Foto: © Carl Zeiss

LASSEN TEMPERATURSTABILE KMG DIE TEMPERATUR VERGESSEN?

Messen mit geringem Temperatureinfluss

Hans Joachim Neumann, Oberkochen

Im Produktionsbereich eingesetzte Koordinatenmessgeräte sind oft „temperaturstabil". Ihre zulässige Längenmessabweichung ist für einen weiten Temperaturbereich spezifiziert. Mit zunehmender Abweichung von der Bezugstemperatur (20 °C) muss besonders auf die Wärmedehnung der Messobjekte geachtet werden. Wird diese nicht berücksichtigt, entstehen eklatante Messfehler. Dieser Leitfaden erlaubt ein Abschätzen der temperaturbedingten Messunsicherheit.

Auch wenn temperaturstabile Koordinatenmessgeräte (KMG) eingesetzt werden, sollten bestimmte Regeln für die Aufstellung und die Klimatisierung sowie generelle messtechnische Regeln befolgt werden. Dadurch lassen sich störende Einflüsse reduzieren und stabilere Messergebnisse erzielen. Zu diesen Regeln gehören:

- sich zeitlich nur langsam verändernde Umgebungstemperaturen,
- Umhausung bei schnellen Temperaturänderungen,
- keine Zugluft oder direktes Anblasen des KMG,
- wenig Wärmequellen in unmittelbarer Umgebung,
- möglichst großer Abstand zu den Wänden,
- Wärmeisolation von Fußboden und Wänden,
- keine direkte Einstrahlung durch Sonne und Beleuchtung,
- elektrische Ausrüstung des KMG und Beleuchtung im 24-h-Betrieb,
- Wärmeausgleich der Messobjekte vor dem Messen (Luftdusche),
- Taster und Verlängerungen aus thermisch unempfindlichen Materialien,
- kurze Messzeiten für geringe Drift, sonst erneutes Einmessen des Bezugssystems.

Bei Abweichung von der Bezugstemperatur hat meist die Längendehnung der Messobjekte den größten Einfluss auf die

Messunsicherheit. Sie wird deshalb in der Regel rechnerisch korrigiert.

Bei thermisch stabilen KMG bezieht sich diese Korrektur vereinfachend nur auf das Messobjekt selbst, da die Einflüsse seitens des KMG in der Spezifikation enthalten sind. Ist dies nicht der Fall, kann die Berechnung der thermisch verursachten Messunsicherheit komplizierter oder gar unmöglich werden [1]. Sie muss dann auf andere Weise, z. B. durch Messreihen oder die Methoden für das sogenannte „Virtuelle KMG", erfasst werden.

Hierbei wird die messaufgabenspezifische Messunsicherheit unter den real existierenden Temperaturbedingungen durch Simulation des Messprozesses ermittelt und daraus die Messunsicherheit für jedes gemessene Merkmal abgeschätzt [3]. Zu den beeinflussenden Parametern gehören auch die thermischen Eigenschaften der Messobjekte. Korrekturen der linearen Wärmedehnung des Messobjekts erfolgen hierbei nicht; eine im KMG ausgeführte Korrektur wird aber bei der Simulation berücksichtigt.

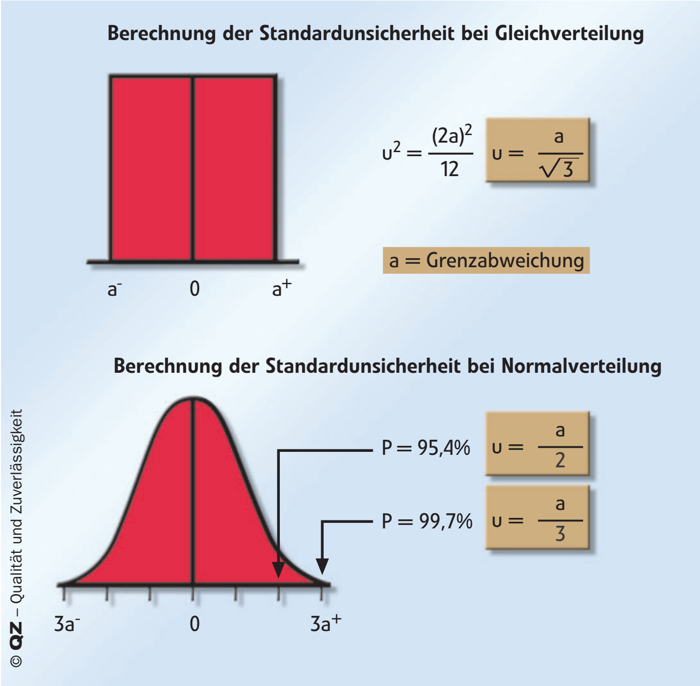

Bild 1. Berechnung der Standardunsicherheit u aus den Grenzabweichungen

Eigenschaften temperaturstabiler KMG

Die Hersteller können die zulässige Längenmessabweichung MPE (Maximum Permissible Error) [2] allein für das KMG spezifizieren, wobei die Annahmeprüfung mit temperaturstabilen kalibrierten Objekten, z. B. aus Zerodur, erfolgt. Der Anwender kann diese Angabe zu einem Gerätevergleich nutzen und für reine Längenmessungen für jeden Werkstoff die Gesamtlängenmessabweichung abschätzen. Nach der Norm ist die Angabe der MPE für Stahlendmaße zwingend erforderlich, um im spezifizierten Temperaturbereich die Wirksamkeit der Temperaturkorrektur prüfen zu können.

Die Hersteller nehmen den Annahmetest, bei dem diese Spezifikation überprüft wird, in der Regel unter möglichst idealen Verhältnissen vor, d. h. mit sehr genauer Temperaturmessung und kalibriertem Alpha der verwendeten Endmaße. Trotzdem ist in diesem Fall für MPE prinzipiell ein größerer Wert als für das KMG allein zu erwarten. Im praktischen Einsatz empfiehlt es sich beim Abweichen von den idealen Bedingungen, die thermisch bedingte zusätzliche Messunsicherheit abzuschätzen. Dazu dient am besten die spezifizierte Längenmessabweichung für das KMG allein.

Die Bezeichnung „temperaturstabiles KMG" ist dann gerechtfertigt, wenn MPE in einem größeren Temperaturbereich spezifiziert ist. Sinnvoll sind auch Werte für unterschiedliche Temperaturbereiche, wie z. B. 20 bis 25 °C und 20 bis 30 °C.

Seitens der Hersteller werden verschiedene Wege beschritten, um die Temperaturstabilität zu erreichen:

- Temperaturmessung an den Skalen und interne Längenkorrektur,
- Zerodur-Skalen ohne Korrektur,
- Verwendung thermisch besonders geeigneter Werkstoffe, z. B. mit guter Wärmeleitung oder geringer Wärmedehnung,
- thermische Korrektur des Geräteaufbaus,
- thermisch isolierter Aufbau,
- Einbeziehung der Wärmedehnung des Messobjekts durch automatische Korrektur bei Eingabe von α und t oder für t durch Messfühler am Messobjekt.

Korrektur der thermisch verursachten Längenmessabweichung

Bei thermisch stabilen KMG wird vereinfachend nur die Längendehnung des Messobjekts berücksichtigt. Dabei gelten die folgenden Betrachtungen für alle Werkstoffe der Messobjekte, wenn die Spezifikation für das KMG allein zugrunde gelegt wird. Im Fall der KMG-Spezifikation für Stahl kann für andere Werkstoffe die Differenz der Ausdehnungskoeffizienten zu dem der Stahlendmaße angesetzt werden. Die thermische Längendehnung des Messobjekts ist:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t \qquad (1)$$

darin sind:

L_0: die Länge bei t_0 (wegen des vernachlässigbaren Einflusses auch gleichzusetzen mit der Anzeige oder dem Sollwert)

α: der Ausdehnungskoeffizient des Messobjekts

$\Delta t = t - t_0$

t: die Temperatur des Messobjekts, t_0 : die Bezugstemperatur von 20 °C

Im KMG erfolgt in der Software eine Längenkorrektur in allen Achsen mit dem aus (1) gebildeten Wert $-\Delta L$. Trotz dieser Korrektur verbleibt eine Restunsicherheit, denn weder α noch t sind genau bekannt.

Die Bestimmung der Restunsicherheit muss nach den internationalen Regeln (GUM) geschehen. Dazu werden in die Ableitung der Modellgleichung (1) die Standardunsicherheiten eingesetzt und quadratisch addiert, was zur folgenden Beziehung führt:

$$U = k \cdot L_0 \sqrt{(u_\alpha \cdot \Delta t)^2 + (u_t \cdot \alpha)^2} \qquad (2)$$

U ist die trotz Längenkorrektur verbleibende, erweiterte Unsicherheit mit k = 2. Zur Abschätzung der Gesamtunsicherheitsbilanz (Unsicherheitsbudget) können in (2), wenn bekannt, noch weitere Unsicherheitskomponenten eingefügt werden. Jedoch überwiegt zumeist der thermisch verursachte Anteil. ▷

Die mit u bezeichneten Faktoren sind die Standardabweichungen des Ausdehnungskoeffizienten und der Temperatur. Sie werden allgemein als gleichverteilt angenommen und müssen entsprechend den Regeln der Statistik aus den Grenzabweichungen berechnet werden. Im Bild 1 ist dies für die Gleich- und Gaußverteilung dargestellt.

Werden in (2) die gleichverteilten Grenzabweichungen a_α und a_t eingesetzt, entsteht eine vereinfachte Gleichung, mit der alle folgenden Beispiele berechnet wurden:

$$U = 1{,}155 \cdot L_0 \sqrt{(a_\alpha \cdot \Delta t)^2 + (a_t \cdot \alpha)^2} \qquad (3)$$

Zur Vereinfachung kann die Grenzabweichung a_α ohne den Faktor 10^{-6} eingesetzt werden. Der Wert U hat dann die Größenordnung µm/m.

Die Grenzabeichungen von α sind oft nur unzureichend bekannt. Für a_α sollten im Zweifelsfall 10 % des nominellen Werts eingesetzt werden. In Sonderfällen kann der Ausdehnungskoeffizient des Messobjekts bis zu einer Grenzabweichung von $a_\alpha = 0{,}05 \cdot 10^{-6}$/K kalibriert werden. Bei einem der angewendeten Verfahren werden in einer temperierten Ölwanne – an einem Messobjekt aus dem zu bestimmenden Werkstoff – Längenmessungen durchgeführt. Diese erfolgen bei verschiedenen Temperaturen mit einem kalibrierten KMG [1].

Auch die Grenzabweichungen der Temperatur des Messobjekts können unterschiedlich groß sein. Wird nur die Raumtemperatur gemessen, ist von einer deutlich größeren Grenzabweichung auszugehen als bei der Messung direkt am Objekt.

Für einen schnellen Überblick über die zu erwartenden Restunsicherheiten werden den Messbedingungen gemäß Tab. 1 drei Fälle zugeordnet. Darauf beziehen sich die folgenden Beispiele für die Restunsicherheit der Längenkorrektur.

Damit kann bereits bei der Planung die thermisch bedingte Längenmessunsicherheit in Bezug auf Messobjekte, KMG-Typ und Aufstellbedingungen berücksichtigt werden.

Abschätzung der verbleibenden Restunsicherheiten

In Tab. 2 ist die Unsicherheit der Längenkorrektur der drei Fälle für verschiedene Werkstoffe für die Temperaturen 20 °C, 25 °C und 30 °C dargestellt. Vielleicht überrascht die Tatsache, dass bei 20 °C, wo keine Korrektur erfolgt, auch eine Restunsicherheit vorliegt. Grund dafür ist die Unsicherheit in der Temperaturbestimmung auch bei der Bezugstemperatur.

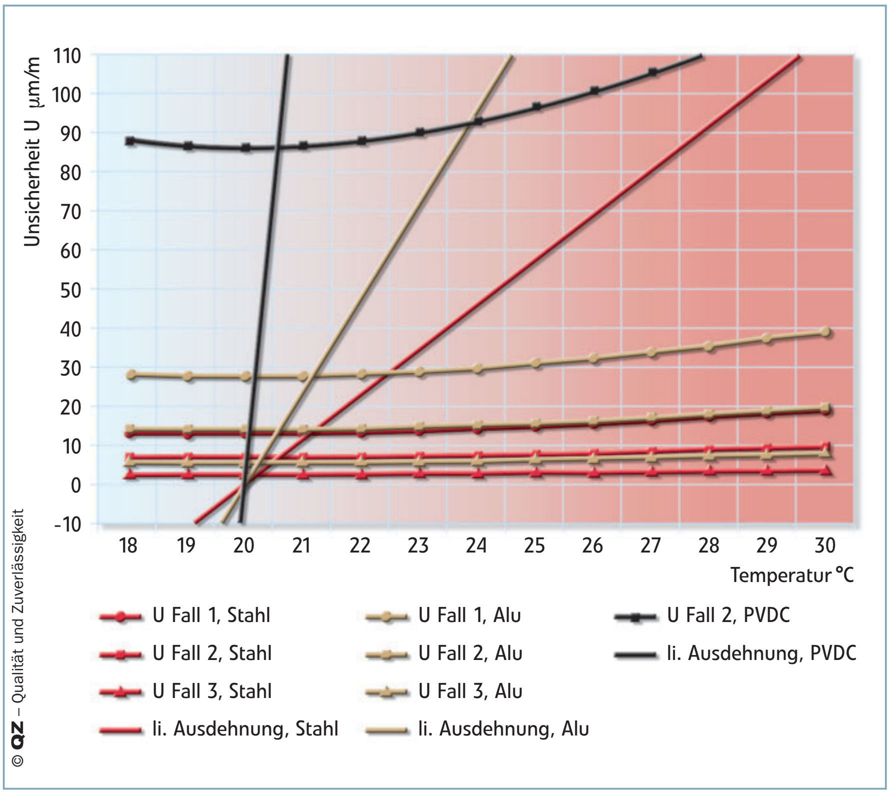

Bild 2. Grafische Darstellung der abgeschätzten Unsicherheit aus Tabelle 2 mit eingeschränktem Wertebereich

Deutlicher wird dieser Fall in der grafischen Darstellung in Bild 2, die einen Temperaturbereich von 18 bis 30 °C umfasst. Im Bereich um 20 °C dominiert die Unsicherheit der Temperatur, bei höheren Temperaturen vergrößert sich der Einfluss von Alpha.

Die beschriebene lineare thermische Längenkorrektur führt nicht in allen Fällen zu den hier dargestellten Ergebnissen:

- Die Werkstücke können Inhomogenitäten bezüglich E-Modul und Ausdehnungskoeffizienten aufweisen. Dies führt zu einer richtungsabhängigen Längenausdehnung.
- Bei ungleichen Wandstärken der Werkstücke (z. B. „Filigranteile“ aus Alu-Legierungen für die Luft- und Raumfahrt) können bei Temperaturänderungen durch partielle Temperaturunterschiede Verformungen auftreten.
- Die realen Ausdehnungskoeffizienten der Werkstücke können erheblich von den angenommenen Werten abweichen.

Natürlich gibt es auch zahlreiche Fälle, in denen ohne thermische Längenkorrektur gemessen wird.

Die wichtigsten sind:

- Messungen bei 20 °C bei minimalen Temperaturabweichungen,
- Messungen an Stahlwerkstücken mit Stahlskalen,
- Messung sehr kleiner Längen,
- das Messgerät bietet keine Korrekturmöglichkeit,
- ungenügend geschultes Personal.

Wird jedoch mit einem temperaturstabilen KMG und einer größeren Abweichung von der Bezugstemperatur gemessen, entstehen inakzeptable Messabweichungen. Die Abschätzung der dann entstehenden maximalen Messunsicherheit ergibt sich nach der heute üblichen Berechnung durch Addition einer mittleren Unsicherheit U_m nach Gleichung (3) plus den Betrag der linearen mittleren Ausdehnung ΔL_m (systematischer Anteil) nach Gleichung (1):

$$U_{max} = U_m + |\Delta L_m| \qquad (4)$$

In Tab. 2 können hierzu die Werte in Spalte 3 und in Spalte 4 oder 5 addiert werden, da angenommen wird, dass ohne Korrektur der Fall 3 kaum relevant ist. Beispielsweise würde für den Fall 2 bei einem Messobjekt aus Aluminium bei 25 °C mit Korrektur eine Restunsicherheit von

Tab. 1. In drei Fälle unterteilte Messbedingungen mit unterschiedlichen Grenzabweichungen a für die Temperatur und den Ausdehnungskoeffizienten

Fall	Messbedingungen	a_t a_α
1	■ Messung nur der Raumtemperatur ■ Messobjekt nicht austemperiert ■ α des Messobjekts nur prinzipiell bekannt	1 K 0,1 α
2	■ Messung der Temperatur am Messobjekt ■ α des Messobjekts genauer bekannt	0,5 K 0,05 α
3	■ Genaue Messung der Temperatur am Messobjekt an einer bzw. mehreren Stellen ■ α des Messobjekts kalibriert	0,2 K 0,02 α

15,5 µm vorliegen, ohne Korrektur aber von 135 µm.

Einbeziehung in die Gesamtlängenmessunsicherheit

Für die Abschätzung der Unsicherheit einer einfachen Längenmessung kann die spezifizierte zulässige Längenabweichung MPE_E herangezogen werden. Dabei wird angenommen, dass die Längenmessabweichung MPE_E normalverteilt ist. Da der Vertrauensbereich für MPE_E nach der Norm [2] 100 % beträgt, wird zur Umrechnung in die Standardunsicherheit die Gleichung u = a/3 in Bild 1 angewendet. Dies ist notwendig, da entweder nur die Standardunsicherheiten oder die erweiterten Unsicherheiten verknüpft werden können.

Dann ist die Standardunsicherheit u_E der zulässigen Längenmessabweichung:

$$u_E = \frac{MPE_E}{3} \qquad (5)$$

So ergibt sich die erweiterte Gesamtmessunsicherheit basierend auf der spezifizierten, zulässigen Längenmessabweichung unter Einbeziehung der thermisch bedingten Unsicherheit U als Standardunsicherheit zu:

$$U_{ges} = 2\sqrt{\left(\frac{MPE_E}{3}\right)^2 + \left(\frac{U}{2}\right)^2} \qquad (6)$$

Zu beachten ist hierbei, dass dieses Ergebnis nur die erweiterte Unsicherheit darstellt und deshalb der Anteil von MPE etwas reduziert ist. Rechenbeispiel für 500 mm Messlänge:

- Messobjekt aus Aluminium, t = 30 °C, Fall 2
- aus Tab. 2: U = 19,6 µm/2 = 9,8 µm
- KMG mit MPE_E = 1,1 + L/200 bei 30 °C, MPE_{500} = 1,1 + 500/200 = 3,6 µm

$$U_{ges2} = 10{,}1\mu m$$

Das Beispiel lässt erkennen, dass bei hohen Temperaturen die thermisch verursachte Messunsicherheit dominieren kann – wenn, wie im Fall 2 – Alpha und die Temperatur des Messobjekts zu ungenau bekannt sind. Wird im Beispiel der Fall 3 angenommen, ergibt sich:

$$U_{ges3} = 4{,}6\mu m$$

Der theoretisch erreichbaren Längenmessunsicherheit sind durch die Unsicherheit von α und t Grenzen gesetzt. Auch bei einer Klimatisierung auf 20 °C verbleibt eine thermisch bedingte Restunsicherheit. Im noch praktikablen Fall einer Grenzabweichung von α_t = 0,1 K bei einem Messobjekt aus Stahl beträgt die so erreichbare, thermisch verursachte, erweiterte Restunsicherheit:

$$U = 1{,}155 \cdot 0{,}1 \cdot 11{,}5 = 1{,}33\mu m/m$$

Um diese mit MPE vergleichen zu können, müsste das Ergebnis mit 1,5 multipliziert werden (Bild 1). Da dieser Anteil linear ist, könnte er auch als L/500 dargestellt werden. Das gibt zu denken! □

Werkstoff ∃10⁻⁶/K	Temperatur in °C	Längenkorrektur ΔL in µm/m	Unsicherheit *U* in µm/m Fall 1	Fall 2	Fall 3
Stahl α = 11,5	20	0	13,3	6,6	2,7
	25	57,5	15	7,5	3
	30	115	19,2	9,6	3,8
Aluminium α = 24	20	0	27,7	13,9	5,5
	25	120	31	15,5	6,2
	30	240	39,2	19,6	7,8
PVDC α = 150	20	0	173	86,6	
	25	750	194	96,5	
	30	1500	245	122,5	

Tab. 2. Längenkorrektur und abgeschätzte Unsicherheit der Längenkorrektur für verschiedene Werkstoffe und Temperaturen für die Fälle 1, 2 und 3

Literatur

1 Neumann, H. J.: Lineare thermische Einflüsse – Ein Leitfaden für den praktischen Einsatz. Aus: Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten, 2. Auflage, expert verlag, Renningen 2005, Band 646, S. 283–304

2 ISO/DIS 10360–2, Dezember 2005, Beuth Verlag, Berlin

3 Pressel, H.-G.; Hageney, T.: Messunsicherheit von Prüfmerkmalen in der Koordinatenmesstechnik. expert verlag, Renningen 2007

Autor

Dipl.–Ing. (FH) Hans Joachim Neumann, geb. 1932, studierte Elektronik an der Ingenieurschule Mittweida. Bis 1991 war er für Carl Zeiss, Oberkochen, im Bereich Messtechnik tätig. Danach war er als freier Mitarbeiter elf Jahre Mitglied in den ISO- und VDI-Gremien für Koordinatenmesstechnik. Heute ist er Fachautor und Berater.

Kontakt

Hans Joachim Neumann
neumann-oberkochen@t-online.de

QM-Infocenter.de ▶ QZ102511