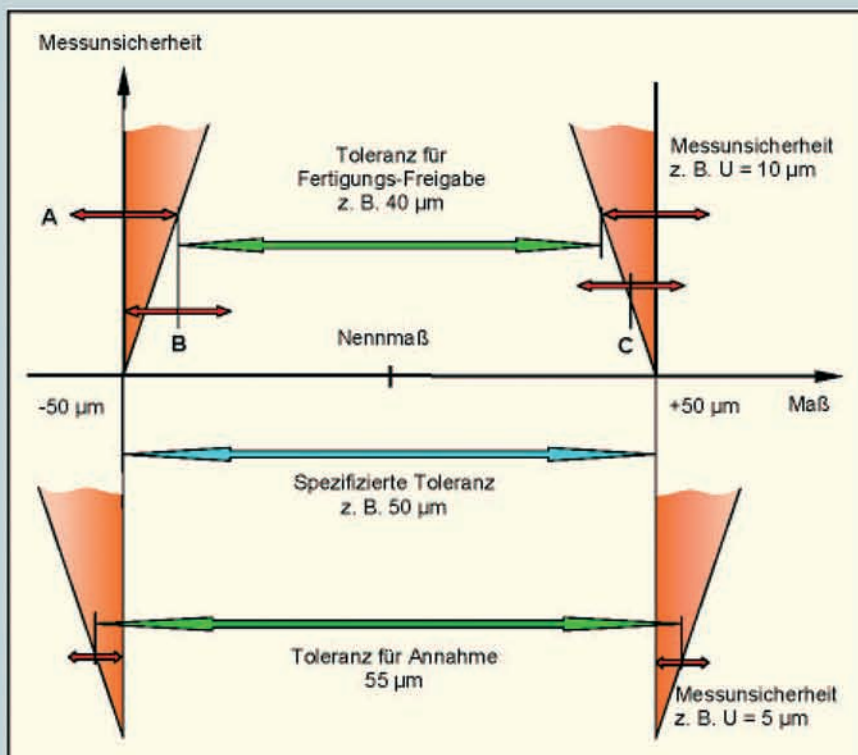


Ralf Christoph, Hans Joachim Neumann

## Zweierlei Maß ?

### Messunsicherheit im Fertigungsprozess



Werth Messtechnik GmbH  
 Siemensstr. 19  
 35394 Gießen  
 Telefon: +49-(0)641-7938-0  
 Telefax: +49-(0)641-7938-719  
 E-Mail: mail@werth.de  
 Internet: www.werth.de

# Zweierlei Maß ?

## Messunsicherheit im Fertigungsprozess

Ralf Christoph, Gießen;  
Hans Joachim Neumann,  
Oberkochen

Jeder Messtechniker kennt die so genannte „Goldene Regel“ [1], nach der die Messunsicherheit vorzugsweise höchstens ein Zehntel der Toleranz betragen sollte. Zur Zeit der Definition dieser Regel ging man davon aus, dass bei ihrer Einhaltung die Messunsicherheit vernachlässigt werden kann. Diese Betrachtungsweise ist auch heute noch weit verbreitet.

Ein besseres Verständnis der Zusammenhänge erlaubt jedoch eine differenziertere Vorgehensweise. Die Analyse der Messunsicherheit wird zum Bestandteil der Messung. Hierdurch wird den erhöhten Anforderungen durch die immer kleiner werdenden Toleranzen bei einer wirtschaftlichen Fertigung Rechnung getragen. In neueren Normen ist die Berücksichtigung der Messunsicherheit in bezug auf das Messergebnis bereits vorgeschrieben.

### Messunsicherheit berücksichtigen

Jede Messung enthält eine Messunsicherheit  $U$ , um die der angezeigte Wert zu groß oder zu klein sein kann. Die Definition der Unsicherheit schließt sowohl zufällige als auch systematische Abweichungen ein. Sie werden meist nicht unterschieden, sondern der Einfachheit halber nur in ihrer Summe betrachtet.

Trotz immer kleinerer Toleranzen wird die Messunsicherheit noch allzu oft vernachlässigt. Vor allem beim Einsatz von Koordinatenmessgeräten (KMG) ist die Ermittlung der Messunsicherheit nicht immer einfach. Sie muss für jedes zu messende Merkmal, wie z. B. den Abstand zweier Bohrungen oder eine Winkelmessung, separat bestimmt werden. So kann man versucht sein, das Vorhandensein der Messunsicherheit zu verdrängen. Um dies zu kompensieren, werden zur Sicherheit durch die Konstruk-

Die Messunsicherheit wirkt sich auf die Freigabetoleranz in der Qualitätssicherung und die tatsächlich nutzbare Toleranz in der eigenen Fertigung und bei den Zulieferern aus. Dabei kann es nicht zweierlei Maß für die Interpretation der Zeichnungstoleranz geben. Zwei Wege führen aus der Situation.

tionsabteilungen Toleranzen unnötig eng gewählt („Angsttoleranzen“), oder es treten undefinierte technische Probleme bei Montage oder Funktion der gefertigten Komponenten auf.

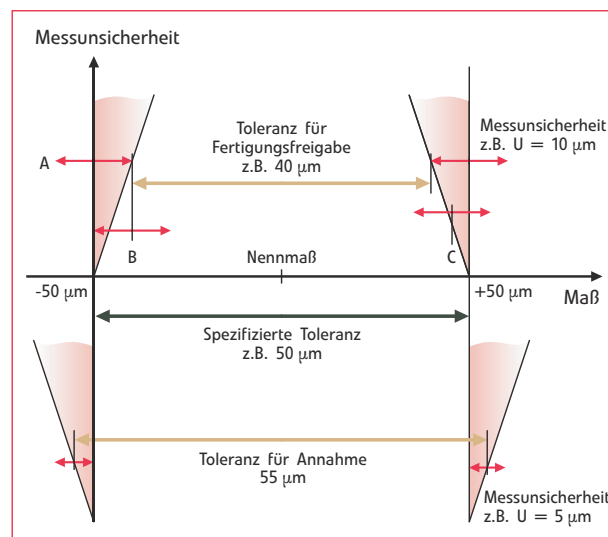
Will man vermeiden, dass an den Toleranzgrenzen Teile freigegeben werden, die außer Toleranz sind, muss die jeweils vorhandene Messunsicherheit berücksichtigt werden. Die schon länger bekannte Vorgehensweise wurde in vielen Beiträgen behandelt [1, 2, 3]. Doch erst die ISO-Norm 14253-1 [4], die beschreibt, wie die Messunsicherheit in die Gut-Schlecht-Entscheidungsfindung einzubinden ist, führte zu einer intensiven Auseinandersetzung in der Fachwelt.

Basierend auf der linearen grafischen Darstellung in dieser Norm wurde in vielen Fachbeiträgen eine andere grafische Darstellung gewählt. Sie stellt die Messunsicherheit als Dreiecke, jeweils abhängig vom zu messenden Merkmal bzw. von der eingesetzten Messtechnik, dar.

Um das Verständnis der folgenden Überlegungen zu erleichtern, sei zuerst die übliche Darstellung in etwas abgewandelter Form betrachtet (Bild 1).

Durch die Dreiecke wird eine variable Messunsicherheit dargestellt und dadurch der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Messunsicherheit und Toleranz verdeutlicht. Die gleitende Farbtönung soll andeuten, dass für die Messunsicherheit, die sich immer aus vielen Komponenten zusammensetzt, selten eine Gleichverteilung, sondern eher eine Gaußverteilung vorliegt.

Im oberen Teil in Bild 1 sind die Zusammenhänge für die Bestimmung der Fertigungs-Freigabetoleranz dargestellt. Es wurde beispielhaft ein Verhältnis von Toleranz (in diesem Beispiel  $50\ \mu\text{m}$ ) zu Messunsicherheit von 5 zu 1 gewählt, welches durchaus realistisch sein kann. Die Messunsicherheit ist im Bild durch die Doppelpfeile A dargestellt. Soll mit Sicherheit vermieden werden, dass nicht toleranzhaltige Teile freigegeben werden, muss die Freigabetoleranz beidseitig um die Messunsicherheit eingeschränkt werden. Bei Serienteilen geschieht das nach einer vorausgegangenen Abschätzung der Messunsicherheit für jedes Merkmal am besten durch Änderung der Zeichnungstoleranzen in den



**Bild 1. Einfluss der Messunsicherheit auf die Freigabetoleranz (einzuhaltende Fertigungstoleranz) und auf die Toleranz für die Annahme von zugefertigten Teilen**

Prüfplänen. Im Zahlenbeispiel in Bild 1 beträgt nach Abzug der Messunsicherheit die verbleibende Freigabetoleranz noch  $40\ \mu\text{m}$ .

Anhand der Grenzfälle seien die Auswirkungen der eingeengten Freigabetoleranz nochmals verdeutlicht (Bild 1). Nimmt man an, die Messergebnisse lägen an den Freigabetoleranzgrenzen B (im Bild nur auf einer Seite dargestellt), können Maße im ungünstigsten Fall gerade noch an den spezifizierten Toleranzgrenzen liegen oder im günstigsten Fall innerhalb der Toleranz. Das bedeutet: Keine Teile außerhalb der Toleranz werden freigegeben. Der kritischere Fall tritt ein, wenn die tatsächlichen Maße wie bei C innerhalb der Messunsicherheitsdreiecke liegen. Sie wären dann zwar in

liche Vorgehensweisen des wirtschaftlichen Handelns und gegen eine verantwortungsbewusste Qualitätssicherung. Die Behandlung der Messunsicherheit zwischen Abnehmer und Zulieferer muss deshalb besonders geregelt werden.

### Toleranzfestlegung im Verhältnis Abnehmer – Zulieferer

Da der Abnehmer die Messunsicherheit seiner in der Wareneingangskontrolle installierten Geräte nicht dem Zulieferer anlasten und somit erst reklamieren kann, wenn die um seine Messunsicherheit erweiterten Toleranz-Grenzwerte überschritten werden, führt dieses Vorgehen zu einem Widerspruch. Es kann nicht – je nach Art des Entscheidungs-

sicherheit  $U_Z$  des Zulieferers. Für den Zulieferer wird als Vertragstoleranz die für das entsprechende Merkmal spezifizierete Toleranz um die Messunsicherheit des Abnehmers eingeschränkt:

- Vertragstoleranz = Spezifizierte Toleranz – Messunsicherheit Abnehmer
- Freigabetoleranz Zulieferer = Vertragstoleranz – Messunsicherheit Zulieferer

Für die Qualitätskontrolle beim Zulieferer ist die weitere Einengung der Toleranz um seine eigene Messunsicherheit erforderlich. Durch die Vertragstoleranz schränkt sich seine Freigabetoleranz zusätzlich um die Messunsicherheit des Abnehmers ein. Selbst wenn die Messunsicherheit des Abnehmers, wie im Zahlenbeispiel in Bild 2 gezeigt, deutlich geringer als die des Zulieferers ist, ergibt sich eine Reduzierung der Freigabetoleranz auf  $34\ \mu\text{m}$ . Man sieht auch hier wieder, dass genaueres Messen die Fertigungskosten reduzieren kann.

Der Abzug der Messunsicherheit des Abnehmers führt zu einer linearen Addition der beiden Messunsicherheiten beim Zulieferer und entspricht dem ungünstigsten Fall. Würde man die Messunsicherheiten als normalverteilt annehmen, wäre eine quadratische Addition möglich. Diese Annahme kann hier jedoch nicht gelten, da keine Addition von Unsicherheiten erfolgt, sondern ein Grenzwert aus einem Wert der Messunsicherheit gebildet wird, um für ein Vertragsverhältnis eindeutige Verhältnisse zu schaffen.

Wenn der Zulieferer die Vertragstoleranz einhält, führt dies bei der Prüfung durch den Abnehmer zu keiner Anzeige, die in Bild 2 in den Bereichen A liegt und zur Rückweisung führen müsste.

### Tatsächlich nutzbarer Toleranzbereich

Durch die Messunsicherheit wird ohne Wissen der Beteiligten der physikalisch wirklich verfügbare Toleranzbereich für die Fertigung weiter reduziert. Zur Beschreibung dieses Effekts am Beispiel der spezifizierten Toleranz für die eigene Fertigung dient Bild 3. Diese Aussagen gelten prinzipiell auch im Falle einer Vertragstoleranz. Bild 3 ist im gleichen Maßstab und mit den gleichen Zahlenwerten wie die Bilder 1 und 2 gezeichnet. Es enthält drei Fälle für die physikalisch nutzbare Fertigungstoleranz. Der Fall A zeigt den in der Literatur [6] beschriebenen

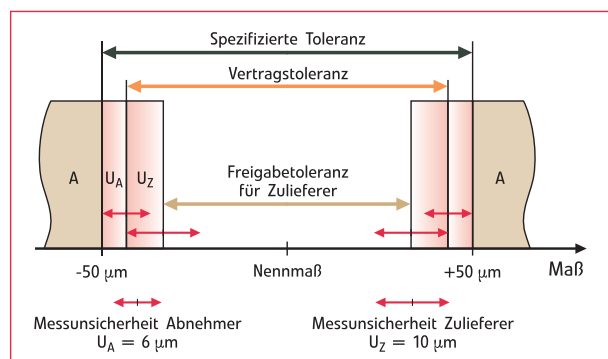


Bild 2. Vertragstoleranz für den Zulieferer

Wirklichkeit noch innerhalb der spezifizierten Toleranz, müssten aber verworfen werden.

Im unteren Teil von Bild 1 ist ein weiterer Aspekt zur Berücksichtigung der Messunsicherheit dargestellt, der in der Norm [4] nur angedeutet wird. Er betrifft das Übereinkommen zwischen Abnehmer und Zulieferer. Der Abnehmer kann eine Ware nicht zurückweisen, die nur um den Wert der Messunsicherheit seiner eigenen Wareneingangskontrolle außerhalb der Toleranz liegt. Das bedeutet, dass die Toleranz für die Annahme beidseitig um die Messunsicherheit vergrößert werden muss. Bei einem in diesem Fall angenommenen Verhältnis von Toleranz zu Messunsicherheit von 1 zu 10, also einer Messunsicherheit von  $5\ \mu\text{m}$  erweitert sich die Toleranz für die Annahme auf  $55\ \mu\text{m}$ .

Dieser Aspekt hat erhebliche Konsequenzen. Der Abnehmer hat bei dieser Vorgehensweise die Wahl, Teile an der Toleranzgrenze abzunehmen und gleichzeitig für die weitere Verwendung zu verworfen oder Teile außer Toleranz freizugeben. Beides verstößt gegen grundsätz-

prozesses – zweierlei Maß für die Zeichnungstoleranz geben.

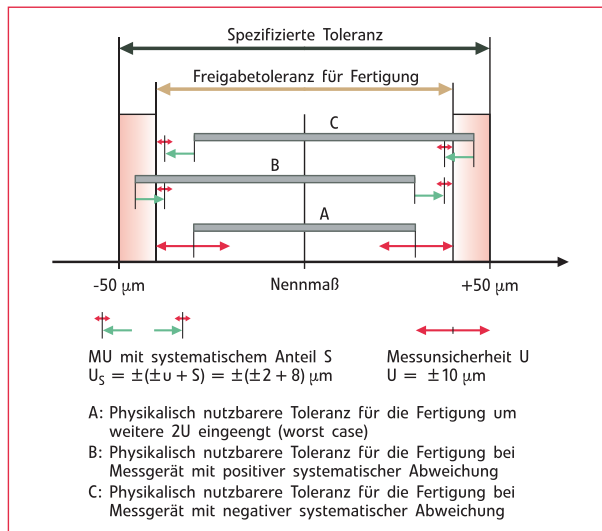
Aus dieser Situation können zwei Wege herausführen:

- Der Zulieferer besitzt nach einer entsprechenden Überprüfung einen Vertrauensstatus. Man geht davon aus, dass nur toleranzhaltige Teile geliefert werden. Eine Wareneingangskontrolle beim Abnehmer entfällt.
- Für den Zulieferer wird eine Vertragstoleranz [5] festgelegt, die auch die Messunsicherheit des Abnehmers berücksichtigt.

Der Verzicht auf eine Wareneingangskontrolle legt die Verantwortung für die Teilequalität und deren Auswirkungen auf das Endprodukt vollständig in die Hände des Zulieferers. Die Klärung der hiermit im Zusammenhang stehenden Haftungsfragen ist dann von hoher Bedeutung.

Die Definition einer Vertragstoleranz zeigt Bild 2. Anstelle von variablen Messunsicherheiten wird hier lediglich ein Beispiel für ein konkretes Merkmal bei Einsatz je eines Messgerätetyps erläutert. Dargestellt sind die Messunsicherheit  $U_A$  des Abnehmers und die Messun-

**Bild 3. Einfluss der Messunsicherheit auf die physikalisch nutzbare Fertigungstoleranz**



nen Fall der Einengung um nochmals 2U. Man nimmt hierzu an, dass die Messunsicherheit mit negativen oder positiven Vorzeichen auftritt und beidseitig mit dem jeweils ungünstigen Vorzeichen anzusetzen ist. Liegt ein Maß z. B. an der linken Bereichsgrenze im Fall A, kann, durch die Messunsicherheit verursacht, die Anzeige gerade an der eingeschränkten Toleranzgrenze liegen. Analog verhält sich der Fall an der rechten Seite. Wenn die Fertigung nach dieser Theorie Maße produziert, die nochmals um 2U innerhalb der schon eingeschränkten Freigabetoleranz liegen, wird die Messung stets die Einhaltung der spezifizierten Toleranz bestätigen.

Wenn er auch der Definition entspricht, so ist dieser Fall doch eher unrealistisch. Beim Messen desselben Merkmals wird ein KMG nicht einmal die Messunsicherheit in negativer und ein anderes Mal in positiver Richtung ausnutzen, es sei denn, die Messunsicherheit ist ausschließlich zufälliger Natur. Dies kann zutreffen, wenn durch Kalibrieren die systematische Abweichung korrigiert wurde. In diesen Fällen wird die Messunsicherheit aber deutlich geringere Werte annehmen. Für den in der Praxis häufigeren Fall wird davon ausgegangen, dass die Messunsicherheit aus einem zufälligen und einem systematischen Anteil besteht. Mathematisch formuliert ergibt sich der Ansatz zu:

$$U_S = \pm(\pm u + S)$$

Mit einem Zahlenbeispiel folgt daraus:

$$U_S = \pm(\pm 2 + 8) \mu\text{m}.$$

Das heißt, die mit 10 µm angesetzte Messunsicherheit besteht, wie hier angenommen, aus einem Unsicherheitsanteil von 2 µm und einer systematischen Messabweichung von 8 µm. Sie nimmt so Werte zwischen 6 µm und 10 µm an. Das Vorzeichen von  $U_S$  kann entweder positiv oder negativ sein. In Bild 3 sind diese beiden Fälle mit B und C bezeichnet. Die Messunsicherheit  $U_S$  mit systematischem Anteil hat durch den zufälligen Anteil eine variable Größe. Der zufällige Anteil wirkt sich für die Grenzwertbetrachtung – wie in der Grafik gezeigt – immer mit den ungünstigsten Vorzeichen aus. An den beiden Fällen B und C ist zu erkennen, dass der tatsächlich nutzbare Bereich der Fertigungstoleranz größer als im Fall A ist. Er verschiebt sich im Falle der zu großen Anzeige (Fall B) nach links näher an die Toleranzgrenze und mehr nach rechts im anderen Fall. Im Zahlenbeispiel beträgt der nutzbare Bereich im Fall A 60 µm und in den Fällen B und C 76 µm.

### ■ Schlussfolgerung

Der Umgang mit Messunsicherheiten und Toleranzen verlangt eine kritische Auseinandersetzung mit den zugehörigen Einflüssen. Da die Auswirkungen der Tolerierung und der Messunsicherheit der Prüfprozesse auf die Fertigungskosten erheblich sind, erscheint es dringend angeraten diesem Thema bei Aus- und Weiterbildung mehr Raum zu geben. Dazu gehören die richtige Festlegung von Toleranzen in der Konstruktion, die Sicherung stabiler Fertigungsprozesse und die Einführung von Qualitätssiche-

rungsprozessen mit messunsicherheitsorientierter Tolerierung.

### ■ Literatur

- 1 Berndt, G.; Hultsch, E.; Weinhold, H.: Funktionstoleranz und Meßunsicherheit. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 17 (1968) 2
- 2 Neumann, H. J.: Der Einfluss der Meßunsicherheit auf die Toleranzausnutzung in der Fertigung. In: CNC-Koordinatenmeßtechnik, H. J. Neumann (Hrsg.), expert verlag, Band 172, 1988
- 3 Neumann, H. J.: Die Längenmeßunsicherheit in der Koordinatenmeßtechnik. In: Koordinatenmesstechnik, H. J. Neumann (Hrsg.), expert verlag, Band 426, 1993
- 4 DIN EN ISO 14253-1: Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messungen. Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen, Beuth Verlag, Berlin 1999
- 5 Christoph, R. und Neumann, H. J.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik, Die Bibliothek der Technik, Band 248, mi verlag, Landsberg 2003
- 6 Weckenmann, A.; Gawande, B.: Kapitel Wirtschaftlichkeit/Prozessbewertung. In: Koordinatenmeßtechnik, Carl Hanser Verlag 1999

### ■ Die Autoren dieses Beitrags

**Dr.-Ing. habil. Ralf Christoph**, geb. 1955, studierte Feinwerktechnik an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena. 1985 promovierte er auf dem Gebiet der Anwendung von Bildsensoren in optischen Koordinatenmessgeräten. Die Habilitation auf dem Gebiet der optischen Sensorik für geometrische Messung erfolgte im Jahre 1989. Seit 1990 ist Dr. Christoph bei der Werth Messtechnik GmbH in Gießen tätig, zuerst als Entwicklungsleiter und seit 1993 als geschäftsführender Gesellschafter. Seit über zehn Jahren ist er im VDI und DIN maßgeblich an der Erstellung von Richtlinien und Normen auf dem Gebiet der Koordinatenmesstechnik beteiligt.

**Dipl.-Ing. (FH) Hans Joachim Neumann**, geb. 1932, studierte Funkgerätetechnik an der Ingenieurschule Mittweida (Sachsen). Nach zwei Jahren Tätigkeit in der optoelektronischen Entwicklung bei Carl Zeiss Jena wechselte er 1957 zu Carl Zeiss, Oberkochen. Dort war er zuerst in leitenden Funktionen in Bereichen der Elektronikentwicklung für Teleskope und Feinmessgeräte, später für Software und Anwendungstechnik tätig und zuletzt Leiter der Marketing-Kommunikation im Geschäftsbereich Industrielle Messtechnik. Bis 2001 war er als freier Mitarbeiter des Unternehmens Beauftragter für Normung und technische Information und Mitglied im ISO-Gremium für Koordinatenmesstechnik. Er war elf Jahre Obmann des VDI/DIN-Gemeinschaftsausschusses für Koordinatenmesstechnik und wurde dafür vom VDI mit der Ehrenplakette ausgezeichnet. Er betätigt sich als Fachautor und Dozent.