

Einflussgrößen bei der Kalibrierung von Längenmessmitteln

Influence quantities for calibrations in dimensional metrology

Dr. R. Thalmann; Dr. F. Meli, Wabern

Kurzfassung

Die bei der Kalibrierung von Längenmessmitteln relevanten Einflussgrößen für die Messunsicherheit werden systematisch klassiert und erläutert. Es sind dies Beiträge vom als Normal verwendeten Längenmass, vom Messaufbau zur Übertragung der Messgröße, vom Taster, vom Prüfling und von der Wechselwirkung zwischen Taster und Prüfling, wobei thermische und mechanische Einflüsse fast überall eine Rolle spielen. Weiter sind Messunsicherheitsbeiträge durch dynamische Vorgänge, die verwendeten numerischen Verfahren und die Definition der Messgröße zu berücksichtigen.

1 Einleitung

Die Abschätzung der Messunsicherheit ist häufig eine anspruchsvolle Aufgabe, bedarf es doch einer genauen Analyse des Messprozesses, damit sichergestellt werden kann, dass sämtliche Einflussgrößen angemessen berücksichtigt werden. In der Regel lassen sich jedoch die in einem spezifischen Fachgebiet angewandten vielfältigen Verfahren auf wenige grundlegende Elemente und Prinzipien reduzieren. Dies ist gerade im Bereich der Kalibrierung von Längenmessmitteln der Fall, wo im Folgenden versucht wird, durch eine systematische Klassierung der grundlegenden Messprozesse und der Einflussgrößen die Abschätzung der Messunsicherheit zu erleichtern.

Durch eine Darstellung der Verfahren einerseits und der Einflussgrößen andererseits in einer Matrixstruktur können in einzelnen Feldern Schwerpunkte identifiziert und diskutiert werden. Dies nicht nur für die Ermittlung der Messunsicherheit, sondern auch zur Verbesserung des Messprozesses im Hinblick auf eine Optimierung der Messunsicherheit. Dabei werden einige grundlegende Prinzipien der Längenmesstechnik beigezogen.

Neben den schon erwähnten, in einer Matrix darstellbaren physikalischen Verfahren und Einflussgrößen werden noch weitere, „weiche“ Verfahren zu diskutieren sein, die zwar nicht durch physikalische Größen beeinflusst werden, jedoch bei der Entstehung des Messresultates einen entscheidenden Beitrag leisten: Die Berechnung und Auswertung der Messresultate, meist Computer unterstützt, sowie die Definition der Messgröße.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Kalibrierung von Längenmessmitteln. Auf Form- und Oberflächenmessungen wird nicht speziell eingegangen, wenngleich auch viele Elemente gemeinsam sind. Es wird ferner davon ausgegangen, dass der Leser mit dem Verfahren nach GUM [1] zur Abschätzung der Messunsicherheit vertraut ist, d.h. der Schätzung der Standardunsicherheit, der Ermittlung der Empfindlichkeitskoeffizienten sowie der Kombination der Messunsicherheitsbeiträge und schliesslich der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit. Es werden also die einzelnen Beiträge und – wo nötig – das mathematische Modell dazu diskutiert.

2 Grundelemente im Messprozess

2.1 Längenmass

Das für die Längenmessung verwendete Bezugsmass kann ein in der Apparatur eingebauter Massstab (meist Inkrementalmassstab), ein Laserinterferometer oder eine Vergleichslehre sein. Häufig ist es auch eine Kombination einer Vergleichslehre und einem Massstab oder einem Interferometer.

2.2 Messaufbau zur Übertragung des Längenmasses

Zur Übertragung des Bezugsmasses auf den Prüfling wird eine in der Regel eine mechanische Vorrichtung verwendet, die möglichst immun gegen äussere Einflüsse sein soll. Dies kann im einfachsten Fall das zu kalibrierende Längenmessmittel selbst sein (Kalibrierung eines Messschiebers mittels Endmassen), ein Längenkomparator für eindimensionale Messungen, oder ein komplexes Koordinatenmessgerät zur Messung dreidimensionaler Objekte.

2.3 Taster

Bei jeder Bestimmung eines Längenmasses muss die Oberfläche angetastet oder ein Merkmal auf der Oberfläche (Linie, Kante, ...) lokalisiert werden. Der dazu verwendete physikalische Effekt kann mechanischer, optischer oder auch elektrischer (z.B. kapazitiver) Natur sein. Bei mechanischen Tastsystemen sind die Formabweichung des Antastelementes und die Messung dessen Auslenkung wichtig. Zur Messung der Tasterauslenkung bzw. der Tastkraft kommen kapazitative, induktive oder optische Sensoren zum Einsatz.

2.4 Prüfling

Der Prüfling spielt im eigentlichen Messprozess eine entscheidende Rolle. Er ist den äusseren Bedingungen (insbesondere der Temperatur) ausgesetzt, unterliegt aber auch mechanischen Kräften (Schwerkraft, Spannkraft). Weiter beeinflussen die Ausrichtung des Prüflings, allfällige Formabweichungen und dessen Oberflächeneigenschaften das Messresultat.

2.5 Antastung

Die Antastung ist die Wechselwirkung des Tasters und des Prüflings. Hier gilt es bei mechanischen Tastern vor allem die durch die Tastkraft erzeugten Effekte wie Taststiftbiegung oder Abplattung zu berücksichtigen.

3 Einflussgrössen

3.1 Klima

Unter den klimatischen Einflüssen spielt natürlich vor allem die Temperatur eine grosse Rolle. Nach ISO 1 sind sämtliche Längenmessungen auf die Referenztemperatur von 20 °C zu beziehen. Dies erfordert erstens Messbedingungen, die möglichst nahe bei 20 °C liegen, zweitens eine genaue Temperaturmessung und drittens eine möglichst gute Kenntnis des Temperaturverhaltens vom Messaufbau und vom Prüfling, also deren thermische Ausdehnungskoeffizienten und allenfalls auch der Temperaturgradienten. Weitere klimatische Einflussgrössen sind Luftdruck, Feuchte und allenfalls der CO₂-Gehalt sowie anderer möglicher Restgase, dies vor allem bei interferometrischen Messungen, wo der Brechungsindex der Luft zu bestimmen ist.

3.2 Mechanik

Unter den mechanischen Einflüssen sind vor allem die Vibrationen und die Schwerkraft sowie die Trägheit bei Beschleunigungen gemeint. Sie wirken sich auf die mechanische Struktur der Messeinrichtung, den Prüfling und auf das Tastsystem aus und hängen von deren Steifigkeit ab. Im Weiteren können durch Aufspannvorrichtungen erzeugte Kräfte insbeson-

dere den Prüfling verformen. Der Verformung des Messkreises durch bedeutende Masseverschiebungen während des Messvorgangs ist ebenfalls Beachtung zu schenken.

3.3 Geometrie

Abweichungen von der Idealgeometrie der Messmaschine oder des Prüflings führen zu Messfehlern, die nur teilweise berechenbar oder korrigierbar sind. Dazu gehören die Führungsfehler der Messmaschine, Orthogonalitätsfehler der Achsen bei mehrachsigen Systemen, aber auch Formfehler und allenfalls die Oberflächentextur des Prüflings.

3.4 Ausrichtung

Eine mangelhafte Ausrichtung der durch den Prüfling vorgegebenen Messrichtung zur Richtung des verwendeten Bezugsmasses (Normal, Massstab oder Laserinterferometer) führt zum so genannten Cosinus-Fehler. Zudem kann eine seitliche Verschiebung von der vorgegebenen Messlinie zu Abweichungen führen, so z.B. bei der Kalibrierung zylindrischer Lehren (Findung des grössten Durchmessers), bei Massstäben (nicht parallele Teilstriche) oder bei Stufenendmassen (Messflächen liegen nicht rechtwinklig zur Messrichtung).

3.5 Kalibrierfaktor

Zu den in diesem Abschnitt aufgeführten Einflussgrössen gehören nicht nur die Kalibrierwerte und deren zugehörige Unsicherheit der verwendeten Messmittel und Referenzmasse, sondern auch deren Langzeitstabilität (Drift seit der letzten Kalibrierung) sowie die Linearitätsabweichung der Kennlinien, sofern diese nicht bei der Kalibrierung erfasst und entsprechend berücksichtigt wurden.

4 Grundelemente im Messprozess und deren Einflussgrössen

	Klima	Mechanik	Geometrie	Ausrichtung	Kalibrierfaktor
Längenmass	A			I	J
Messaufbau	C		F		
Taster			G		K
Prüfling	B	D	H		
Antastung		E			

Bild 1: Matrix mit den grundlegenden Prozesselementen und den darauf einwirkenden Einflussgrössen. Die dunkler schattierten Felder sind in der Regel von entsprechend grösserer Bedeutung.

Wie eingangs erwähnt soll die Wirkung der Einflussgrößen auf die einzelnen Grundelemente im Messprozess systematisch in einer Matrix dargestellt (Bild 1), diskutiert und wo möglich auch auf die wichtigsten Prinzipien der Längenmesstechnik zur Optimierung des Messprozesses und zur Minimierung der Fehler hingewiesen werden. In Matrixfeldern ohne Eintrag ist die Einflussgröße zwar meist aber nicht immer vernachlässigbar. So kann sich z.B. in einer längeren Messung der Einfluss der Temperatur auf den Taster in einer Drift des Nullpunktes auswirken.

A: Einfluss des Klimas auf das Längenmass

Im Falle eines Laserinterferometers bildet die Laserwellenlänge λ_L in Luft den Massstab. Sie leitet sich aus der Vakuumwellenlänge λ_0 aus der Beziehung $\lambda_L = \lambda_0 / n$ ab, wobei der Brechungsindex n der Luft - falls nicht mit einem Refraktometer direkt gemessen - meist mit Hilfe der Edlén-Formel aus den Einflussgrößen Luftdruck, Temperatur und Feuchte bestimmt wird.

Die relativen Änderungen $\delta n/n$ des Brechungsindex als Folge der Änderung einer Einflussgröße sind:

$$\begin{aligned} \delta p = 1 \text{ hPa} & \rightarrow \delta n/n \approx 2.7 \cdot 10^{-7} \\ \delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow \delta n/n \approx -9.2 \cdot 10^{-7} \\ \delta F = 1 \% & \rightarrow \delta n/n \approx 1 \cdot 10^{-8} \\ \delta \text{CO}_2 = 100 \text{ ppm} & \rightarrow \delta n/n \approx 1.4 \cdot 10^{-8} \end{aligned}$$

Die relative Standardunsicherheit der Edlén-Formel für die Berechnung des Brechungsindex beträgt $1 \cdot 10^{-8}$.

Bei Verwendung einer Messmaschine mit einem Massstab ist die thermische Längenänderung zu berücksichtigen. Seine Länge L_T bei Gebrauchstemperatur berechnet sich aus $L_T = L_{20} (1 + \alpha \Delta T)$ mit $\Delta T = (T - 20 \text{ }^\circ\text{C})$. Für die Messunsicherheitsberechnung spielen sowohl die Unsicherheit der Temperatur als auch die Unsicherheit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine Rolle:

$$\delta L_T^2 = (L_{20} \cdot \alpha \cdot \delta T)^2 + (L_{20} \cdot \delta \alpha \cdot \Delta T)^2$$

Obige Korrektur ist selbstverständlich auch bei Verwendung eines Vergleichsnormals als Bezugsmass zu verwenden. Häufig wird das Längenmass aus einer Kombination eines Laserinterferometers oder eines Massstabes und einem Vergleichsnormal abgeleitet. In diesen Fällen ist der Einfluss wie oben für beide zu berücksichtigen.

B: Einfluss des Klimas auf den Prüfling

Der Einfluss der Temperatur auf den Prüfling ist analog zum Temperatureinfluss auf den Massstab, mit dem Unterschied, dass der Prüfling bei der Temperatur T gemessen wird und auf die Bezugstemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$ zu korrigieren ist, die Modellgleichung als folgendermassen geschrieben wird: $L_{20} = L_T (1 - \alpha \Delta T)$.

Korrelation von A und B

Bei Kombination der Unsicherheitsbeiträge betreffend der Temperatur ist zu berücksichtigen, dass die individuellen Abweichungen der Temperatur von Massstab, Vergleichsnormal und Prüfling von der Bezugstemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in der Regel korreliert sind, d.h. dass die mittlere Abweichung ΔT verhältnismässig gross sein kann, die Unterschiede untereinander sind meist jedoch bedeutend kleiner. Die Einflüsse als nicht korreliert zu behandeln würde folglich zu bedeutend zu grossen Unsicherheiten führen. Da Korrelationen mathematisch schwierig zu behandeln sind, lohnt es sich, die Modellgleichung so zu schreiben, dass sie keine korrelierten Größen mehr enthält. Dies erreicht man dadurch, dass man für die verschiedenen Kom-

ponenten eine gemeinsame mittlere Abweichung ΔT von 20 °C annimmt und dann noch einen mittleren Temperaturunterschied δT zwischen den Komponenten. Bei einem Messaufbau mit Vergleichsmassstab (Index m) und Prüfling (Index p) ergibt sich

$$L_{p20} = L_{m20} (1 + \alpha_m \Delta T_m) (1 - \alpha_p \Delta T_p).$$

Für den Fall, wo rechnerisch keine Temperaturkorrekturen vorgenommen werden, ergibt sich näherungsweise folgende kombinierte Unsicherheit für die Länge des Prüflings:

$$\delta L^2 = (L \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T)^2 + (L \cdot \alpha \cdot \delta T)^2,$$

wobei $\delta \alpha = \langle \alpha_m - \alpha_p \rangle$ der zu erwartende Unterschied der Ausdehnungskoeffizienten, $\Delta T = (\Delta T_m + \Delta T_p)/2$ die mittlere Temperaturabweichung zu 20 °C, $\alpha = (\alpha_m + \alpha_p)/2$ der mittlere Ausdehnungskoeffizient und $\delta T = \langle T_m - T_p \rangle$ der zu erwartende Temperaturunterschied zwischen Massstab und Prüfling sind.

C: Äussere Einflüsse auf den Messaufbau

Der Aufbau zur Übertragung des Längenmasses auf den Prüfling unterliegt klimatischen und mechanischen Störungen. Diese zu quantifizieren oder allenfalls zu korrigieren ist meist äusserst schwierig, weshalb die Einflüsse durch entsprechende Vorkehrungen zu minimieren sind. Der Messkreis, der während dem Messvorgang als Bezug wirkt, soll für eine optimale mechanische und thermische Stabilität grundsätzlich möglichst kompakt sein und sich auch bei der Bewegung eines Messschlittens nicht verformen können. Bild 2 zeigt das Beispiel einer Messmaschine, wo die Länge eines Prüflings durch Verschiebung eines Messschlittens und Vergleich mit einem Massstab bestimmt wird. Der Messkreis ist einerseits durch die Verbindung des Tasters mit dem Messsensor des Massstabs gegeben, andererseits durch die Verbindung des Prüflings mit dem Massstab.

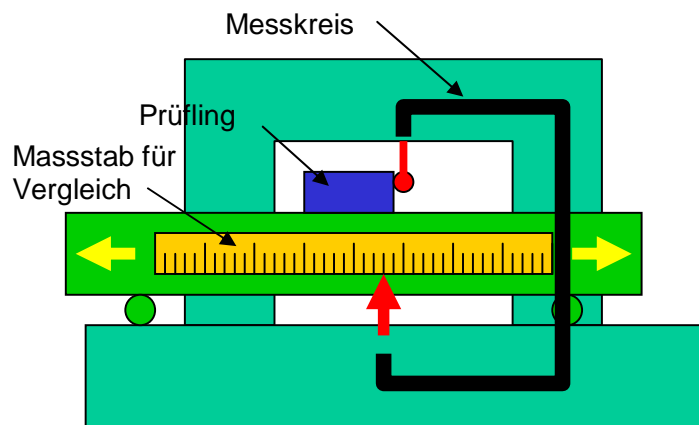


Bild 2: Messkreis einer Messmaschine.

D: Mechanische Einflüsse auf den Prüfling

Wie bei den äusseren Einflüssen auf den Messaufbau lässt sich die mechanische Deformation der Messobjekte oft nur schwer quantifizieren und korrigieren und sollte deshalb durch

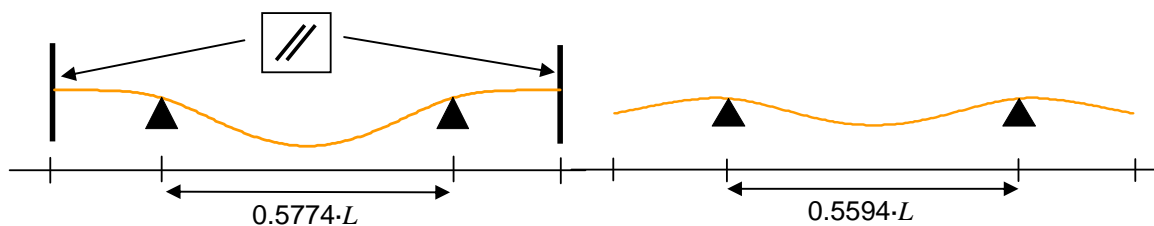


Bild 3: Ein in den Airypunkten abgestütztes Endmass behält parallele Endflächen (links), bei einem in den Besselpunkten abgestützten Massstab bleibt die Länge des Hauptintervalls beinahe gleich lang wie bei einer flachen Auflage.

geeignete Massnahmen vermieden werden. Bei der Auflage von Massverkörperungen deformieren sich diese durch die Gravitationskraft. Bei Parallelendmassen hat dies zur Folge, dass deren Endflächen nicht mehr parallel zueinander liegen, bei Strichmassen ändert sich der horizontale Abstand der Striche, besonders wenn die Striche nicht in der neutralen Faser liegen. Durch Optimierung der Auflagepunkte können solche Effekte minimiert werden (Bild 3). Ein Endmass wird idealerweise in den Airypunkten, ein Massstab in den Besselpunkten aufgelegt.

Ebenso wichtig ist die kinematische Auflage der Prüflinge und die Vermeidung von Deformationen durch Spannkkräfte. So sollten, falls nötig, wenn immer möglich die Messobjekte stets direkt über deren Auflagepunkte gespannt werden.

E: Mechanische Kräfte bei der Antastung

Unter dem Einfluss der Messkraft eines Tasters verformt sich sowohl das Tastelement als auch die angetastete Oberfläche des zu messenden Objektes. Die statische Messkraft muss jedenfalls so klein sein, dass die Deformation nicht plastisch, sondern elastisch und damit reversibel ist. Die einfachste und gut berechenbare Situation ist die Deformation einer Kugel mit Durchmesser D die mit der Messkraft F gegen eine Ebene drückt. Die Abplattung a beträgt gemäss der Hertz'schen Formel

$$a = \frac{1}{2} \left(3F \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right)^{2/3} \left(\frac{1}{D} \right)^{1/3},$$

wobei E_i und ν_i das Elastizitätsmodul und die Poisson'sche Zahl des ebenen Objekts und der Kugel bedeuten. Es ist zu beachten, dass diese Gleichung sowohl für die Abplattung eines sphärischen Tasters beim Kontakt mit einer Ebene als auch für die Deformation einer Kugel zwischen zwei Flachrastern (entspricht dem doppelten Wert $2a$) verwendet werden kann.

Wird die Tasterkonstante vorgängig an einem bekannten Endmass ermittelt (Bild 4), werden mehrere Einflüsse darin enthalten sein: der Tastkugeldurchmesser, die Taststiftbiegung, die Abplattung der Kugel und die Einbuchtung der Endmassfläche. Ist der Prüfling aus dem gleichen Material und mit vergleichbarer Rauheit wie das Endmass, ist die wichtigste Einflussgrösse die Wiederholbarkeit der Tastkraft. Dieser Einfluss ist in der Wiederholbarkeit bei der Bestimmung der Tasterkonstanten enthalten.

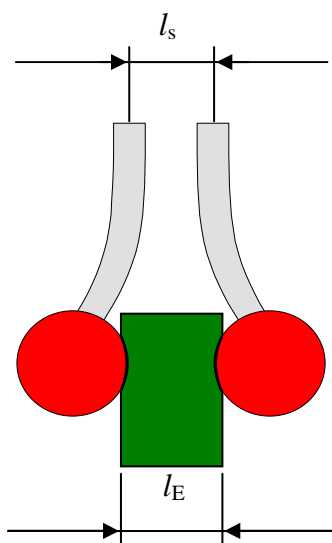


Bild 4: Einflüsse bei der Bestimmung der Tasterkonstanten.

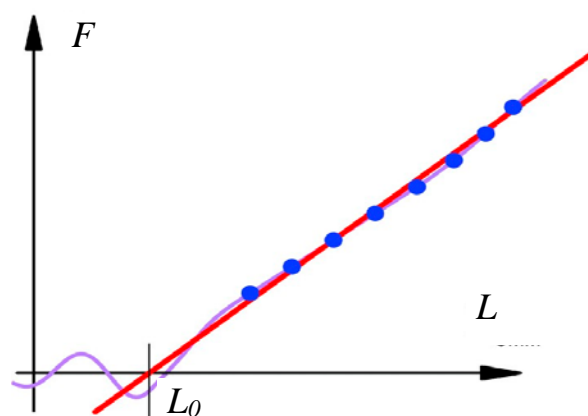


Bild 5: Extrapolation einer Antastkurve auf den messkraftfreien Tastpunkt.

Der Einfluss der Messkraft bei mechanischer Antastung kann eliminiert werden, indem die Antastung für mehrere Messkräfte erfolgt und die sich daraus ergebende Antastkurve auf Null, also messkraftfrei, extrapoliert wird (Bild 5). Dabei ist die Linearität der Antastkurve zu prüfen.

F: Geometrie des Messaufbaus

Eine Bewegungsachse hat grundsätzlich sechs Freiheitsgrade, nämlich drei Verschiebungs- und drei Drehrichtungen. Dementsprechend kann der Führungsfehler einer nominell geradlinigen Bewegung durch sechs Abweichungsfunktionen beschrieben werden: drei Verschiebungsfehler (Positionsabweichung in Längsrichtung, zwei Geradheitsabweichungen quer zur Bewegungsrichtung) und drei Drehbewegungen (Rollen, Nicken und Gieren). In modernen Messmaschinen werden die meisten dieser Fehlerfunktionen numerisch korrigiert. Wo immer möglich soll jedoch bei Längenmessungen der seitliche Versatz der zu messenden Länge und der Bezugslänge möglichst klein gehalten werden (Abbe-Prinzip, Bild 6). Ein Führungsfehler (Kippen bzw. Gieren) des Schlittens führt nach Verschiebung desselben zu einem Versatz in Längsrichtung. Bei einem Longitudinalkomparator (Abbe-Komparator, rechts) hat ein Führungsfehler in erster Näherung keine Fehler zur Folge. Der Abbe-Fehler δL , der in praktisch jedem Messunsicherheitsbudget der Längenmesstechnik zu berücksichtigen ist, berechnet sich aus dem Abbe-Versatz ΔA und dem Winkelfehler $\Delta\alpha$ aus $\delta L = \Delta A / \Delta\alpha$.

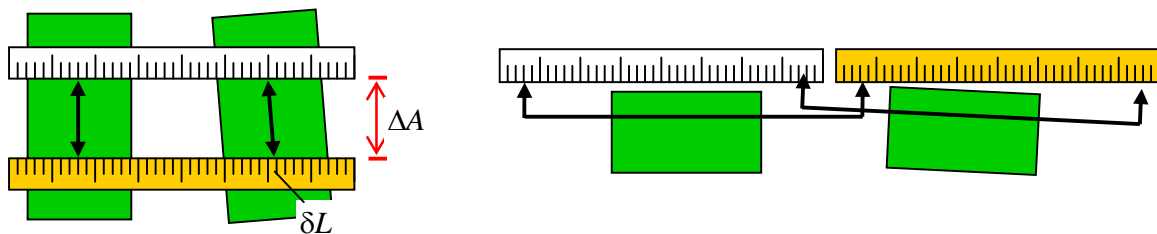


Bild 6: Transversalkomparator mit Abbe-Versatz (links) und Longitudinalkomparator (rechts).

G: Abweichungen des Tasters von der Idealgeometrie

In der Längenmesstechnik verwendet man meist ebene oder sphärische Tastelemente. Bei der Messung zwischen zwei Flachtastern ist die Ebenheits- und die Parallelitätsabweichung der beiden Taster zu prüfen. Je nach dem, ob die Taster vor der Messung auf einem Vergleichsnormal ähnlicher Geometrie wie der Prüfling eingestellt („genullt“) wird, kompensiert sich ein Teil der durch die Geometrieabweichungen erzeugten Messfehler. Sphärische Taster können durch die stetige Abnutzung eine kleine Fläche aufweisen (z.B. bei Endmasskomparatoren oder bei Formmessgeräten). Abweichungen von der Idealgeometrie spielen bei Tastkugeln vor allem dann eine Rolle, wenn die Berührung der Tastkugel an verschiedenen Orten auf deren Oberfläche erfolgt, wie z.B. in der Koordinatenmesstechnik, oder bei der Gewindemessung. Bei letzterer ist die Formabweichung auch bei den dort verwendeten Gewindemessdrähten eine oft nicht zu unterschätzende Fehlerquelle.

H: Abweichungen des Prüflings von der Idealgeometrie

Bei den zu kalibrierenden Masskörperungen wird eine Idealgeometrie vorausgesetzt, seien es parallele, ebene Messflächen bei Endmassen, ein Zylinder bei Lehringen und Lehrdornen, parallele und gerade Teilstriche entlang einer geraden Messlinie bei Massstäben, eine Kugel bei Kalibrierkugeln oder eine wohl definierte Helix bei einer Gewindelehre. In der Praxis ist stets mit Formabweichungen zu rechnen, die oft nur unvollständig erfasst und für ein korrektes Messresultat nur schwierig zu korrigieren sind. Gepaart mit einer Abweichung von der Sollmesslinie ergeben sich oft erhebliche Beiträge zur Messunsicherheit. Auch bei der Kalibrierung von Längenmessinstrumenten ist mit Geometrieabweichungen zu rechnen.

So kann insbesondere bei langhubigen Messtastern das Tastelement schräg zum Gehäuse verlaufen. Dies wirkt sich dann in einem Cosinus-Fehler aus, wie er auch bei einer Schrägstellung des Prüflings zur Messrichtung auftritt (siehe I).

I: Cosinus-Fehler

Als Cosinus-Fehler bezeichnet man den Fehler, den man erhält, wenn die zu messende Länge nicht parallel zum Bezugsmass ist. Die dabei entstehende Abweichung beträgt

$$\delta L = L (1 - \cos\alpha) \approx \frac{1}{2} \alpha^2 L .$$

Bild 7 zeigt zwei verschiedene Situationen, wo entweder der als Bezug verwendete Massstab nicht parallel zur Bewegungsrichtung ist, oder die zu messende Verkörperung nicht parallel zur Messrichtung liegt. Entsprechend wird entweder zu lang oder zu kurz gemessen.

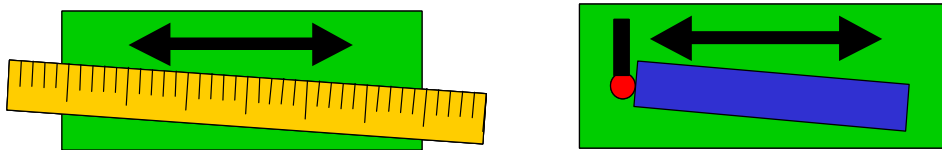


Bild 7: Eine schräge Ausrichtung des Referenzmassstabes (links) oder der zu prüfenden Verkörperung (rechts) führt zu einem Cosinus-Fehler.

J: Kalibrierung des Bezugsmasses

Der Kalibrierwert samt zugehöriger Messunsicherheit des Bezugsmasses kann in der Regel einem Kalibrierzertifikat entnommen werden. Oft vergessen im Messunsicherheitsbudget wird der Beitrag, der einer allfälligen Änderung seit der letzten Kalibrierung entspricht. Die Abschätzung eines Maximalwertes für die Langzeitänderung geschieht aus der Erfahrung und – wo immer möglich – auf Grund der durch die vergangenen Kalibrierungen dokumentierten Geschichte des Bezugsmasses.

K: Kalibrierung des Tasters

Wird das verwendete Tastsystem nicht nur als Nulldetektor, sondern über einen Messbereich verwendet, so ist dessen Empfindlichkeit zu kalibrieren, meist als Kennlinie, um die Linearitätsabweichungen quantifizieren und allenfalls korrigieren zu können.

5 Weitere Beiträge zur Messunsicherheit

5.1 Rauschen, digitale Auflösung

Obwohl das Rauschen und andere zufällige Schwankungen durch eine Vielzahl von Einflussgrößen wie Vibrationen, thermische Schwankungen oder thermisches Rauschen in der Elektronik erzeugt werden kann, soll es der Übersicht halber hier separat erwähnt werden. Dessen Einfluss kann in der Regel durch Wiederholungsmessungen und Mittelung reduziert werden. Selbstverständlich können auch viele der im Abschnitt 4 erwähnten Messunsicherheitsbeiträge aus der Beobachtung mehr oder weniger zufälliger Messgrößen ermittelt werden, dies dann, wenn es mit vernünftigem Aufwand gelingt, die Einflussgrößen zufälligen Änderungen zu unterziehen (Typ A Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM).

Die durch Digital Schritte erzeugten Rundungsfehler werden sinnvollerweise zusammen mit dem Rauschen behandelt. Ist das aus wiederholten Messungen ermittelte Rauschen grösser als die digitale Auflösung des anzeigenden Geräts, ist letztere in der Messunsicherheitsberechnung nicht zu berücksichtigen.

5.2 Übertragungsfunktion

Unter der Übertragungsfunktion einer Messgrösse versteht man den funktionalen Zusammenhang zwischen der vom Gerät gemessenen Eingangsgrösse und der meist elektronisch erfassten Ausgangsgrösse. Bei statischen oder quasistatischen Messvorgängen ist die Übertragungsfunktion bereits in der unter K erwähnten Kennlinie enthalten. Bei dynamischen Vorgängen ist die Übertragungsfunktion – meist ein Frequenzgang – jedoch separat zu ermitteln. Sie kann beschränkt sein durch die mechanische Trägheit des Tasters oder den Frequenzgang der Elektronik.

5.3 Numerische Verfahren

Eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle ist die numerische Verarbeitung der gemessenen Daten bis zum eigentlichen Resultat. Meist handelt es sich dabei jedoch um Fehler, die durch sorgfältige Validierung der Rechenverfahren und der Software vermeidbar sind, und somit nicht um Messunsicherheitsbeiträge, ausser wenn vereinfachende Näherungsverfahren verwendet werden, wie dies z.B. bei der Berechnung der Anlagekorrektur bei Gewinden oft noch der Fall ist. Zudem kann es vorkommen, dass verwendete physikalische Formeln experimentelle Unsicherheiten beinhalten, wie z.B. die Edlén-Formel zur Berechnung des Brechungsindex der Luft (siehe A). Abgeleitete Messgrössen können manchmal auf Grund der messbaren Grössen nur ungenau ermittelt werden, wie z.B. der Durchmesser eines Kreises oder dessen Zentrum basierend auf einer Reihe von Messpunkten, die nur einen kleinen Teil des Umfangs abdecken. Die dabei resultierende Unsicherheit liegt jedoch meist nicht am zur Berechnung verwendeten numerischen Verfahren, sondern an der Unsicherheit der einzelnen Messpunkte, die bei unvollständigem Umfang mit grossen Empfindlichkeitskoeffizienten multipliziert werden. Trotzdem ist gerade bei aufwändigen Berechnungen grosser Punktmengen in der Längenmesstechnik auch der Eindeutigkeit und der Stabilität der Verfahren Beachtung zu schenken.

5.4 Definition der Messgrösse

Selbst die Definition der Messgrösse kann zu Unsicherheiten führen. Definitionen in Normen können manchmal unklar sein oder verschiedene Interpretationsmöglichkeiten offen lassen. Wichtiger noch ist die oftmals nichtideale Umsetzung einer normierten Definition, dadurch dass z.B. die geforderte Punktdichte, die normierte Geometrie des Tastelementes oder andere Regelparameter nicht eingehalten werden. Zudem können verschiedene Definitionen einer Messgrösse bei Idealgeometrie übereinstimmen, auf realen Prüflingen jedoch zu Unterschieden führen (siehe H).

6 Schlussbemerkung

Die vorliegende Abhandlung soll dazu beitragen, den Prozess der Kalibrierung von Längenmessmitteln systematisch und vollständig analysieren und die wesentlichen Beiträge zur Messunsicherheit identifizieren zu können. Was in diesem beschränkten Umfang nicht vermittelt werden kann ist das Expertenwissen, das für die quantitative Abschätzung der Standardunsicherheiten der einzelnen Einflussgrössen notwendig ist. Ebenso konnte gerade bei komplizierten Zusammenhängen nur beschränkt auf das mathematische Modell der Prozessschritte eingegangen werden, und somit sind für die Abschätzung der Empfindlichkeitskoeffizienten oft noch vertiefte Kenntnisse oder weiterführende, allenfalls auch numerische oder experimentelle Untersuchungen notwendig.

7 Literatur

[1] Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, 1995.