmten Meßebene ist gleich dem Abstand zwischen den Durchstoßpunkten der Werkstückachse und der

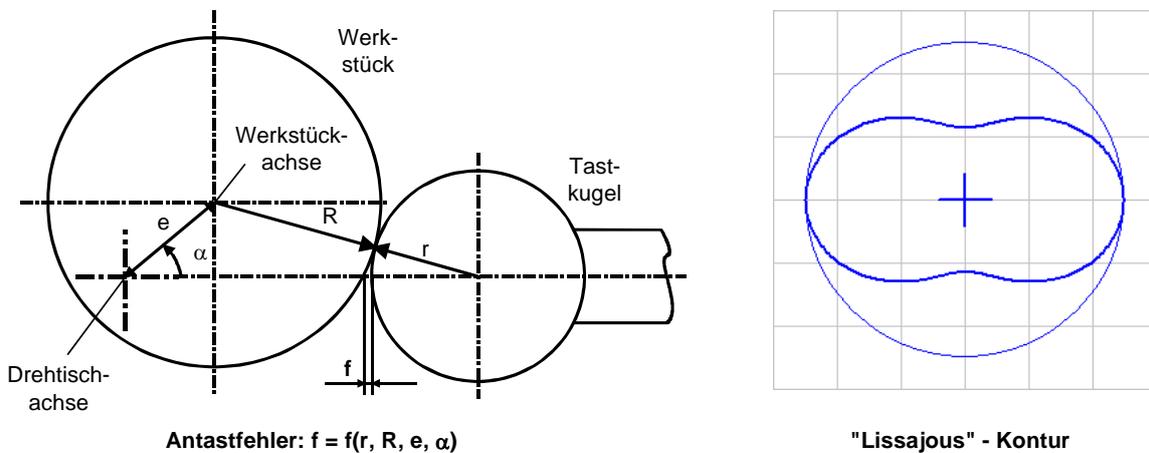
Drehachse in dieser Ebene, die Verkippung ist definiert durch den Raumwinkel zwischen Werkstück- und Drehachse.

Aufgrund der Verkippung wird bei einer Rundheitsmessung anstelle eines Kreisprofils ein elliptisches Profil gemessen. Als Folge davon wird z.B. an einem idealen Kreiszylinder eine scheinbare Rundheitsabweichung gemessen. Der Wert dieser Meßabweichung ist direkt proportional zum Durchmesser des Meßobjekts, d.h. der Effekt ist insbesondere bei Werkstücken mit großen Durchmessern von Bedeutung (Bild 4).



**Bild 4** Infolge der Verkippung auftretende Rundheitsabweichung

Wird bei Rundheitsmessungen ein Meßtaster verwendet, der nur gegenüber Auslenkungen in radialer Richtung empfindlich ist, entsteht bei exzentrischer Werkstücklage ein Antastfehler. Die Größe des Antastfehlers ist abhängig von dem Radius des Werkstücks, dem Radius der Tastkugel, der Wert der Exzentrizität sowie der Winkellage des Drehtisches in Bezug zur Antastrichtung. Wird dieser Antastfehler für eine komplette Umdrehung in einem Polardiagramm aufgetragen, entsteht eine sogenannte „Lissajous“-Kontur (Bild 5).



**Bild 5** Antastfehler bei exzentrischer Werkstücklage; „Lissajous“-Kontur

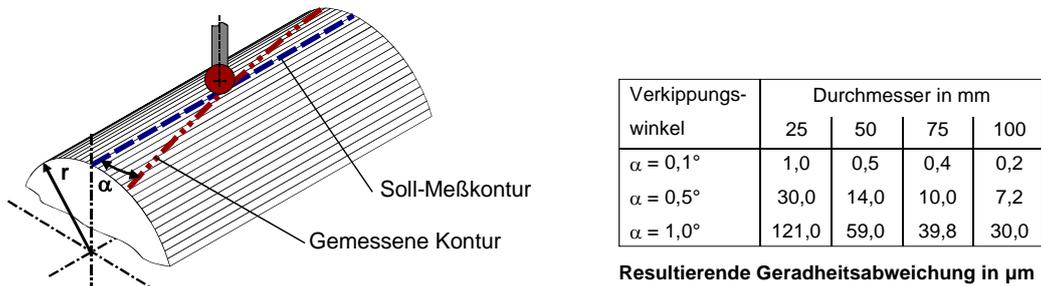
Die durch den Antastfehler verursachte Rundheitsabweichung ist bei kleinen Exzentrizitäten vernachlässigbar gering, steigt jedoch mit zunehmender Exzentrizität stark an (Tabelle 3).

Geometrieparameter	Werkstückdurchmesser = 20 mm; Tastkugeldurchmesser = 5 mm				
Exzentrizität in mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Rundheitsabweichung in $\mu\text{m}$	0,4	1,6	3,6	6,4	10,0

**Tabelle 3** Durch Antastfehler verursachte Rundheitsabweichung bei exzentrischer Werkstücklage

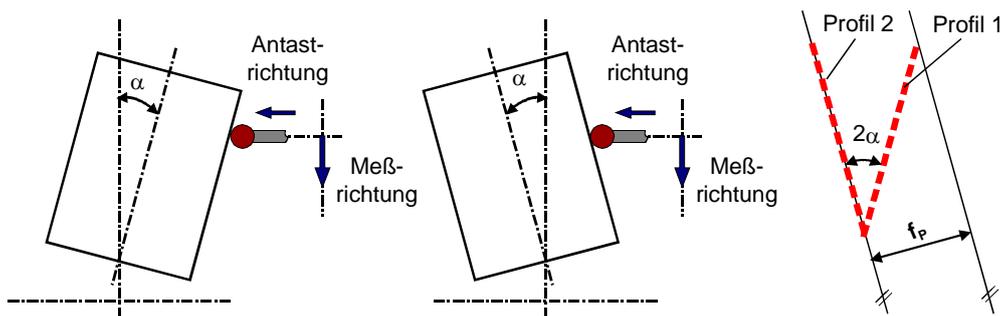
Verkippung des Werkstücks bewirkt beim Messen der Geradheit von Zylindermantellinien Abweichungen, die vom Verkippungswinkel, der Werkstücklage, der Meßlänge und dem

Zylinderdurchmesser abhängig sind. In Bild 6 sind Werte für die durch Verkipfung verursachte Geradheitsabweichung für eine Meßlänge von 200 mm angegeben.



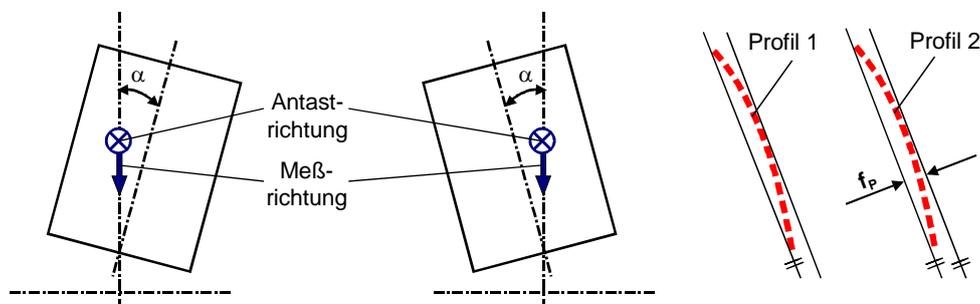
**Bild 6** Durch Verkipfung verursachte Geradheitsabweichung einer Zylindermantellinie

Beim Messen der Parallelität gegenüberliegender Zylindermantellinien sind verschiedene Meßverfahren möglich. Zum einen kann nach dem Messen der ersten Mantellinie der Drehtisch um  $180^\circ$  gedreht werden, um die zweite Mantellinie zu messen, zum anderen kann das Tastsystem nach dem Messen der ersten Mantellinie in eine andere Meßlage positioniert werden, um die gegenüberliegende Mantellinie zu messen. Im ersten Fall wirkt sich der Verkipfungsfehler je nach Drehtischstellung als Form- und Lageabweichung aus, im zweiten Fall nur als Formabweichung, die ebenfalls abhängig von der Kipprichtung des Werkstücks in Bezug zu der Meßrichtung ist.



**Bild 7** Parallelitätsabweichung von Zylindermantellinien als Lageabweichung (Fall A)

Die Parallelitätsabweichung für den im Bild 7 dargestellten Fall ist abhängig vom Verkipfungswinkel und der Meßlänge. Beim Messen eines elliptischen Profils infolge der Schräglage des Zylinders (Bild 8) spielen neben den zuvor genannten Faktoren auch der Zylinderdurchmesser sowie die Lage des (evtl. projizierten) Schnittpunktes von Werkstückachse und Drehachse eine Rolle.



**Bild 8** Parallelitätsabweichung von Zylindermantellinien als Formabweichung (Fall B)

In Tabelle 4 sind exemplarisch Werte für die durch Verkippung verursachte Parallelitätsabweichung für einen Zylinder mit einem Durchmesser von 50 mm in Abhängigkeit vom Verkippungswinkel und der Zylinderhöhe angegeben.

Verkippung	Fall A				Fall B			
	Zylinderhöhe in mm				Zylinderhöhe in mm			
	50	100	150	200	50	100	150	200
$\alpha = 0,1^\circ$	174	349	524	698	0,0	0,1	0,2	0,3
$\alpha = 0,5^\circ$	872,6	1.745,2	2.617,9	3.490,5	0,5	1,9	4,3	7,7
$\alpha = 1,0^\circ$	1.745,0	3.489,9	5.234,9	6.979,9	1,9	7,7	17,3	30,8

**Tabelle 4** Parallelitätsabweichung von Zylindermantellinien in  $\mu\text{m}$  infolge von Verkippungen

## 4 Zusammenfassung

Die Meßunsicherheit muß beim Prüfen von Werkstücken gemäß den in ISO 14253 Teil 1 festgelegten Entscheidungsregeln berücksichtigt werden. Ist die Meßunsicherheit im Verhältnis zur Toleranz zu groß, lassen sich abgesicherte Prüfentscheidungen nicht mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand treffen. Einflüsse beim Messen haben Unsicherheiten zur Folge, die nicht beliebig reduziert werden können. So treten beispielsweise alleine infolge der Temperatur Unsicherheiten von weniger als einem bis hin zu mehreren  $\mu\text{m}$  auf, je nachdem welche Bedingungen beim Messen vorherrschen. Weitere Unsicherheitsanteile seitens des Meßgerätes und seitens des Meßobjekts tragen je nach Meßaufgabe zur Vergrößerung der Gesamtunsicherheit bei. Beim Definieren von Toleranzen, insbesondere wenn zur Gewährleistung der Werkstückfunktion enge Toleranzen erforderlich sind, sollte die beim Messen zu erwartende Unsicherheit stets mit bedacht werden und Toleranzwerte so festgelegt werden, daß durch sie definierte Merkmale sicher geprüft werden können.

### Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 14253-1 *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen. Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen*, 1999
- [2] ISO (Hrsg.) : *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva, 1995
- [3] ISO 1 *Standardbezugstemperatur für industrielle Längenmessungen*, April 1975
- [4] DAGNALL, H.: *Prüfung von Oberflächen*. Leicester: Rank Taylor Hobson Ltd., 1990
- [5] NEUMANN, H. J.: Genauigkeitskenngrößen für Drehtische auf Koordinatenmeßgeräten. In: Neumann, H. J: *Koordinatenmeßtechnik*. Ehningen: Expert, 1993, S. 72 - 89

### Autoren

Dipl.-Ing. A. Gubesch  
Tel.: 09131/8526546  
gubesch@qfm.uni-erlangen.de

Dipl.-Inf. M. Knauer  
Tel.: 09131/8526515  
knauer@qfm.uni-erlangen.de

<http://www.qfm.uni-erlangen.de>

Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmeßtechnik  
Nägelsbachstraße 25  
91052 Erlangen