

PRÜFGERECHTE TOLERANZEN FÜR MAß, FORM UND LAGE

A. Weckenmann,
M. Knauer,
A. Gubesch

Zusammenfassung

Während des Konstruktionsprozesses trifft der Konstrukteur weitreichende Entscheidungen mit oft nicht sofort absehbaren, z.T. erheblichen finanziellen Folgen für die weitere Produkterstellung. In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Verbundprojekt „Systemgerechte Grenzgestaltdefinition“ wird ein wissensbasiertes, in ein Konstruktionssystem integriertes Werkzeug entwickelt, das den Konstrukteur bei der funktions-, fertigungs- und prüfgerechten Definition der Werkstückgestalt, insbesondere der Tolerierung unterstützt. Durch das präventive Abschätzen von Folgen soll das Entstehen von Fehlern bereits im Ansatz unterbunden werden. Das Teilprojekt „Prüfgerechte Tolerierung“ widmet sich der Fragestellung, ob und mit welchem Aufwand das Einhalten der im CAD-Modell definierten Toleranzen mit den im Unternehmen verfügbaren Meßgeräten am gefertigten Werkstück sicher überprüft werden kann.

1 Einführung

Aufgabe der Prüfung ist es, den Nachweis der Erfüllung bzw. Nichterfüllung der Qualitätsforderungen an ein Produkt zu erbringen. Im Falle maschinenbaulicher Werkstücke werden Qualitätsforderungen an die Werkstückgestalt zum großen Teil durch Maße und Toleranzen spezifiziert. Die Überprüfung der Spezifikationsanforderungen beinhaltet das meßtechnische Ermitteln des Merkmalwerts und eine Aussage darüber, ob sich der gemessene Wert innerhalb der Spezifikationsgrenzen befindet oder nicht. Da Meßergebnisse immer eine Unsicherheitskomponente enthalten, muß in jedem Fall die Unsicherheit des Meßergebnisses berücksichtigt werden, um sichere Prüfaussagen machen zu können [E DIN EN ISO 14253-1 1997].

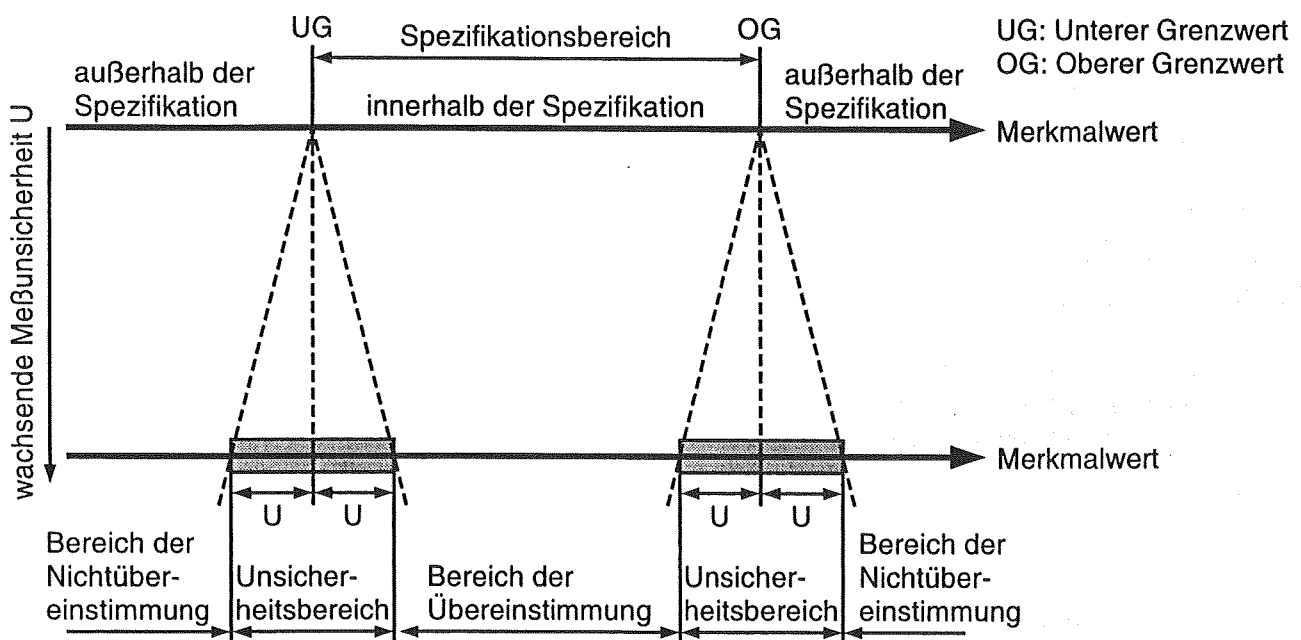


Bild 1 Auswirkung der Meßunsicherheit auf das Prüfergebn

Neben der Auswahl des bestgeeigneten Prüfmittels oder dem Festlegen von Meßparametern gewinnt das Abschätzen der beim Messen auftretenden Unsicherheiten im Tätigkeitsfeld des Prüflingenieurs zunehmend an Bedeutung.

Ein international anerkanntes, wenngleich komplexes Verfahren zur Ermittlung der Unsicherheit von Meßergebnissen wird in der ISO-Richtlinie „Guide to the expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) [GUM 1995a] (deutsche Ausgabe: „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [GUM 1995b]) beschrieben.

Die Ermittlung und Angabe der Unsicherheit erfolgt nach folgendem Schema:

1. Modellgleichung

Aufstellen des mathematischen Modell der Messung $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, z.B. $p = F/A$. Jede gemessene Ausprägung x_i der Modellgröße X_i ist mit Unsicherheit behaftet. Die Standardunsicherheit $u(x_i)$ wird aus der Standardabweichung der Meßwerte bei wiederholter Messung von x_i (Methode A) bzw. aus sonstigen gesicherten Erkenntnissen (Methode B) gewonnen.

2. Messung

Bestimmen der Schätzwerte x_i . Berechnen des Meßwerts $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

3. Kombinierte Standardunsicherheit

Ermitteln der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}$. Errechnet wird, wie sich die Unsicherheiten der einzelnen Modellgrößen auf die Unsicherheit des Gesamtergebnisses auswirken.

4. Erweiterte Unsicherheit

Berechnen der erweiterten Unsicherheit $U = k \cdot u_c(y)$. Der Erweiterungsfaktor k ($2 \leq k \leq 3$) kennzeichnet die Ausdehnung des Vertrauensbereichs, der dem Ergebnis zugeordnet werden kann; $k = 2$ entspricht einem Konfidenzbereich zu einem Vertrauensniveau von rund 95 %.

5. Ergebnisangabe

Zusätzlich zum Meßwert ist die erweiterte Unsicherheit anzugeben: $Y = y \pm U$, wobei y der beste Schätzwert der Meßgröße Y ist und $y - U$ bis $y + U$ einen Bereich abdeckt, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit den unbekanntem wahren Wert enthält.

Da die Meßunsicherheit bei einer Ergebnisbewertung immer zu Lasten des Beweisführenden ausgelegt wird (beispielsweise wird bei einer durch die Polizei festgestellten Geschwindigkeitsübertretung die Unsicherheit der Messung zum Vorteil des Beschuldigten vom Meßergebnis abgezogen), muß ein am Werkstück gemessener Merkmalwert innerhalb der „Zone der Übereinstimmung“ liegen. Nur in diesem Fall kann sicher davon ausgegangen werden, daß der gemessene, unsichere Merkmalwert tatsächlich innerhalb der Toleranz liegt.

Bezogen auf die Aufgabe des Konstrukteurs, für die beim Fertigen auftretenden Abweichungen Toleranzen festlegen zu müssen bedeutet dies, daß er überprüfen müßte, ob jede seiner Toleranzen mit den vorhandenen Prüfmitteln sicher prüfbar ist (prüfgerechte Tolerierung). Die im GUM beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung der Meßunsicherheit ist wegen ihres Anspruchs auf Allgemeingültigkeit, Konsistenz und Übertragbarkeit auf alle Gebiete der Meßtechnik in der praktischen Anwendung jedoch zumeist schwierig umzusetzen. Diese Aufgabe soll ihm das zu entwickelnde wissensbasierte System (Bild 2) abnehmen. Dieses analysiert die festgelegten Toleranzen. Das Expertensystem findet je nach Toleranzart und -wert in seiner Wissensbasis Meßgeräte, die in der Lage sind, die entsprechende Meßaufgabe zu lösen. Mit Simulationen und normgerechten Berechnungen wird der Wert auftretender Unsicherheiten bestimmt und mit einem Zielwert (z.B. soll aufgrund einer Managemententscheidung die Unsicherheit maximal 10 % der Toleranz betragen), der unterschritten werden muß, verglichen. Kann die

Meßaufgabe nicht befriedigend gelöst werden, so erfolgt eine Rückmeldung an den Konstrukteur, die ihn zur Überarbeitung seiner Konstruktion veranlassen soll.

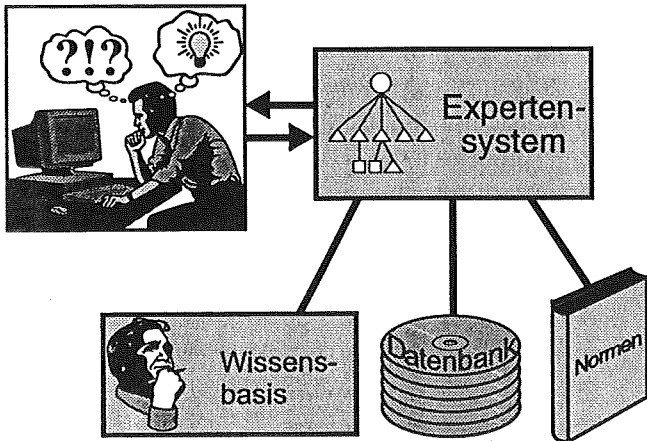


Bild 2 Wissensbasiertes System zur Unterstützung der prüfgerechten Tolerierung

2 Prüfgerechtigkeit von Maßtoleranzen

Bei Maßen wird zwischen Zweipunktmaßen und Hüllmaßen unterschieden. Die Hüllbedingung ist anwendbar auf zylindrische Formelemente und auf das durch zwei gegenüberliegende parallele ebene Flächen gebildete Abstandsmaß. In der Praxis werden Hüllmaße häufig mit Lehren geprüft. Die lehrende Prüfung wird im Analysewerkzeug grundsätzlich nicht berücksichtigt. Die Analyse der Prüfbarkeit von Hüllmaßen erfolgt durch die Simulation der Antastung der Werkstückoberfläche mit einem Koordinatenmeßgerät und Auswertung der simulierten Meßdaten nach der Pferchbedingung für Innenmaße (Bohrungsdurchmesser) bzw. nach der Hüllbedingung für Außenmaße (Wellendurchmesser). Die Vorgehensweise ist analog zu der Analyse der Prüfbarkeit von Formtoleranzen, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

Für die Bestimmung von Zweipunktmaßen werden in der betrieblichen Praxis hauptsächlich einfache Meßgeräte wie Meßschieber, Meßschrauben, Feinzeiger, usw. eingesetzt. Im Allgemeinen wird bei deren Anwendung auf eine explizite Berechnung der Meßunsicherheit verzichtet. In Verbindung mit der heute üblichen digitalen Anzeigeart der Meßwerte wird die Meßunsicherheit häufig als zu gering eingeschätzt. Für eine objektive Beurteilung der Eignung eines Meßgeräts, ein bestimmtes Merkmal zu prüfen, ist die meßaufgabenspezifische Berechnung der Unsicherheit erforderlich. Aus diesem Grunde wurde in das Toleranzanalysewerkzeug ein Modul für die Untersuchung der Eignung einfacher Meßgeräte für die Prüfung von Zweipunktmaßen integriert. In der Wissensbasis für einfache Meßgeräte sind die charakteristischen Daten von

- Meßschiebern mit Skalen- und Ziffernanzeige [DIN 862 1988],
- Bügelmeßschrauben und Innenmeßschrauben [DIN 863-1 1983],
- Meßuhren [DIN 878 1983],
- Feinzeiger [DIN 879-1 1983]

sowie Regeln für die Analyse der Prüfbarkeit von Zweipunktmaßen abgelegt. Die Analyse läuft in mehreren Schritten ab:

1. Meßgeräteauswahl

Zuerst werden aus der Menge der in der Wissensbasis beispielhaft gespeicherten Meßgeräte in Abhängigkeit von der Merkmalart die für die Meßaufgabe prinzipiell geeigneten Geräte ausgewählt. Die Auswahl erfolgt nach Kriterien wie z.B. Meßbereich des Meßgerätes größer als das tolerierte Nennmaß, Eignung des Gerätes für die Durchführung von Innen- oder Außenmessungen.

2. Berechnung der Meßunsicherheit nach GUM

Für die als geeignet gefundenen Meßgeräte wird die meßaufgaben-spezifische Unsicherheit nach der im GUM vorgeschriebenen Vorgehensweise ermittelt.

3. Bewerten der erreichbaren Meßunsicherheit und Ausgabe der Analyseergebnisse

Die Meßgeräte, bei deren Einsatz die zu erwartende Unsicherheit kleiner als die Zielunsicherheit ist, werden in eine Liste eingetragen. Ist für mindestens ein Meßgerät die Unsicherheit geringer als die Zielunsicherheit, ist die Prüfbarkeit der Toleranz gegeben. Erfüllt keines der Meßgeräte die Anforderungen, erfolgt die Meldung, daß die Maßtoleranz mit den vorhandenen Meßgeräten nicht geprüft werden kann.

Die GUM-konforme Berechnung wurde vorerst in Form einer Excel-Tabelle realisiert, in der alle notwendigen Berechnungsschritte hinterlegt sind. Bild 3 zeigt die Anwendung der Tabelle zur Ermittlung der Meßunsicherheit bei der Verwendung eines Meßschiebers mit Skalenanzeige beim Messen eines Außendurchmessers.

Meßschieber (Skalenanzeige) Außendurchmesser					
Zurück			Kombinierte Standardunsicherheit	Anteil an der Gesamtunsicherheit in %	
	Eingaben	Einheit	u_c () / mm		
L_N	30	mm	0,02583	66,51	
t_W	25	°C	0,00217	0,47	
t_N	15	°C	0,00100	0,10	
α_P	25	$\times 10^{-6} K^{-1}$	0,00009	0,00	
α_N	11,5	$\times 10^{-6} K^{-1}$	0,00009	0,00	
Skw	0,05	mm	0,01443	20,77	
ϕ_1	2	min	0,00873	7,60	
a_{max}	40	mm	0,00672	4,50	
ϕ_2	2	min	0,00065	0,04	
F	10	N	0,00000	0,00	
k	2				
Kombinierte Standardunsicherheit / μm			0,0317	100	
Meßergebnis:		30,005 mm			
Erweiterte Meßunsicherheit U mit $k = 2$		0,064 mm			

- L_N angezeigter Wert
- t_W Temperatur des Werkstücks
- t_N Temperatur des Normals
- α_W Ausdehnungskoeffizient des Werkstücks
- α_N Ausdehnungskoeffizient des Normals
- Skw Rundungsabweichung der Ablesung an der Skale
- ϕ_1 Verkipfung der Meßschnäbel
- a_{max} Länge des Schnabels
- ϕ_2 Verkipfung des Werkstücks
- F Meßkraft
- k Erweiterungsfaktor

$k = 2$ entspricht einer statistischen Sicherheit von $1 - \alpha = 95,4\%$

Bild 3 Unsicherheit der Zweipunktmessung mit einem Meßschieber

3 Prüfgerechtigkeit von Formtoleranzen

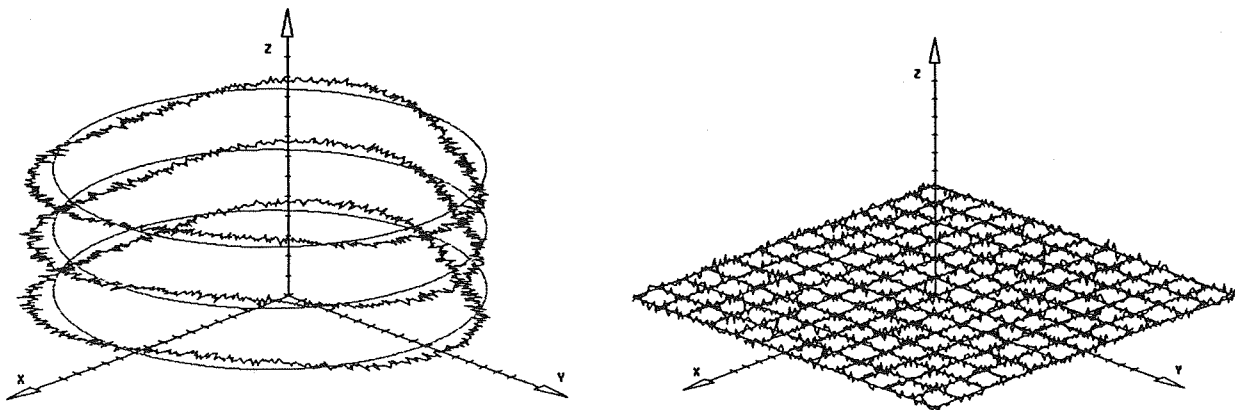
Ausgangspunkt der Analyse der Prüfgerechtigkeit sind die im Konstruktionssystem *m/fk* erzeugten Produktdaten, die Ergebnisse des Toleranzsynthesemoduls sowie die für die Prüfbarkeitsanalyse relevanten Fertigungsinformationen, die aus dem Analysemodul Fertigungsgerechtigkeit extrahiert werden.

Bei der Analyse von Formtoleranzen wird, ebenso wie bei der Überprüfung von Maßen nach der Hüllbedingung, davon ausgegangen, daß für die Messung Koordinatenmeßgeräte eingesetzt werden. Für die Prüfbarkeitsanalyse sind Angaben über den Meßbereich und die Antastunsicherheit erforderlich. Diese Daten werden vor dem Analyseablauf einem Objekt der Klasse „Koordinatenmeßgeräte“ in der entsprechenden Wissensbasis in Nexpert-Object zugewiesen.

Die Analyse der Prüfgerechtigkeit von Formtoleranzen ist für die Geradheit, Rundheit, Ebenheit und Zylinderform möglich. Profillinien- und Profilformtoleranzen werden nicht berücksichtigt. Die

Analyseschritte beinhalten das Generieren und Auswerten eines die Werkstückgestalt repräsentierenden Satzes von Meßpunkten, die Auswahl von Antastpunkten aus diesem Datensatz, die Simulation und Auswertung von Wiederholmessungen, die statistische Auswertung der Simulationsergebnisse und die Bewertung der berechneten Kennwerte.

Basierend auf den im Produktmodell abgelegten Beschreibungsdaten der Nenngestalt des tolerierten Elements werden „virtuelle Werkstücke“ generiert, indem die Werkstückgestalt durch eine dicht verteilte Anzahl von Oberflächenpunkten modelliert wird. Derzeit verfügbar sind Programmroutrinen, mit denen Punktkoordinaten an Geraden, Kreisen, Ebenen, Zylindern, Kegeln und Kugeln berechnet werden, wobei die Möglichkeit besteht, Abweichungen von der geometrisch idealen Gestalt gezielt einzubringen. Dadurch ist eine Berücksichtigung fertigungsbedingter Abweichungen für bestimmte Abweichungstypen, wie z.B. lokale Abplattungen, lokale Spitzen und Mehrbogengleichdicke an der Kreis- und Zylinderform, Knick und Versatz bei Geraden und Ebenen sowie überlagerte sinusförmige oder zufällige Abweichungen möglich (Bild 4).



a) Zylinder mit Gleichdickabweichung

b) Ebene mit zufälligen Abweichungen

Bild 4 Koordinatenmessungen an virtuellen Werkstücken

Bei den simulierten Messungen werden Anzahl und Verteilung der Meßpunkte variiert sowie das Abweichungsverhalten des Koordinatenmeßgeräts berücksichtigt (Bild 5). Pro Meßpunktzahl wird eine konstante Anzahl von Wiederholmessungen durchgeführt. Die Berechnung der Abweichungswerte erfolgt normgemäß (Ermittlung der Minimumzone [DIN ISO 1101 1985]).

Die Ergebnisse der Einzelauswertungen streuen infolge der unterschiedlichen Lage der Antastpunkte. In Anlehnung an GUM wird der arithmetische Mittelwert der Einzelwerte als bester Schätzwert für den wahren Wert der Messung und die Streuung als ein Maß für die Unsicherheit berechnet. Die erweiterte Meßunsicherheit wird aus dem Produkt der Streuung mit dem Erweiterungsfaktor k angegeben.

Im letzten Schritt der Analyse erfolgt die Bewertung der Ergebnisse. Die Prüfbarkeit der Toleranz ist unter den gemachten Annahmen gegeben, wenn die folgenden zwei Kriterien erfüllt sind:

1. die erreichbare Meßunsicherheit ist geringer als die geforderte Zielunsicherheit,
2. die Differenz zwischen dem berechneten mittleren Wert der Formabweichung und der Formabweichung die sich aus der Auswertung der gesamten Gestalt ergibt, überschreitet einen bestimmten Grenzwert nicht.

4 Prüfgerechtheit von Lagetoleranzen

Für das Überprüfen der Prüfgerechtheit von Lagetoleranzen ist das Vorgehen analog zur Analyse der Prüfgerechtheit von Formtoleranzen, wobei jedoch neben dem tolerierten Element auch der

Bezug zu erfassen und auszuwerten ist. Im folgenden Beispiel ist exemplarisch die Analyse der Prüfgerechtheit einer Parallelitätstoleranz an einem zylindrischen Werkstück dargestellt.

Zur Berechnung des Parallelitätsabweichungswerts wird zunächst eine Mantellinie als Bezugselement bestimmt. Die Achse des Hüllzylinders um diese Mantellinie ist der Bezug. Unter Vorgabe der Bezugsrichtung wird um die zweite Mantellinie ebenfalls ein Hüllzylinder berechnet. Der Durchmesser dieses Hüllzylinders wird als erstes Ergebnis festgehalten. Da es bei der Parallelitätstoleranz an Mantellinien im allgemeinen keine Vorgabe gibt, welche Mantellinie als Bezug dienen soll, wird die Berechnung nach Vertauschen der beiden Linien erneut durchgeführt. Der größere der beiden Werte ist der Wert der Parallelitätsabweichung.

Um die Anteile der Unsicherheit, die durch die Meßstrategie bedingt sind, abschätzen zu können, wurden an einem simulierten Werkstück Wiederholmessungen mit unterschiedlichen Meßstrategien durchgeführt. Für die Messungen wurde ein Koordinatenmeßgerät mit einer Längenmeßunsicherheit $u_3 = (1,5 + L / 300) \mu\text{m}$ (L in mm) zugrundegelegt. Das Werkstück hat den Nenndurchmesser 100 mm, die Länge 200 mm und wurde mit einer konischen Gestaltabweichung (Verjüngung des Radius über die gesamte Länge um $5 \mu\text{m}$) und überlagerten zufälligen (normalverteilt mit $\mu = 0$, $\sigma = 0,5 \mu\text{m}$) Abweichungen erzeugt.

Bei den Messungen wurden Anzahl und Verteilung der Meßpunkte variiert sowie das Abweichungsverhalten des Koordinatenmeßgeräts berücksichtigt (Bild 5). Pro Meßpunktzahl wurden 100 Wiederholmessungen simuliert. Die Berechnung der Parallelitätsabweichung erfolgte in der oben beschriebenen Weise.

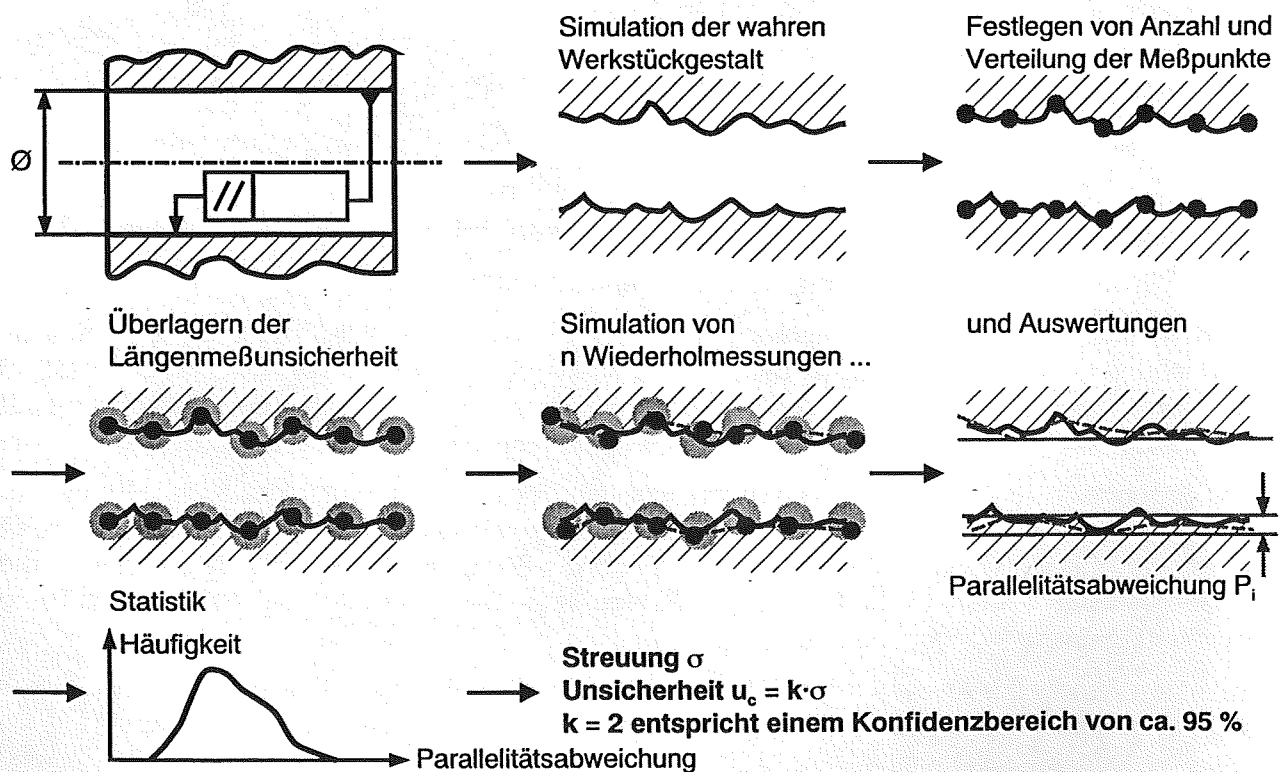


Bild 5 Abschätzen der Ergebnisstreuung durch Simulation

In einer statistischen Auswertung der Ergebnisse wurden für jede Wiederholmessungsreihe Mittelwert und Streuung der berechneten Parallelitätsabweichungen ermittelt und diese Werte über der Anzahl der Punkte aufgetragen (Bild 6). Im rechten Teilbild stellt die durchgezogene Linie den Mittelwert, die gestrichelte Linie den wahren Wert dar; die gestrichpunkteten Linien begrenzen den Streubereich (einfache Standardabweichung).

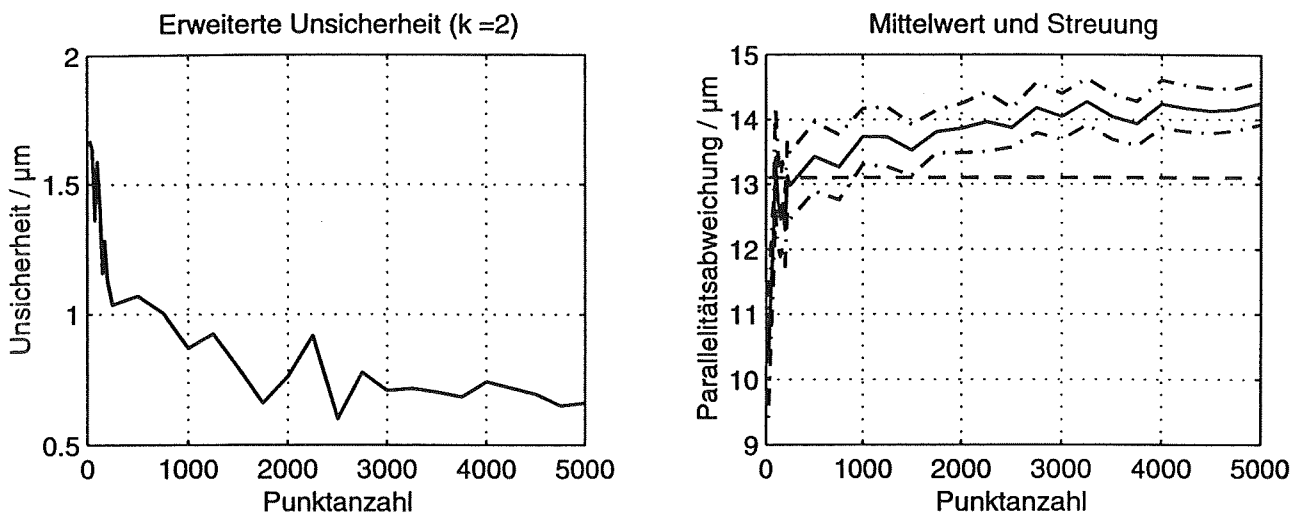


Bild 6 Simulationsergebnisse Zylinder mit konischer Verjüngung und zufälligen Abweichungen

Aus den Diagrammen wird deutlich, daß sich ab etwa 3000 Punkten die meßaufgabenspezifische Unsicherheit weitgehend konstant auf niedrigem Niveau einpendelt und auch der Mittelwert der berechneten Parallelitätsabweichungen konstant bleibt. Die zum Teil erheblichen Unterschiede zwischen Mittelwert und wahren Wert beruhen auf dem Abweichungsverhalten des Koordinatenmeßgeräts. Abhilfe ist möglich, wenn man vor der Berechnung des Abweichungswerts auf die Meßdaten ein Filter, wie es üblicherweise in der Formmeßtechnik gebräuchlich ist, anwendet. Da nach einer entsprechenden Filterung die kurzperiodischen Anteile (z.B. Ausreißer) im Frequenzspektrum verschwinden, werden die Ergebnisse vornehmlich von den längerperiodischen, also den tatsächlich vorhandenen Form- und Lageabweichungen bestimmt [Weckenmann 1995]. Die Ergebnisstreuung sinkt dadurch, die Unsicherheit wird reduziert. Erfolgt keine Filterung der Meßdaten, so muß der Betrag der Abweichung zwischen Mittelwert und wahren Wert, da das Ergebnis nicht entsprechend korrigiert wurde, vollständig der Meßunsicherheit zugeschlagen werden. Im allgemeinen ist dieser Betrag jedoch nicht bekannt und muß abgeschätzt werden. Eine obere Schranke stellt der doppelte Wert der auftretenden Längenmeßunsicherheit dar.

Stellt man im Rahmen eines Unsicherheitsbudgets die einzelnen Anteile an der Gesamtunsicherheit zusammen, so dominieren v.a. die Faktoren Temperatur bzw. Temperaturkompensation und Meßstrategie. Bei einem Koordinatenmeßgerät mit Temperaturkompensation an Maßstäben und Werkstück kann, ausreichende Temperierung vorausgesetzt, bei den betrachteten Werkstücken der temperaturbedingte Standardunsicherheitsanteil mit ca. $0,8 \mu\text{m}$ [Neumann 1996] angegeben werden. Im Fall einer ungeschickten Meßstrategie und notwendiger Abschätzung der Unsicherheit müßte der Meßstrategie ein Beitrag von $(1,5 + 200 / 300) / \sqrt{3} \mu\text{m} = 1,2 \mu\text{m}$ (der Faktor $1 / \sqrt{3}$ berücksichtigt die Verteilungsform Rechteckverteilung für die Abweichung des Mittelwerts vom wahren Wert) zugeschrieben werden. Hinzu kommt die Standardunsicherheit ($k = 1$) für die prinzipielle Streuung der Ergebnisse bei Wiederholmessungen. Im betrachteten Fall beträgt diese z.B. $0,35 \mu\text{m}$. Es resultiert eine kombinierte Unsicherheit $u_c = \sqrt{0,8^2 + 1,2^2 + 0,35^2} \mu\text{m} = 1,48 \mu\text{m}$. Die erweiterte Unsicherheit ($k = 2$) beläuft sich dann auf ca. $3 \mu\text{m}$. Bei korrekter Meßstrategie, d.h. der Mittelwert konvergiert bei genügend hoher Meßpunktzahl gegen den wahren Wert, beträgt $u_c = \sqrt{0,8^2 + 0,35^2} \mu\text{m} = 0,87 \mu\text{m}$. Die erweiterte Unsicherheit reduziert sich auf ca. $1,7 \mu\text{m}$.

Gesteht man der Meßunsicherheit einen Anteil von 10 % an der Toleranz zu, so bedeutet dies, daß selbst bei korrekter Meßstrategie Parallelitätstoleranzen unter $17 \mu\text{m}$ nicht mehr sicher prüfbar sind.

5 Ausblick

Für die Analyse der Prüfgerechtheit von Maß-, Form- und Lagetoleranzen wurden erste prototyp-haft arbeitende Module entwickelt. Im nächsten Schritt ist die Ausleitung der im Produktmodell des Konstruktionssystems *mfk* hinterlegten Geometrie- und Technologiedaten geplant, um weitgehend automatisiert die einzelnen Schritte der Analyse auf Prüfgerechtheit ablaufen zu lassen. Das Toleranzanalysewerkzeug soll eingebettet in die rechnergestützte Arbeitsumgebung dem Konstrukteur beim Auftreten nicht oder nur mit hohem Aufwand prüfbarer Toleranzen eine Rückmeldung geben, die ihn zum Verändern der kritischen Toleranzen veranlaßt.

6 Literatur

[DIN 862 1988]

Norm DIN 862: Meßschieber - Anforderungen, Prüfung. Beuth Verlag, Berlin 1988

[DIN 863-1 1983]

Norm DIN 863 Teil 1: Meßschrauben - Bügelmeßschrauben Normalausführung, Begriffe, Anforderungen, Prüfung. Beuth Verlag, Berlin 1983

[DIN 878 1983]

Norm DIN 878: Meßuhren. Beuth Verlag, Berlin 1983

[DIN 879-1 1983]

Norm DIN 878 Teil 1: Feinzeiger mit mechanische Anzeige. Beuth Verlag, Berlin 1983

[DIN ISO 1101 1985]

Norm DIN ISO 1101: Technische Zeichnungen - Form- und Lagetolerierung - Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen, Allgemeines, Definitionen, Symbole, Zeichnungseintragungen. Beuth Verlag, Berlin 1985

[E DIN EN ISO 14253-1 1997]

Entwurf Norm DIN EN ISO 14253 Teil 1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messungen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen. Beuth Verlag, Berlin 1997

[GUM 1995a]

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Genf 1995

[GUM 1995b]

Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Beuth Verlag, Berlin 1995

[Neumann 1996]

Neumann, H. J.: Die Temperatur - ein bedeutender Einfluß auf die Rückführbarkeit von Längenmessungen. In: Koordinatenmeßtechnik (VDI-Berichte: 1258), S. 177 - 192, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996

[Weckenmann 1995]

Weckenmann, A.; Eitzert, H.; Garmer, M.; Weber, H.: Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology. Precision Engineering 17 (1995) 4, S. 244 - 252

Autoren

Prof. Dr.-Ing. A. Weckenmann

Dipl.-Inf. M. Knauer

Dipl.-Ing. A. Gubesch

Tel.: 09131/856520

Tel.: 09131/856516

Tel.: 09131/856546

weckenmann@qfm.uni-erlangen.de

knauer@qfm.uni-erlangen.de

gubesch@qfm.uni-erlangen.de

Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmeßtechnik

Nägelsbachstraße 25

91052 Erlangen