

Genauigkeitsüberwachung von großen Koordinatenmessgeräten mittels demontierbarem Kugelstab und Auswerteprogramm GUK[®]-KS

Dr.-Ing. Hans-Henning Plath

1 Einleitung

3D-Koordinatenmessgeräte werden als universelle Prüfmittel für die unterschiedlichsten Maß-, Form- und Lageprüfungen eingesetzt. Dabei muss sich der Anwender darauf verlassen können, dass sein Koordinatenmessgerät unabhängig von der Lage des Messobjekts auf dem Messgerät jederzeit ausreichend genau misst. Das heißt, dass das Messgerät unter den real vorliegenden Umgebungsbedingungen eine vom Anwender auf Basis seiner Genauigkeitsanforderungen festgelegte, maximal zulässige Messabweichung nicht überschreiten darf - und zwar nicht nur parallel zu den Geräteachsen, sondern auch in beliebigen Raumrichtungen. Zum regelmäßigen Nachweis darüber, dass ein Koordinatenmessgerät die zulässige Messunsicherheit einhält bieten sich Überwachungsmessungen an kalibrierten Prüfkörpern entsprechend der Richtlinie VDI/VDE 2617 an. Dabei sollte beachtet werden, dass die verwendeten Prüfkörper in ihren Abmessungen zum Messvolumen des überwachten Koordinatenmessgerätes passen. So wird für eindimensionale Prüfkörper eine Messlänge bis zu 4/5 der Länge der Raumdiagonale des Messvolumens empfohlen. Deshalb wurden für große Koordinatenmessgeräte (Geräte mit mindestens einer Messachse >2 m) als Prüfkörper entsprechend große demontierbare Kugelstäbe entwickelt. Derartige Kugelstäbe mit ca. 5 m Länge haben sich zwischenzeitlich bei der Genauigkeitsüberwachung von großen Koordinatenmessgeräten bewährt - also an Geräten, die bisher zumeist nur durch achsparallele Prüfung von Einzelabweichungskomponenten behelfsmäßig geprüft wurden.

2 Rollbewegungen können große Messabweichungen verursachen

Beim Betrieb von großen Koordinatenmessgeräten ist es zumeist unvermeidlich, dass während der Messungen in einzelnen Achsen der Abstand des Tastelements von der Achsführung sehr groß ist im Verhältnis zur Breite der Achsführung. Dadurch wirken sich bereits kleinste Rollbewegungen um einzelne Linearachsen, die beim Verfahren des Koordinatenmessgeräts entlang der Linearachsen entstehen, um ein Vielfaches verstärkt auf die Position des Tastelements und damit auf die Genauigkeit des Koordinatenmessgeräts aus. Dieser Effekt tritt insbesondere bei Koordinatenmessgeräten in Ständerbauweise auf, ist aber auch bei Koordinatenmessgeräten in Portalbauweise nicht zu vermeiden, wenn mit langen, seitlich auskragenden Tastern gemessen wird.

Zusätzlich hängt die Größe der durch Rollbewegungen verursachten Messabweichungen stark vom Zustand der Linearführungen ab. Daher ist es nicht verwunderlich, dass bei vielen älteren Koordinatenmessgeräten in Ständerbauweise festzustellen ist, dass der größte Anteil der Messabweichungen durch Rollbewegungen verursacht wird. Das ist um so bedauerlicher, da bei konventionellen Koordinatenmessgeräten (ohne rechnerische Korrektur der lokalen Abweichungen) eine Korrektur der Rollbewegungen zumeist nur durch sehr aufwendige mechanische Nachbearbeitung einzelner Führungen möglich ist.

Die durch Rollbewegungen verursachten Abweichungen wirken sich nur auf Messaufgaben aus, die das Verfahren in mehreren Messachsen erfordern - also nur bei nicht-achsparallelen Messaufgaben. Daher werden die durch Rollbewegungen verursachten Anteile von Längen- bzw. Abstands-Messabweichungen bei einer nur achsparallel durchgeführten

Überwachungsmessung (z.B. Längen- / Positionsmessung mittels eines Laserinterferometers) nicht erfasst!

3 Optimale Justage und realitätsnahe Genauigkeitsabschätzung erfordern Kenntnisse über das lokale Zusammenwirken von allen 21 Abweichungskomponenten des KMG

Aus Kostengründen wird in der Praxis versucht, durch eine relativ einfach auszuführende mechanische Justage der Achsen zueinander oder durch eine entsprechende rechnerische Korrektur das Koordinatenmessgerät so genau wie möglich einzurichten. Leider kann aber die Winkelabweichung zwischen den einzelnen Achsen eines großen Koordinatenmessgerätes nur als lokale Größe betrachtet werden, da sie zum einen aufgrund der lokal unterschiedlichen Geradheitsabweichungen der Messachsen von den Abmessungen des zur Überprüfung verwendeten Winkelnormales abhängt und andererseits durch die rotatorischen Abweichungen der Linearachsen lokal unterschiedlich stark beeinflusst wird. Daher kann die Justage eines Koordinatenmessgerätes ausschließlich anhand von lokal gemessenen Winkelabweichungen insgesamt nicht optimal erfolgen - im Gegenteil, gelegentlich werden Koordinatenmessgeräte durch Winkelkorrekturen, die nur auf lokaler Information beruhen, für andere Teilbereiche so verstellt, dass sich die für das Gesamtgerät zutreffende Messunsicherheit verschlechtert, und diese Verschlechterung wird bei einer anschließenden wiederum nur lokal oder achsparallel vorgenommenen Überprüfung nicht erkannt!

Unbedingte Voraussetzung für eine optimale Justage ist eine Abschätzung der nach Ausführung von globalen Korrekturmaßnahmen (z.B. Veränderung von Winkeleinstellungen zwischen einzelnen Achsen) verbleibenden Messabweichungen bei der Messung von beliebigen Längen oder Abständen in unterschiedlichen, insbesondere nicht-achsparallelen Ausrichtungen an unterschiedlichen Orten im gesamten Messvolumen des Koordinatenmessgerätes. Eine solche Abschätzung wiederum erfordert eine möglichst umfassende, zumindest aber statistisch ausreichend aussagekräftige Information über die entsprechenden lokalen Messabweichungen vor Ausführung der globalen Korrekturmaßnahmen.

Eine sichere Aussage über die Größe der lokalen Messabweichungen kann durch vollständige Aufnahme der 21 Abweichungskomponenten des Koordinatenmessgerätes im gesamten Messvolumen und anschließende rechnerische Überlagerung ihrer Auswirkungen erzielt werden. Da dieses Verfahren sehr aufwendig ist, wird es nur in wenigen Ausnahmefällen angewendet. In der bisherigen Praxis werden zumeist nur einzelne Abweichungskomponenten erfasst und in den seltensten Fällen vom Prüfer rechnerisch miteinander verknüpft. Erfahrungsgemäß werden die besonders schwierig zu messenden, aus den Rollbewegungen resultierenden Abweichungen vernachlässigt, die ja insbesondere bei großen Koordinatenmessgeräten in Ständerbauweise einen erheblichen Unsicherheitsfaktor darstellen. Daher können Überwachungs- und Justageverfahren, die lediglich auf der Bestimmung von Einzelabweichungen basieren und diese nicht vollständig erfassen und miteinander verrechnen nur als unsichere „Behelfslösung“ dienen.

Eine statistisch zuverlässige Alternative stellen Überwachungsmessungen mittels entsprechend großer Kugelstäbe dar. Die Ausführung und Analyse von mindestens 4 Messungen in raumdiagonaler Ausrichtung ermöglicht eine sichere Aussage über die größten Abweichungen, die bei der Messung von beliebigen Abständen im Messvolumen zu erwartenden sind. Zusätzlich kann die Auswirkung von einzelnen oder in Kombination vorgenommenen globalen Korrekturmaßnahmen am Messgerät auf alle zuvor ausgewerteten Messlängen und Positionen

abgeschätzt werden. Damit steht eine sichere Basis sowohl für globale Korrekturmaßnahmen als auch zur realitätsnahen Beurteilung der Messunsicherheit von großen KMG zur Verfügung.

4 Aufbau eines demontierbaren Kugelstabes

Grundsätzlich bestehen demontierbare Kugelstäbe aus einem messtechnisch nicht relevanten, Grundaufbau und dem eigentlichen Messaufbau.

Der Grundaufbau besteht im wesentlichen aus einem langen Tragkörper sowie aus einem oder aus mehreren unterschiedlich großen Stativen. Der Tragkörper wird wegen der besseren Transportfähigkeit aus mehreren Segmenten zusammengesetzt. Die Stative dienen zur räumlichen Ausrichtung des Grundkörpers und sollten mindestens so groß sein, dass der Messaufbau des Kugelstabs bei größter Elevation den Messbereich des Koordinatenmessgeräts in der Höhe möglichst vollständig abdeckt. An die mechanische Genauigkeit des Grundaufbaus werden keine besonderen Ansprüche gestellt - lediglich muss eine während des Messvorgangs stabile Lage des gesamten Aufbaus gewährleistet sein.

Der Messaufbau besteht aus einer Anzahl von Präzisionskugeln, die auf dem Tragkörper des Grundaufbaus in geradliniger Anordnung in etwa gleichen Abständen befestigt werden. Eine der Kugeln ist starr angebracht, die restlichen Kugeln sind auf Blattfedern so gelagert, dass ihre Position ausschließlich in Längsrichtung des Tragkörpers innerhalb eines kleinen Bereichs nahezu kraftfrei verändert werden kann. Zwischen den Kugeln befinden sich Distanzstäbe, die an den Enden so gestaltet sind, dass sie sich auf den Kugeln selbst zentrieren. Die Länge der einzelnen Distanzstäbe darf geringfügig voneinander abweichen. Vom Stabende her wird die Kugelreihe mit einer definierten Kraft zusammengepresst. Damit wird erreicht, dass sich bei immer gleicher Reihenfolge von Kugeln und Distanzstäben zwischen denselben benachbarten Kugeln der Abstand gut reproduzierbar einstellt.

5 Messprinzip

Beim demontierbaren Kugelstab liegen die zur Maßverkörperung dienenden Kugeln nie exakt auf einer Linie. Vielmehr hängt die tatsächliche lineare Ausrichtung der Kugeln unter anderem von der momentanen Durchbiegung des Tragkörpers ab. Daher können im Gegensatz zu starren Prüfkörpern nur die Abstände benachbarter Kugeln als originäre Kalibrierwerte bestimmt werden.

Als indirekter Kalibrierwert zur Prüfung von größeren Abständen anhand der Messung von weiter entfernt liegenden Kugeln dient die Summe der dazwischenliegenden kalibrierten Einzelabstände benachbarter Kugeln. Dieser indirekte Kalibrierwert entspricht der Länge des Polygonzugs durch die Mittelpunkte der beteiligten Kugeln. Die Länge dieses Polygonzugs ist bei ordnungsgemäß eingestelltem Messaufbau unabhängig von der momentanen linearen Ausrichtung der Kugeln.

Zur Überprüfung von größeren Abständen muss entsprechend der Berechnung des indirekten Kalibrierwerts die gemessene Länge des Polygonzugs durch Summation der gemessenen Einzelabstände zwischen benachbarten Kugeln ermittelt werden. Die Differenz zwischen der gemessenen Länge des Polygonzugs und dem indirekten Kalibrierwert entspricht in sehr guter Näherung der Abweichung für die Messung eines entsprechend langen Abstands in der gleichen räumlichen Ausrichtung und Position, in der sich während der Prüfung der beteiligte Abschnitt des Kugelstabs befand.

6 Kalibration

Die einzelnen Kugelabstände eines demontierbaren Kugelstabs betragen heute üblicherweise 400 mm oder 500 mm. Sie können mit relativ geringem Aufwand auf kleineren Koordinatenmessgeräten durch Maßvergleich mit einem geeigneten Normal kalibriert werden. An die Genauigkeit des zum kalibrieren verwendeten Koordinatenmessgeräts werden keine besonderen Anforderungen gestellt, da die systematischen Messabweichungen des Koordinatenmessgeräts durch die Vergleichsmessung weitgehend kompensiert werden. Das Koordinatenmessgerät muss lediglich eine gute Reproduzierbarkeit aufweisen und die Umgebungsbedingungen sollten den Anforderungen an eine Kalibrierung entsprechen.

Typische Angaben für die Kalibrierunsicherheit liegen bei einer aus mehreren Kugeln und Distanzstäben zusammengesetzten Länge L im Bereich um:

$$u_{95} = 1 \mu\text{m} + 2,5 * 10^{-6} * L \quad \text{bis} \quad u_{95} = 2,5 \mu\text{m} + 2,5 * 10^{-6} * L$$

Bei einer Untersuchung der Langzeitstabilität für einen 5000 mm langen Kugelstab mit sorgfältig eingeläppten Endflächen der Distanzstäbe aus Hartmetall lagen nach mehrfachem Transport und Aufbau durch unterschiedliche Nutzer über einen Zeitraum von ca. 12 Monaten alle Erst- und Re-Kalibrierwerte innerhalb einer Spanne von $2 \mu\text{m} + 2 * 10^{-6} * L$.

Häufig weicht die Temperatur am Einsatzort von der Temperatur bei der Kalibrierung des Kugelstabs erheblich ab. Um dennoch zuverlässige Aussagen über die Genauigkeit des zu prüfenden Koordinatenmessgeräts machen zu können ist die Kenntnis des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für den Messaufbau des Kugelstabs unbedingt erforderlich. Ohne Kenntnis dieses Werts ist keine sichere Trennung der temperaturbedingten Abweichungen von den gerätebedingten Abweichungen möglich.

7 Messablauf

Da bei Messungen an einem Kugelstab ausschließlich Abstandsmessungen von Kugelmittelpunkten ausgeführt werden und die Mittelpunktbestimmung der Kugeln immer nach der gleichen Antaststrategie erfolgt, gehen tastsystembedingte systematische Abweichungen in das Messergebnis nicht mit ein. Daneben können tastsystembedingte zufällige Abweichungen bei der Auswertung von Kugelstabmessungen nicht von anderen zufälligen Abweichungen des Koordinatenmessgeräts getrennt werden und dadurch bei der Ursachenanalyse z.B. zur Annahme eines unzutreffend großen Spiels der Geräteführungen verleiten. Deshalb wird analog zu Überwachungsmessungen mittels einer Kugelplatte auch bei Kugelstabmessungen zu Beginn der Überwachungsmessung die Antastunsicherheit des Tastsystems durch Messungen an einer Referenzkugel bestimmt. Wenn dabei Überschreitungen der vom Anwender vorgegebenen Spezifikationen festgestellt werden, dann sollte vor Beginn der Überwachungsmessungen am Kugelstab das Tastsystem instandgesetzt werden.

Zur eigentlichen Überwachungsmessung wird der Kugelstab in der Regel raumdiagonal aufgebaut. Typische Montagezeiten dazu liegen um 15 Minuten. Dabei ist neben absoluter Sauberkeit der Kugeln und der Distanzstabenden insbesondere darauf zu achten, dass bei Abschluss des Aufbaus die Vorspannung der Kugel-/ Stabreihe den Angaben des Herstellers bzw. den Angaben im Kalibrierschein entspricht.

Im Verlauf der Messung werden nacheinander alle Kugeln des Kugelstabs einmal nach Vorschrift des Herstellers bzw. nach Angabe im Kalibrierschein gemessen. Die Antaststrategie

richtet sich in erster Linie nach der konstruktiven Gestaltung der Enden der Distanzstäbe. Wenn die Möglichkeit besteht, die Kugeln direkt an den in Längsrichtung des Kugelstabs liegenden Polen anzutasten, dann sollte diese Möglichkeit genutzt werden, da diese Methode die sicherste Positionsbestimmung des Kugelmittelpunkts in Hauptmessrichtung bietet.

Wird der o.a. Messablauf mehrfach ausgeführt, so kann aus den Ergebnissen auf die lokale Reproduzierbarkeit des Koordinatenmessgeräts geschlossen werden. Außerdem wird erkennbar, ob es sich bei lokalen Auffälligkeiten um Ausreißer oder um systematische Abweichungen handelt. Viele Anwender messen daher den Kugelstab in jeder Ausrichtung 3-mal durch. Auf jeden Fall sollte bei nur einmaliger Messung des Kugelstabs unmittelbar im Anschluss an den Messablauf nochmals die erste Kugel gemessen werden, um eine eventuell erfolgte Lage-änderung des Kugelstabs während des Messablaufs detektieren zu können.

Für eine aussagekräftige Überwachungsmessung des Koordinatenmessgeräts wird der Kugelstab mindestens in den 4 raumdiagonalen Ausrichtungen gemessen.

8 Auswertung

Die Auswertung der Messungen kann z.B. auf einem PC-AT unter MS-Windows mit Hilfe des herstellerunabhängigen Auswerteprogramms GUK[®]-KS (Genauigkeits-Ueberwachung von KMG mittels Kugel-Stab) erfolgen. Dieses Programm wurde aus einem von der PTB geprüften Auswerteprogramm für Kugelplattenmessungen entwickelt und beinhaltet neben der:

- Stamm- und Messdaten-Verwaltung von bis zu je 100 Messungen an bis zu 100 unterschiedlichen Messgeräten mit bis zu 10 unterschiedlichen Kugelstäben,
- Messdatenübernahme wahlweise per Diskette oder seriell online,
- Adaptionkonzept für die Übernahme von nahezu beliebigen KMG-Messdateien

eine norm- und richtlinienkonforme Auswertung der:

- Tastsystemprüfung an einem Leerring
- Tastsystemprüfung an einem Kugelnorm
- Auswertung der Abstandsmessabweichungen für alle Kombinationen der gemessenen Kugelmittelpunkte
- Auswertung der Positionsabweichung für alle gemessenen Kugelmittelpunkte bezogen auf die Position der zuerst gemessenen Kugel

mit mehreren Varianten der Temperaturkompensationen zur Darstellung der:

- Auswirkung des Ist-Zustands unter den vorliegenden Temperaturbedingungen auf Abstandsmessungen an einem Werkstück mit vorwählbarem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Anwender- / Regressprüfung)
- Messabweichungen, die das Koordinatenmessgerät bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C aufweist (Kalibrierung / EN ISO 9000 ff.)

Aus den Ergebnissen der 4 raumdiagonalen Messungen kann der geübte Anwender globale Abweichungen des Koordinatenmessgeräts detektieren. Auch wenn dabei nicht immer eine eindeutige Zuordnung zu Einzelabweichungen möglich ist, so kann man dennoch analysieren, wie sich welche einfachen globalen Korrekturmaßnahmen (z.B. Änderung von einer oder von mehreren Winkelstellungen der Führungssachsen zueinander) auf lokale Messabweichungen des Koordinatenmessgeräts auswirken.

Ein in Verbindung mit dem Auswerteprogramm GUK[®]-KS lauffähiges Expertensystem zur Berechnung von möglichst einfachen globalen Korrekturwerten und zur Abschätzung der nach Ausführung von ausgewählten Korrekturmaßnahmen verbleibenden Messabweichungen wird derzeit entwickelt.

Die nachfolgende Umsetzung der als optimal erkannten Korrekturwerte erfordert ein relatives Nachjustieren um einen angegebenen Wert - im Gegensatz zur bisher zumeist üblichen mechanischen Ausrichtung auf einen Idealwert (z.B. Winkel anhand eines Winkelnormales auf exakt 90°), der insbesondere bei Vorliegen von rollwinkelbedingten Abweichungen nur selten zu einem angenähert optimalen Ergebnis führt.

9 Resümee

Mit dem demontierbaren Kugelstab steht dem Anwender insbesondere in Verbindung mit dem herstellerunabhängigen Auswerteprogramm GUK[®]-KS ein breites Instrumentarium zur aussagekräftigen Analyse der Genauigkeit von großen Koordinatenmessgeräten zur Verfügung.

Die bisherigen Erfahrungen von Anwendern und Dienstleistern haben gezeigt, dass die Ergebnisse der Überwachungsmessungen mittels Kugelstab im Raum häufig, insbesondere bei großen Koordinatenmessgeräten in Ständerbauweise, erheblich größere Messabweichungen aufdecken, als sie vom Anwender aufgrund vorangegangener Messungen einzelner Abweichungs-komponenten erwartet wurden.

Pflichtbewusste Anwender von großen Koordinatenmessgeräten entscheiden sich zunehmend für die Genauigkeitsüberwachung ihrer Messgeräte mittels entsprechend langer Kugelstäbe - sei es in Form der Eigenüberwachung oder durch Beauftragung von externen Dienstleistern. Sie sehen in der Ermittlung von realitätsnahen Messunsicherheiten einen wichtigen Beitrag, um in Zukunft kostenintensive Regressansprüche oder Fehlbeurteilungen von Werkstücken aufgrund von unerwartet ungenauen Messergebnissen zu vermeiden.