

Kalibrierung eines Endmaßes der Nennlänge 50 mm

Autor: DKD

Dieses Beispiel wurde der DKD-3-E1 entnommen (siehe unter S4).

Die Kalibrierung eines Endmaßes der Toleranzklasse 0 (ISO 3650) mit einer Nennlänge von 50 mm erfolgt durch Vergleich mit Hilfe eines Längenkomparators und eines kalibrierten Endmaßes derselben Nennlänge als Referenznormal, das aus demselben Material wie das zu kalibrierende Endmaß gefertigt ist. Die Mittenmaßdifferenz wird in vertikaler Positionierung der beiden Endmaße mit zwei hochauflösenden Tastern bestimmt, die jeweils die obere und die untere Meßfläche berühren. Die tatsächliche Länge des zu kalibrierenden Endmaßes ergibt sich aus der tatsächlichen Länge des Referenznormales entsprechend der Gleichung:

$$l_x = l_s + \delta l$$

wobei δl die ermittelte Längendifferenz ist. l_x und l_s sind die Längen der Endmaße unter den Meßbedingungen, insbesondere bei einer Temperatur, die aufgrund der Unsicherheit der Messung der Labortemperatur i.a. nicht mit der Bezugstemperatur für Längenmessungen übereinstimmt.

Modellgleichung:

$$l_x = l_s + \delta l_D + \delta l + \delta l_C - L \cdot (\alpha_{av} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta t_{av} + u_{at}) - \delta l_V$$

Liste der Größen:

Größe	Einheit	Definition
l_x	mm	Länge des zu kalibrierenden Endmaßes
l_s	mm	Länge des Referenzendmaßes bei der Bezugstemperatur $t_0 = 20 \text{ °C}$ gemäß seinem Kalibrierschein
δl_D	mm	Längenänderung des Referenzendmaßes seit seiner letzten Kalibrierung infolge von Drift
δl	mm	beobachtete Längendifferenz zwischen dem unbekanntem Endmaß und dem Referenzendmaß
δl_C	mm	Korrektur hinsichtlich einer Nichtlinearität und eines Offset des Längenkomparators
L	mm	nominelle Länge der Endmaße
α_{av}	K^{-1}	Mittelwert der thermischen Ausdehnungskoeffizienten des zu kalibrierenden und des Referenzendmaßes
δt	K	Temperaturdifferenz zwischen dem zu kalibrierenden und dem Referenzendmaß
$\delta \alpha$	K^{-1}	Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen dem zu kalibrierenden und dem Referenzendmaß
Δt_{av}	K	Abweichung der mittleren Temperatur des zu kalibrierenden Endmaßes und des Referenzendmaßes von der Bezugstemperatur
u_{at}		Terme zweiter Ordnung der Temperaturkorrektur
δl_V	mm	Korrektur hinsichtlich nicht-zentrischer Antastung der Meßflächen des zu kalibrierenden Endmaßes

l_s : Typ B Normalverteilung
 Wert: 50.00002 mm
 Erweiterte Messunsicherheit: $30 \cdot 10^{-6}$ mm
 Erweiterungsfaktor: 2

Referenznormal: Im Kalibrierschein wird die Länge des Referenzendmaßes zusammen mit der beigeordneten erweiterten Meßunsicherheit für einen Endmaßsatz mit 50,000 02 mm ± 30 nm (Erweiterungsfaktor $k = 2$) angegeben.

δI_D : Typ B Dreieckverteilung
Wert: 0 mm
Halbbreite der Grenzen: $30 \cdot 10^{-6}$ mm

Drift des Referenznormales: Die zeitliche Drift der Länge des Referenzendmaßes wird aus früheren Kalibrierungen auf Null mit maximalen Abweichungen von ± 30 nm abgeschätzt. Die allgemeine Erfahrung mit Endmaßen dieses Typs weist darauf hin, daß eine Nulldrift höchst wahrscheinlich ist und daß eine Dreieckverteilung für etwaige Abweichungen angenommen werden kann.

δI : Typ A
Methode der Beobachtung: Direkt
Anzahl der Beobachtungen: 5

Nr.	Beobachtung
1	$-100 \cdot 10^{-6}$ mm
2	$-90 \cdot 10^{-6}$ mm
3	$-85 \cdot 10^{-6}$ mm
4	$-95 \cdot 10^{-6}$ mm
5	$-100 \cdot 10^{-6}$ mm

Arithmetischer Mittelwert: $-94.000 \cdot 10^{-6}$ mm
Schätzwert für die Standardabweichung: $12 \cdot 10^{-6}$ mm
Freiheitsgrad des Schätzwerts: 9
Standardmessunsicherheit: $4.749 \cdot 10^{-6}$ mm

Beobachtungen: Zur Bestimmung der Differenz zwischen dem unbekanntem Endmaß und dem Referenzendmaß wurden fünf Beobachtungen durchgeführt, wobei der Längenkomparator mit Hilfe des Referenznormales vor jeder Ablesung bezüglich eines Offsets korrigiert wurde. Die zusammengefaßte Abschätzung der Standardabweichung erfolgt aufgrund der Prüfungen, mit denen nachgewiesen wurde, daß der verwendete Längenkomparator den Forderungen des Leitfadens für die Kalibrierung von Endmaßen EA-4/14 entspricht.

δI_C : Typ B Rechteckverteilung
Wert: 0 mm
Halbbreite der Grenzen: $32 \cdot 10^{-6}$ mm

Längenkomparator: Vor der Kalibrierung wurde überprüft, daß der Längenkomparator den geforderten Spezifikationen des Leitfadens für die Kalibrierung von Endmaßen EA-4/14 entspricht. Daher kann sichergestellt werden, daß für Längendifferenzen D bis zu ± 10 μ m die Korrekturen der angegebenen Längendifferenz innerhalb der Grenzen $\pm(30\text{nm} + 0,02 \cdot |D|)$ liegen. Aus den Toleranzen des zu kalibrierenden Endmaßes der Toleranzklasse 0 und des Referenzendmaßes der Toleranzklasse K ergibt sich die maximale Längendifferenz zu ± 1 μ m, d.h. die Grenzen für Nichtlinearitäts- und Offsetkorrekturen des Längenkomparators betragen ± 32 nm.

L : Konstante
Wert: 50.0 mm

α_{av} : Typ B Dreieckverteilung
Wert: $11.5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}
Halbbreite der Grenzen: $1 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}

Längenausdehnungskoeffizient: Aus den Angaben im Kalibrierschein des Referenzendmaßes und der Herstellerangaben für das zu kalibrierende Endmaß ist ersichtlich, daß der thermische Längenausdehnungskoeffizient der Stahleindmaße innerhalb von $(11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ liegt.

$$\alpha_{av} = (\alpha_s + \alpha_x)/2$$

δt : Typ B Rechteckverteilung
Wert: 0 K
Halbbreite der Grenzen: 0,05 K

Temperaturkorrektur: Es wurde dafür Sorge getragen, daß die Endmaße vor der Kalibrierung die Temperatur des Meßraumes annehmen. Eine verbleibende Temperaturdifferenz zwischen dem Referenznormal und dem zu kalibrierenden Endmaß wird auf maximal $\pm 0,05 \text{ K}$ geschätzt.

$\delta \alpha$: Typ B Dreieckverteilung
Wert: 0 K^{-1}
Halbbreite der Grenzen: $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Längenausdehnungskoeffizient: Für die Differenz der Längenausdehnungskoeffizienten ergibt sich aus der Kombination der beiden Rechteckverteilungen eine Dreiecksverteilung in den Grenzen $\pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Δt_{av} : Typ B Rechteckverteilung
Wert: 0 K
Halbbreite der Grenzen: 0,5 K

Temperaturkorrektur: Die Abweichung der mittleren Temperatur im Meßraum von der Bezugstemperatur $t_0 = 20 \text{ °C}$ wird auf maximal $\pm 0,5 \text{ K}$ geschätzt.

u_{at} : Typ B Normalverteilung
Wert: 0
Erweiterte Messunsicherheit: $0,236 \cdot 10^{-6}$
Erweiterungsfaktor: 1

Da der Schätzwert für die Differenz der Längenausdehnungskoeffizienten und die Abweichungen der mittleren Temperatur von der Bezugstemperatur Null sind, müssen bei der Ermittlung des entsprechenden Unsicherheitsbeitrags Terme zweiter Ordnung berücksichtigt werden. Dadurch ergibt sich die dem Produktterm $\delta \alpha \cdot \Delta t_{av}$ in der Modellgleichung beizuordnende Standardmeßunsicherheit als Produkt der Standardmeßunsicherheiten, die seinen Faktoren beizuordnen ist (siehe mathematische Anmerkung DKD-3-E1 in Abschnitt S4.13, Gl. (S4.5)). So ergibt sich schließlich $u(\delta \alpha \cdot \Delta t_{av}) = 0,236 \cdot 10^{-6}$.

δl_v : Typ B Rechteckverteilung
Wert: 0 mm
Halbbreite der Grenzen: $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$

Nicht-zentrische Antastung: Bei Endmaßen der Toleranzklasse 0 muß die aus Messungen in der Mitte und an den vier Ecken ermittelte Längendifferenz innerhalb von $\pm 0,12 \text{ µm}$ liegen (ISO 3650). Unter der Annahme, daß diese Änderung an den Meßflächen entlang der 9 mm langen kurzen Kante auftritt und daß das Mittenmaß in einem Kreis mit dem Radius 0,5 mm angetastet wird, wird eine Korrektur aufgrund einer nicht-zentrischen Antastung auf maximal $\pm 6,7 \text{ nm}$ geschätzt.

Korrelation:

Die Eingangsgrößen werden als unkorreliert angesehen.

Messunsicherheits-Budgets: **l_x :** Länge des zu kalibrierenden Endmaßes

Größe	Wert	Std.-Mess-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
l_S	50.00002000 mm	$15.00 \cdot 10^{-6}$ mm	Normal	1.0	$15 \cdot 10^{-6}$ mm	19.3 %
δl_D	0.0 mm	$12.25 \cdot 10^{-6}$ mm	Dreieck	1.0	$12 \cdot 10^{-6}$ mm	12.8 %
δl	$-94.000 \cdot 10^{-6}$ mm	$4.749 \cdot 10^{-6}$ mm	Normal	1.0	$4.7 \cdot 10^{-6}$ mm	1.9 %
δl_C	0.0 mm	$18.48 \cdot 10^{-6}$ mm	Rechteck	1.0	$18 \cdot 10^{-6}$ mm	29.2 %
L	50.0 mm					
α_{av}	$11.5000 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$408.2 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$	Dreieck	0.0	0.0 mm	0.0 %
δt	0.0 K	0.02887 K	Rechteck	$-580 \cdot 10^{-6}$	$-17 \cdot 10^{-6}$ mm	23.6 %
$\delta \alpha$	0.0 K^{-1}	$816.5 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$	Dreieck	0.0	0.0 mm	0.0 %
Δt_{av}	0.0 K	0.2887 K	Rechteck	0.0	0.0 mm	0.0 %
u_{at}	0.0	$236.0 \cdot 10^{-9}$	Normal	-50	$-12 \cdot 10^{-6}$ mm	11.9 %
δl_V	0.0 mm	$3.868 \cdot 10^{-6}$ mm	Rechteck	-1.0	$-3.9 \cdot 10^{-6}$ mm	1.3 %
l_x	49.99992600 mm	$34.18 \cdot 10^{-6}$ mm				

Ergebnisse:

Größe	Wert	Erw.-Mess-unsicherheit	Erweiterungsfaktor	Überdeckungswahrscheinlichkeit
l_x	49.999926 mm	$68 \cdot 10^{-6}$ mm	2.00	95% (t-Tabelle 95.45%)