

Einfluss der Temperatur auf die Längenmessung

Ein Leitfaden für den Messtechniker zum Abschätzen der Größenordnungen der Abweichungen

Michael Hernla, Dortmund, und Hans Joachim Neumann, Oberkochen

Veröffentlicht in: *QZ Qualität und Zuverlässigkeit, München, 42 (1997) 4, S. 464-468*
(Leicht überarbeitete Fassung)

Die Temperatur hat einen großen Einfluss auf die Unsicherheit von Längenmessungen. Durch eine Unsicherheitsabschätzung lässt sich bereits bei der Prüfplanung feststellen, ob man die temperaturbedingte systematische Längenmessabweichung bei einem Werkstück berücksichtigen muss. Wesentliches Problem hierbei ist die Abschätzung brauchbarer Werte für die Temperaturen und die Ausdehnungskoeffizienten sowie deren Grenzabweichungen.

Effects of temperature on length measurement. Guidelines for the tester on assessing the magnitude of deviations. The temperature factor exerts a considerable influence on the uncertainty of length measurements. By estimating this uncertainty, it is possible to establish, as early as the test scheduling stage, whether provision must be made for a workpiece to undergo systematic, temperature-related deviations in length. The fundamental problem in this connection lies in the assessment of appropriate values for temperatures and coefficients of expansion and their limits of deviation.

Einleitung

Der Einfluss der Temperatur auf die Messergebnisse von Längenmessungen wird in der betrieblichen Praxis häufig unterschätzt. Eine Ursache dafür sind die vielen Einflussgrößen, die sich zum Teil nur schwer erfassen lassen. Kann man von hinreichend stabilen Verhältnissen ausgehen [1], so ist es auch dem Praktiker möglich, die thermischen Auswirkungen auf die Messunsicherheit zu berechnen. Anhand der statischen Einflüsse wird gezeigt, wie sich die Messunsicherheit mit und ohne Temperaturkorrektur abschätzen lässt. Dem Anwender eröffnen sich Möglichkeiten, die temperaturbedingten Unsicherheitsanteile zu reduzieren. Alle Betrachtungen gelten ausdrücklich auch für Koordinatenmessgeräte.

Systematische Längenabweichung

Die temperaturbedingte Längenabweichung ΔL wird von den Ausdehnungskoeffizienten der Materialien und den Abweichungen von der Bezugstemperatur 20 °C bestimmt:

$$\Delta L = L (\alpha_W \cdot \Delta t_W - \alpha_S \cdot \Delta t_S) \quad (1)$$

- L Nennmaß
- α Linearer Ausdehnungskoeffizient
- Δt Abweichung von der Bezugstemperatur, $\Delta t = t - 20^\circ\text{C}$
- W Index für Werkstück
- S Index für Maßstab (Skala)

Die temperaturbedingten Längenabweichungen sind zu korrigieren, wenn die zu messenden Toleranzen dies erfordern und die Temperaturen des Werkstücks sowie des Maßstab des Messgerätes bekannt sind. Dazu subtrahiert man die nach Gleichung (1) berechnete Abweichung ΔL von der gemessenen Länge.

Unsicherheit mit Korrektur

Die Längenmessunsicherheit ist nach [2] als erweiterte Messunsicherheit für ein Vertrauensniveau von 95% zu berechnen. Bei rechteckverteilten Ausgangsgrößen ergibt sich mit der Quadratsumme der partiellen Ableitungen von Gleichung (1) nach den einzelnen Messgrößen, multipliziert mit deren Unsicherheiten:

$$U = L \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\Delta t_w a_{\alpha w})^2 + (\alpha_w a_{t_w})^2 + (\Delta t_s a_{\alpha s})^2 + (\alpha_s a_{t_s})^2} \quad (2)$$

Für die unbekanntenen Grenzabweichungen der Ausdehnungskoeffizienten a_α und der Temperaturmessung a_t werden die Fehlergrenzen dieser Größen eingesetzt. Trifft die Bedingung der Rechteckverteilung im Einzelfall nicht zu, sind die Werte a_α bzw. a_t um den Faktor $\sqrt{3}/2$ kleiner anzusetzen. Das ist in der Regel bei annähernd normalverteilten Temperaturen bzw. deren Abweichungen sowie bei den Ausdehnungskoeffizienten aus verschiedenen Materialchargen der Fall. Auch wenn die Abweichungen von der Bezugstemperatur vernachlässigbar klein sind, verbleibt eine Restunsicherheit der temperaturbedingten Längenabweichung, die sich aus den Ausdehnungskoeffizienten und den Fehlergrenzen der Temperaturmessung ergibt.

Unsicherheit ohne Längenkorrektur

Im Fertigungsbereich weicht die Raumtemperatur oft von der Bezugstemperatur ab und nimmt bei Tag und Nacht unterschiedliche Werte an. Dieser Unterschied ist besonders groß, wenn über Nacht alle Wärmequellen wie Heizung, Maschinen und Beleuchtung abgeschaltet werden. Im Laufe des Tages erwärmen sich der Raum und das Messgerät, wobei dessen Maßstäbe aufgrund der thermischen Isolation und der großen Massen längere Zeit eine niedrigere Temperatur aufweisen. Außerdem kann es vorkommen, dass Werkstücke gemessen werden, deren Temperaturen nach der Bearbeitung höher als die Raumtemperatur sind. Wird in diesen Fällen keine Temperaturkorrektur durchgeführt, weil entweder das Messgerät diese Möglichkeit nicht bietet oder weil sie aus Unkenntnis der Auswirkungen nicht genutzt wird, ist die Messunsicherheit deutlich größer.

Zur Abschätzung der entstehenden Längenmessunsicherheit lässt sich mit Gleichung (1) eine mittlere systematische Längenabweichung ΔL_T für die Raumtemperatur t_R berechnen. Die mittlere Unsicherheit U dieser Abweichung erhält man durch Einsetzen der möglichen Abweichungen der Werkstück- und der Maßstabtemperatur von der Raumtemperatur in Gleichung (2). Es gilt $t_W \approx t_S \approx t_R$. Auch wenn hier Temperaturunterschiede vorliegen, ändert sich das Ergebnis nur geringfügig. Die maximale Unsicherheit ergibt sich dann nach [3] als erweiterte Unsicherheit für das Vertrauensniveau 95%:

$$U_{max} = U + |\Delta L_T| \quad (3)$$

Wann muss die Temperatur korrigiert werden?

Die Temperaturen am Messplatz geben eine erste Antwort auf die Frage, ob eine Korrektur erforderlich ist. Die Umrechnung der maximalen Unsicherheit auf die aktuelle Messlänge, multipliziert mit dem Faktor 10 [4], ergibt die prüfbare Toleranz.

Ist sie größer als die Zeichnungstoleranz, muss der Temperatureinfluss korrigiert werden. Auch dann ist die Unsicherheit der Korrektur abzuschätzen. Zu beachten ist, daß der Temperatureinfluss nur einen Beitrag zur Gesamtunsicherheit des Messergebnisses liefert. Deshalb wurde hier ein Faktor gewählt, der noch anderen Unsicherheitsanteilen Raum lässt.

Grenzabweichung der Ausdehnungskoeffizienten

Um die Unsicherheit der temperaturbedingten Längenabweichung nach Gleichung (2) zu berechnen, müssen die Grenzabweichungen der Ausdehnungskoeffizienten und die Fehlergrenzen der Temperaturmessung bekannt sein bzw. realistisch geschätzt werden. Die Grenzabweichungen der Ausdehnungskoeffizienten der zu messenden Werkstücke beschreiben die mögliche Streuung zwischen verschiedenen Chargen des Materials, aber auch die der oft nicht genau bekannten Nennwerte. Bei Stahl kann α zwischen $10 \cdot 10^{-6}/K$ und $14 \cdot 10^{-6}/K$ liegen (Tabelle 1). Im Zweifelsfall sollte mit $\alpha_W = 12 \cdot 10^{-6}/K$ und $a_{\alpha W} = 2 \cdot 10^{-6}/K$ bzw. allgemein mit $a_{\alpha W} \approx \alpha_W/5$ gerechnet werden. Bei anderen Materialien sieht es ähnlich aus.

Die Ausdehnungskoeffizienten der Maßstäbe sind meist besser bekannt. Die Grenzabweichung von Zerodur beträgt $0,05 \cdot 10^{-6}/K$. Glasmaßstäbe werden meist aus Floatglas mit einer Grenzabweichung von $a_{\alpha S} = 0,5 \cdot 10^{-6}/K$ hergestellt. Bei Stahlmaßstäben ist mit $\alpha_S = 11,5 \cdot 10^{-6}/K$ und $a_{\alpha S} = 1,2 \cdot 10^{-6}/K$ zu rechnen.

Tabelle 1: Anhaltswerte für die Ausdehnungskoeffizienten α verschiedener Materialien in $10^{-6}/K$

Material	α	Material	α	Material	α
Aluminium	24	Floatglas	7,8	Messing	18
Bronze	18	Grauguß	11	Nickelstahl	12
Chromstahl	10	Hartgestein	5,5	Stahlguß	14
Endmaßstahl	11,5	Hartmetall	6	Zerodur	0,05
Flintglas	9,8	Keramik	6	Zink	26

Fehlergrenzen der Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung setzt man mechanische Berührungsthermometer (Körperthermometer) mit einem Skalenteilungswert von 0,2 K oder elektrische Berührungsthermometer (Widerstandsthermometer mit Metall- oder Halbleiter-Messwiderständen) ein. Letztere werden häufig direkt mit dem Messgerät gekoppelt, so dass sich die Temperatur automatisch korrigieren lässt. Die Fehlergrenzen sind für die automatische und die manuelle Temperaturmessung mit 0,2 K etwa gleich [5].

Die Abweichungen hängen aber auch von anderen Faktoren ab. Eine wesentliche Rolle spielen die örtlichen und zeitlichen Temperaturunterschiede, z.B. beim Abkühlen eines Werkstücks, das noch warm von einer Bearbeitungsmaschine kommt. Auch die Trägheit des Thermometers selbst und der Wärmekontakt an einer rauen Oberfläche haben einen Einfluss. Wenn nur die Raumtemperatur gemessen wird, ist mit einer deutlich größeren Fehlergrenze zu rechnen. In einer nicht klimatisierten Fertigungshalle kann sie mehr als 2 K betragen.

Tabelle 2 zeigt, in welchen Größenordnungen die Fehlergrenzen der Temperaturmessung bei verschiedenen Messbedingungen liegen können. Die gleichlautenden Formulierungen bedeuten nicht, dass die Unsicherheiten bei Maßstab und Werkstück gleich sein müssen. Im Gegenteil ist oft eine größere Fehlergrenze a_{tW} anzunehmen, z.B. bei ungenügendem Temperieren des Werkstücks selbst in optimalen Messräumen. Diese berücksichtigt teilweise auch die thermisch bedingten Verformungen, die am Werkstück und am Messgerät auftreten können [6]. Bei Koordinatenmessgeräten und bei großen Werkstücken mit komplizierter Geometrie und unterschiedlichen Wandstärken haben diese einen bedeutenden Einfluss. Hier sind deshalb die ungünstigeren Fehlergrenzen anzunehmen, solange nicht spezielle Maßnahmen diese Abweichungen am Messgerät klein halten oder korrigieren (siehe Fall 3 in Tabelle 2). Auch bei Glasmaßstäben ist wegen ihrer schlechten Wärmeleitfähigkeit mit einer größeren Fehlergrenze als bei Stahl zu rechnen.

Tabelle 2: Messbedingungen und Fehlergrenzen der Temperaturmessung am Maßstab und am Werkstück

Fall	Messbedingungen	a_t
1	Kein vollständiger Temperatúrausgleich und unbekannte Temperaturverteilungen im Messgerät und im Werkstück, Temperaturen nur an je einer Stelle gemessen, schlechter Wärmekontakt durch raue Werkstückoberfläche, komplizierte Werkstücke mit unterschiedlichen Wandstärken	1 K
2	Kein vollständiger Temperatúrausgleich beim Messgerät im klimatisierten Messraum, Werkstücke nicht austemperiert, Temperaturmessung an jeweils mehreren Stellen	0,5 K
3	Vollständiger Temperatúrausgleich im Werkstück durch ausreichendes Temperieren, im Messgerät durch Aluminiumkonstruktion (Koordinatenmessgeräte in CARAT-Technologie [7]) oder durch Korrektur der Verformung [8]	0,2 K

Beispiele für korrigierte Längenabweichung

Tabelle 3 gibt temperaturbedingte Längenabweichungen und ihre Unsicherheiten nach Gleichung (1) und (2) für Werkstücke aus Stahl an. Hier geht man von einem Werkstoff mit hinreichend bekanntem Ausdehnungskoeffizienten aus und setzt dessen Grenzabweichung mit 10% vom Nennwert an. Alle Werte gelten für die Messlänge 1 m; bei anderen Messlängen sind sie entsprechend umzurechnen. Die Werte für $t_S=t_W=20^\circ\text{C}$ sind die Restunsicherheiten, die in keinem Fall unterschritten werden. Die Tabelle gilt nur für die angegebenen Bedingungen. Im Einzelfall sind die Grenzabweichungen der Ausdehnungskoeffizienten und der Temperaturmessung nach den vorliegenden Verhältnissen abzuschätzen.

Tabelle 3: Längenabweichungen und Messunsicherheiten bei der Messung von Werkstücken aus Stahl mit Korrektur; $\alpha_W=11,5\cdot 10^{-6}/\text{K}$, $a_{\alpha W}=1,2\cdot 10^{-6}/\text{K}$, Temperaturfehlergrenzen a_t aus Tabelle 2

Maßstab des Messgerätes			Werkstück		Abweichung	Unsicherheit U der Korrektur		
Material	α_S	$a_{\alpha S}$	t_S	t_W	ΔL_T	$a_t=1\text{ K}$	$a_t=0,5\text{ K}$	$a_t=0,2\text{ K}$
---	$10^{-6}/\text{K}$	$10^{-6}/\text{K}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$
Stahl	11,5	1,2	20	20	0	18,8	9,4	3,8
			20	22	23,0	19,0	9,8	4,7
			22	22	0	19,2	10,2	5,4
Glas	7,8	0,8	20	20	0	16,0	8,0	3,2
			20	22	23,0	16,3	8,5	4,2
			22	22	7,4	16,3	8,6	4,4
Zerodur	0,05	0,05	20	20	0	13,3	6,6	2,7
			20	22	23,0	13,6	7,2	3,8
			22	22	22,9	13,6	7,2	3,8

Die Genauigkeit der Temperaturmessung beeinflusst die Unsicherheit der Längenkorrektur sehr stark. Aber auch die Abweichung von der Bezugstemperatur spielt eine Rolle. Bei großen Temperaturfehlergrenzen ist ihr Einfluss gering, aber bei genauen Messungen wird er spürbar (letzte Spalte in Tabelle 3). Hier sollte die Bezugstemperatur möglichst genau eingehalten werden.

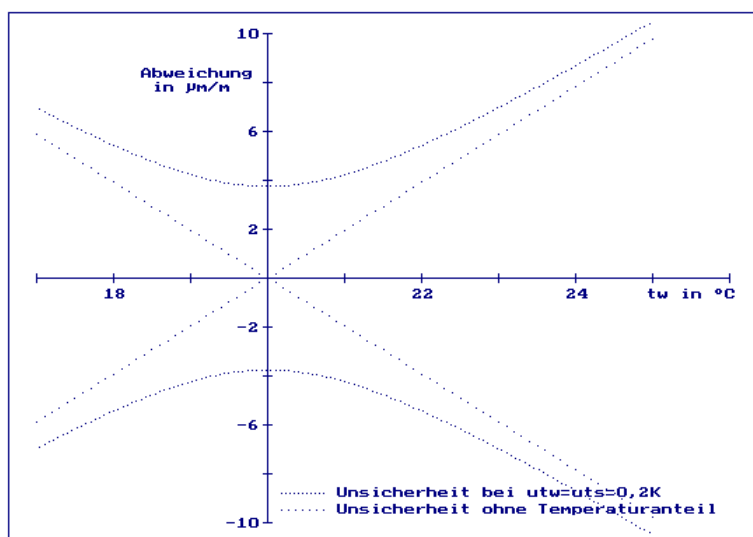
Auch der Ausdehnungskoeffizient des Maßstabs hat einen deutlichen Einfluss, wobei der Stahlmaßstab am schlechtesten abschneidet. Zerodurmaßstäbe haben wegen des kleinen Ausdehnungskoeffizienten und dessen geringer Grenzabweichung einen vernachlässigbar kleinen Anteil an der Messunsicherheit, so dass sich hier nur die Temperaturabweichung des Werkstücks und deren Fehlergrenze auswirken. Ganz allgemein sind Maßstäbe mit möglichst kleinen Ausdehnungskoeffizienten zu bevorzugen, wenn die thermisch bedingten Längenabweichungen tatsächlich korrigiert werden.

Die Unsicherheiten bei $t_S=t_W=20^\circ\text{C}$ gelten auch für die Messung ohne Korrektur in klimatisierten Messräumen, deren mittlere Raumtemperatur 20°C ist. Dann beschreibt a_i die Grenzabweichung von der Bezugstemperatur. Die Messunsicherheit lässt sich durch genauere Temperaturmessung und Korrektur noch weiter verringern.

Die Werte für den Stahlmaßstab gelten auch für das Komparatorverfahren, das neuerdings auch Substitutionsverfahren genannt wird. Dabei misst man ein Referenzwerkstück aus Stahl mit bekannten, möglichst kalibrierten Abmessungen an derselben Stelle im Messbereich und unter denselben Bedingungen wie das Werkstück. Die Werkstückmaße ergeben sich als Differenzen zu den Maßen des Referenzwerkstückes. Das Messgerät dient lediglich zur Maßübertragung. Anstelle der Daten des Messgerätes sind hier der Ausdehnungskoeffizient und die Temperatur des Referenzwerkstückes sowie deren Fehlergrenzen in (2) einzusetzen.

Die thermisch bedingten Messunsicherheiten über einen größeren Temperaturbereich sind im Bild 1 dargestellt. Wenn die Messunsicherheit aus Wiederholungsmessungen bestimmt und dabei der Temperatureinfluss mit erfasst wird, ist nur der Unsicherheitsanteil der Ausdehnungskoeffizienten gesondert abzuschätzen (Geraden in Bild 1).

Bild 1:
Thermisch bedingte
Messunsicherheiten beim
Komparatorverfahren;
Werkstück und
Referenzwerkstück aus Stahl
mit $\alpha=11,5\cdot 10^{-6}/\text{K}$ und
 $a_\alpha=1,2\cdot 10^{-6}/\text{K}$



Beispiele für unterlassene Korrektur der Abweichung

Wird die temperaturbedingte Längenabweichung nicht korrigiert, muss grundsätzlich mit höheren Unsicherheiten gerechnet werden. Dies gilt insbesondere bei großen Abweichungen von der Bezugstemperatur.

Die Unsicherheit ohne Korrektur nach Gleichung (3) hängt vor allem vom Temperaturbereich, der durch die Umgebungsbedingungen bestimmt wird, und von den Temperaturabweichungen des Messgeräts und des Werkstücks ab. Dies sind aber oft nicht bekannt, sondern müssen geschätzt werden. Tabelle 4 beschreibt die entsprechenden Verhältnisse in einer Fertigungshalle. Dabei wird angenommen, dass die Temperaturen, die jahres- und tageszeitlich bedingt sind, bis zu 25°C betragen können. Weiter werden die Grenzabweichungen des Maßstabs und des Werkstücks von der Raumtemperatur mit 2 K angesetzt. Die Raumtemperaturen und die Temperaturabweichungen in der Tabelle sind Rechenbeispiele. Ausschlaggebend sind die tatsächlichen Werte und ihre Verteilung, die sich im Einzelfall durch Temperaturaufzeichnungen ermitteln lassen.

Tabelle 4: Längenabweichungen und Messunsicherheiten bei der Messung von Werkstücken aus Stahl in einer Fertigungshalle ohne Korrektur; $a_F=2$ K, Ausdehnungskoeffizienten und deren Grenzabweichungen wie in Tabelle 3

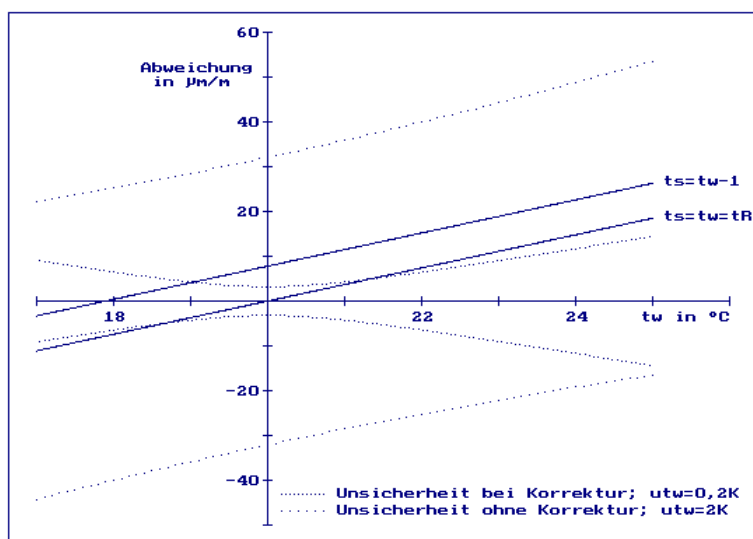
Maßstab	Raumtemperatur	Mittlere Abweichung	Mittlere Unsicherheit	Maximale Unsicherheit
---	t_R	ΔL_T	U	U_{max}
---	°C	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
Stahl	20	0	37,6	37,6
	22	0	37,8	37,8
	25	0	38,8	38,8
Glas	20	0	32,1	32,1
	22	7,4	32,2	39,6
	25	18,5	33,0	51,5
Zerodur	20	0	26,6	26,6
	22	22,9	26,7	49,9
	25	57,2	27,4	84,7

Tabelle 4 zeigt im Vergleich mit der Tabelle 3 bei 22°C, dass die maximalen Unsicherheiten hier wesentlich größer sind. Selbst mit einer ungenauen Temperaturbestimmung ist demnach die Messunsicherheit mit Korrektur kleiner. Der Einfluss der unterschiedlichen Maßstäbe wird ebenfalls deutlich. Bei Zerodur ist U_{max} am größten, bei Stahl am kleinsten. Ganz allgemein ist immer der Maßstab am besten zur Messung ohne Korrektur geeignet, dessen Ausdehnungskoeffizient etwa dem des Werkstücks entspricht - besonders bei großen Abweichungen von der Bezugstemperatur.

Bild 2 stellt die Abweichungen und Unsicherheiten mit und ohne Korrektur gegenüber. Bei gleichen Temperaturen am Maßstab und am Werkstück entspricht die Gerade für die mittlere Längenabweichung ΔL_T ohne Korrektur der Geraden für $t_S=t_W$ mit Korrektur. Die Unsicherheiten unterscheiden sich jedoch deutlich. Bei 20°C ist die Restunsicherheit mit Korrektur von rund 3 $\mu\text{m/m}$ erkennbar.

Zusätzlich ist im Bild 2 der Fall $t_S=t_W-1$ dargestellt, d.h. die Temperatur des Messgeräts liegt um 1 K unterhalb der Werkstücktemperatur. Die Gerade für die Abweichung verläuft oberhalb der Geraden für den Fall der Temperaturgleichheit. Der für diesen Fall nicht eingezeichnete Vertrauensbereich mit Korrektur ist nur wenig größer als bei $t_S=t_W$. Die Abweichungen liegen immer noch innerhalb der Grenzen für die Messung ohne Korrektur.

Bild 2:
Temperaturbedingte Längenabweichungen und Unsicherheiten bei der Messung von Stahl mit einem Glasmaßstab; Ausdehnungskoeffizienten wie in Tabelle 3; Fehlergrenzen der Temperatur bei Korrektur 0,2 K, ohne Korrektur 2 K





Genauere Messergebnisse

Der größte Anteil der Unsicherheit stammt aus der Abweichung von der Bezugstemperatur und der Grenzabweichung des Werkstück-Ausdehnungskoeffizienten. Für sehr genaue Messungen sollten deshalb die Bezugstemperatur auch mit Korrektur eingehalten und der Ausdehnungskoeffizient kalibriert werden, wie es z.B. bei Parallelendmaßen üblich ist.

Die in den Beispielen angegebenen Unsicherheiten gelten nur, wenn man die vorausgesetzten Bedingungen bei der Messung einhält. Besonders muss auf eine ausreichende Temperierung der Werkstücke geachtet werden. Auch die Ausdehnungskoeffizienten müssen möglichst genau bekannt sein. Die temperaturbedingte Längenmessunsicherheit ist mit den anderen Anteilen der Messunsicherheit, z.B. den Grenzabweichungen des Messgerätes, durch quadratische Addition zusammenzufassen.

Literatur

- [1] Neumann, H. J.: Die Temperatur - ein bedeutender Einfluss auf die Rückführbarkeit von Längenmessungen. VDI-Bericht 1258 (1996), S. 177-192
- [2] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Beuth Verlag Berlin 1995
- [3] Phillips, S. D., Eberhardt, K. R., Parry, B.: Guidelines for Expressing the Uncertainty of Measurement results containing uncorrected bias. Draft 8/8/96
- [4] Hernla, M.: Messunsicherheit und Fähigkeit. Qualität und Zuverlässigkeit, München, 41 (1996) 10, S. 1156-1162
- [5] VDI/VDI 3511 Blatt 2 (1996): Technische Temperaturmessung; Berührungsthermometer
- [6] Trapet, E.; Wäldele, F.: Koordinatenmessgeräte in der Fertigung; Temperatureinflüsse und erreichbare Messunsicherheiten. VDI-Bericht 751 (1989), S. 209-228
- [7] Breyer, K.-H.; Pressel, H.-G.: Auf dem Weg zum thermisch stabilen Koordinatenmessgerät. Qualität und Zuverlässigkeit, München, 37 (1992) 1, S. 36-41
- [8] Schalz, K.-J.: Thermo-Vollfehler-Korrektur für Koordinatenmessgeräte. Feinwerktechnik und Messtechnik 98 (1990) 10, S. 411-414