

Der folgende Artikel wurde im Original in der Juni-Ausgabe des Manufacturing Engineering Magazins veröffentlicht.
Übersetzung und Nachdruck sind vom Herausgeber/Verleger genehmigt.

Erhalt der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen mittels fortschrittlicher Kalibrierung und Optimierung

Von Ed Sinkora, 3.6.2019 beitragender Herausgeber



Calibration devices, such as this Renishaw XM-60 multi-axis calibrator, have become more powerful, yet easier to use.
(Provided by Renishaw)

Wissen und die Techniken zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen verbessern sich fortlaufend, einschließlich fortschrittlicher Methoden zur Kompensation vieler Fehler - letztere sind inzwischen nahezu in Echtzeit möglich.

Kalibrierung ist einfach notwendig und alles andere als schwer zu verstehen oder gar geheimnisvoll. Wie **Michael Wilm, Geschäftsführer für Kalibrierprodukte, Renishaw Inc. in West Dundee, Illinois**, es ausdrückte: "Wenn Sie Benzin für Ihr Auto tanken, ist es für Sie selbstverständlich, dass die Zapfsäule kalibriert ist. Aus

demselben Grund kalibrieren wir Werkzeugmaschinen. Wenn Sie eine Werkzeugmaschine nicht kalibrieren, wissen Sie nicht, ob sie bei der Fertigung Ihres Produkts ausreichend genau arbeitet."

Ebenso wichtig ist, dass man während der Kalibrierung einer Maschine mehr über deren Leistungsfähigkeit erfährt. Bediener sind mit diesen Informationen in der Lage, Aufträge mit vorgegebenen Toleranzen denjenigen Maschinen zuzuordnen, die diese Grenzen halten können, was die Wahrscheinlichkeit, Ausschuss zu produzieren, reduziert. „Umgekehrt“, so **Andreas Hübner, Servicekoordinator des Maschinenbauers SW North America Inc. New Hudson, Mich.**, „wenn Ihre Maschine nicht richtig kalibriert ist und Sie Teile außerhalb der Toleranz produzieren, müssen Sie die Maschine aus der Produktion nehmen. Dann bedarf es umfangreicher Kontrollen, um Ihre WZM wieder auf den Stand der Technik zu bringen. Dies ist letztendlich ein kostspieliger Prozess wegen des zusätzlichen Arbeitsaufwands und des ungeplanten Ressourcenverbrauchs."

Selbst wenn die Notwendigkeit einer Kalibrierung nicht in Frage gestellt wird, gibt es vieles zu wissen: wann und wie sie durchgeführt werden sollte - und von wem. Besonders interessant sind Techniken zur umfangreichen Fehlerkompensation, die die Teilequalität deutlich verbessern können.

Wann soll kalibriert werden

Es besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass Maschinen bei der Erstinstallation kalibriert werden sollten, unabhängig davon, wie gut sie vom Werk justiert wurden. Schon auf dem Transport kann es Probleme geben, die zu unvorhergesehenen Abweichungen führen. Die Erstkalibrierung vor Ort gibt das Bezugssystem für die künftige Fähigkeit der Maschine. Und auch danach sollte regelmäßig gemessen und justiert werden. Die Häufigkeit dieser zukünftigen Tests und bis zu einem gewissen

Grad Umfang und Art der damit verbundenen Messungen hängen von den darauf hergestellten Teilen und den einzuhaltenden Toleranzen ab.

Steffen Hailer, Leiter des Produktmanagements und der Anwendungstechnik beim Kalibriersoftwareanbieter AfM Technology GmbH, Aalen, Deutschland, sagte, dass abhängig von den Toleranzen und der Steifigkeit Ihrer Maschine die Rotationsfehler (Nicken, Gieren und Rollen) alle ein bis zwei Jahre kalibriert werden sollten. Dies hängt z.B. auch von der Härte des zu bearbeitenden Materials ab. "Die Encoder sollten vor jedem kritischen Teil neu kalibriert werden und selbstverständlich auch, wenn die Maschine eine Abnahmeprüfung mittels eines Prüfkörpers nicht besteht", sagte Hailer. "Aber auch wenn in den CMM-Berichten keine Abweichungen festgestellt werden, wird empfohlen eine Kalibrierung alle sechs Monate während der routinemäßigen Wartungen durchzuführen."



Okuma's Five-Axis Auto Tuning System uses a touch probe and a datum sphere to measure and auto-compensate for 11 types of geometric errors in about 10 minutes, or a fuller set of adjustments in 30 minutes. (Provided by Okuma)

Ein regelmäßiger Zeitplan bietet einen weiteren wichtigen Vorteil bei der Kalibrierung: die vorbeugende Wartung. **Charlie Cagle, Außendienstleiter der Okuma America Corp. in Charlotte, N.C.,** fasste dies gut zusammen, als er sagte: "Von Kunden, die jährliche Kalibrierungen durchführen, hören wir in der Regel nie etwas, denn was sie damit tun, ist vorausschauende Qualitätssicherung. Wenn sie sehen, dass ein Problem an einer Achse auftaucht, beheben sie das Problem, wenn es noch klein ist. Wenn man hingegen ein kleineres Problem anfangs ignoriert und zu einem riesigen brennenden Feuer werden lässt, befindet man sich plötzlich

im Druck trotz drohender Lieferfristen die Maschine abschalten zu müssen. Alles wegen eines Problems, das wahrscheinlich leicht behoben gewesen wäre, hätte man es vor sechs Monaten bei der Kalibrierung gesehen. Bei der vorbeugenden Wartung geht es darum, Ausfallzeiten zu planen und nicht zufällig entstehen zu lassen."

So sollte eine Maschine auch nach einer Kollision oder nach dem Austausch von Schlüsselkomponenten wie Kugelgewindtrieb oder Führungen neu kalibriert werden. Es gibt weitere, seltener beachtete Umweltfaktoren, die die Notwendigkeit einer Neukalibrierung auslösen können. Beispielsweise können beispielsweise häufige Erdbeben in einigen Regionen des Landes problematisch sein. "In Küstennähe können sogar Gezeitenschwankungen den Untergrund verändern was dazu führt, dass sich Maschinen biegen und verdrehen", sagt Wilm (Renishaw). "Deshalb ist es sehr wichtig, im Frühjahr und im Herbst zu messen, um zu sehen, ob es Veränderungen gibt, besonders bei Großmaschinen für die Luft- und Raumfahrt, bei denen man 30 Meter oder mehr Achsweg hat."

Maschinen mit Dreipunktbasis sind weniger anfällig für solche Einflüsse, sind aber nicht üblich. Selbst bei konstanter Temperatur kann sich die Maschinengeometrie ändern, wenn sich der Standort der Wärmequelle saisonal ändert.

Aber "im Wesentlichen geht es um den Prozess", sagte Wilm. "Sie sollten eine Maschine in Intervallen kalibrieren, die Ihnen Hinweise darauf geben, wann sich etwas ändern wird und diese sind für jede Anwendung und möglicherweise sogar für jedes Teil unterschiedlich." Mit anderen Worten, Sie wissen nicht, wie oft Sie kalibrieren sollten, bis Sie mehr über Ihren Prozess wissen.

Wer sollte Maschinen kalibrieren?

Nur geschultes Personal sollte Werkzeugmaschinen kalibrieren, obwohl einige der smartesten Kalibriersysteme einfach zu bedienen sind – wenngleich sie in einigen Fällen kostspielig sein können. Okuma empfiehlt, die Kalibrierung seiner Maschinen entweder durch einen Okuma-Händler oder durch von ihm geschultes Fachpersonal durchführen zu lassen. Alle Okuma-Vertriebspartner bieten Full-Service, einschließlich Kalibrierung. Hübner sagte, dass SW das Gleiche empfiehlt. Sein Unternehmen deckt die Kalibrierung im Rahmen von Wartungsschulungen in seiner SW Academy ab.

S. Hailer (AfM) sagte, dass ein Betrieb in dringenden Fällen flexibler und schneller reagieren kann, wenn die Bediener ihre eigenen Maschinen kalibrieren können, was uns zu Wilms Punkt über "Prozesse" zurückführt.

"Die Personen, die mit der Maschine arbeiten, sollten ihre eigenen Prozesse kontrollieren und sicherstellen können, dass Sie von Anfang bis Ende ein gutes Produkt herausbringen", sagte er. Jedoch, wenn Sie einer externen Quelle vertrauen können, um Ihre Maschinen zu kalibrieren, dann sei es so.

Wilm warnte weiter, dass viele Menschen nicht verstehen, dass sich die Kalibrierung selbst auf die geplanten Prozesse, die mit der Maschine durchgeführt werden, konzentrieren muss. "Wenn Sie also zum Beispiel Aluminiumteile herstellen, muss Ihnen diese Tatsache bewusst sein. Obwohl der Antriebsmechanismus oder die Positionierungsvorrichtungen in der Maschine aus Stahl gefertigt sein können, müssen Sie Ihre Kalibrierungsmaßnahmen an den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium anpassen." Selbst der OEM-Techniker wird falsch liegen, wenn er nicht sicherstellt, dass er Ihren Prozess berücksichtigt.

Auch die Kosten sind zu überlegen, sagte **Jeff Seliga, Marketing Manager bei Renishaw Inc.** "Ein Kreisformtester von ca. 10.000 Dollar ist für die meisten Lohnfertiger durchaus erschwinglich, im Gegensatz zu einem Lasersystem, das ein Vielfaches kostet - in diesem Fall beauftragen Sie eher einen externen Dienstleister. Andererseits kann ein Luftfahrtzulieferer sehr enge Toleranzen einhalten müssen und benötigt als Teil seines gesamten Geschäftsmodells eine hochwertige Kalibrierungsvorrichtung vor Ort zur sofortigen Rückverfolgbarkeit".

Der Kreisformtest liefert viele Informationen

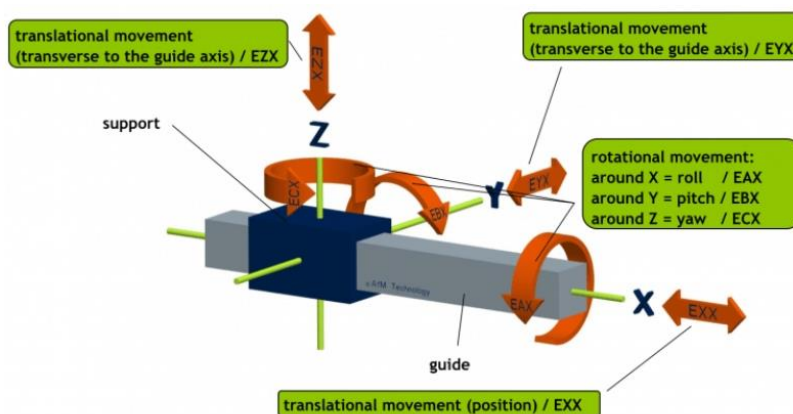
Das vielleicht beliebteste und ein effektives Kalibriergerät, das heute erhältlich ist, ist der Ball Bar, oder Kreisformtest. Relativ preiswert und einfach zu bedienen, liefert dieses System wertvolle Informationen. Befestigen Sie einfach eine Magnethalterung an der Maschinenspindel und eine weitere am Tisch und legen Sie den teleskopierbaren, mit einem hochpräzisen Längenmesssystem ausgestatteten Stab zwischen die beiden Präzisionskugelhalterungen. Die CNC Software steuert die Maschine über einen kreisförmigen Weg und der Sensor in der Stange misst jede Abweichung vom idealen Radius. Die Software interpretiert diese Abweichungen, um eine Reihe verschiedener Fehlerquellen zu identifizieren: Rechtwinkligkeit, Geradheit, lineare Positionierung, Flanken- und Umkehrspiel.

Ein System wie der Renishaw QC20-W stellt diese Informationen grafisch dar und quantifiziert Fehler pro Achse, womit sowohl geometrische als auch dynamische Fehler aufzeigt werden. Ein geometrischer Fehler beeinflusst die Geometrie eines Teils, unabhängig davon, ob sich die Maschine bewegt oder nicht. Ein dynamischer Fehler tritt nur bei Bewegung der Maschine auf, wie z.B. bei einem Umkehrspiel, das durch die resultierende Verzögerung beim Reversieren der Achsbewegung verursacht wird, erklärte Wilm. Er fügte hinzu, dass ein solcher Fehler beim Schneiden von Nuten oder Radien typischerweise zu unerwünschten Abflachungen am Bauteil führen würde.

"Man kann die Länge des Messstabs ändern, um zu genauer zu finden, wonach man sucht", sagte er. "Wenn eine wichtige Aufgabe der Maschine darin besteht, Nuten zu fräsen, verwendet man eine sehr kleine Kugelstange und damit einen sehr schnellen Test. Wenn Sie nach Geometriefehlern suchen, sollten Sie eine Verlängerung einsetzen oder einen sehr langsamen Test verwenden. Das erlaubt es dem Kreisformtest, die Geometrie in Vergrößerung darzustellen."

Andererseits nimmt ein Kreisformtest Kombinationen von Fehlern auf und zeigt nicht unbedingt genau an, welcher Fehler im Einzelnen vorliegt. Wie Cagle (Okuma) erklärte: "Wenn Ihr Test einen Rundheitsfehler findet und sagt, dass 80 Prozent des Problems ein Umkehrspiel in der X-Achse ist, müssen Sie noch zusätzliche Detektivarbeit leisten, um festzustellen, was in der X-Achse das Umkehrspiel verursacht. Der Test gibt nicht an, dass Ihre Kugelgewindespindel schlecht ist." Cagle vergleicht den Kreisformtest mit einem Luftbild aus großer Höhe. „Man sieht aus dem Vergleich zum früheren Bild, dass etwas mit der Maschine anders ist und weiß, dass der Patient zum Arzt gehen muss um sich untersuchen zu lassen. Wenn man dies regelmäßig macht, beginnt man Muster zu erkennen, und kann Entscheidungen über vorausschauende Instandhaltung treffen, anstelle sich auf

reaktive Instandhaltung einzulassen."



Der Kreisformtest erkennt auch etliche Fehler gar nicht - wie z.B. das Rollen um die Bewegungsachse. Und es gibt vieles mehr, was falsch sein könnte, wenn man bedenkt, dass jede Achse sechs Freiheitsgrade (6DOF) hat.

Wie **Wolfram Meyer, Spezialist für Werkzeugmaschinen- und KMG-Kalibrierung bei der SIOS Messtechnik GmbH, Ilmenau, Deutschland**, erklärte, sind die 6

Three translational and three rotational movements comprise the six degrees of freedom of a single linear axis (in this case X). A typical five-axis machine has 43 possible deviations, not counting the spindle. (Provided by SIOS Messtechnik)

Freiheitsgrade (DOF) für eine Linearachse: Positionsabweichung in Längsrichtung, Versatz in den beiden dazu senkrechten Richtungen, sowie Nicken, Gieren und Rollen. Für jede Drehachse existieren ebenfalls 6 DOF. Die tatsächliche Abweichung von der jeweiligen Sollposition ist ein Datensatz, der als Komponentenabweichung bezeichnet werden.

Darüber hinaus erklärte Meyer, dass man auch die Lageabweichungen für jede Achse berücksichtigen muss, drei für jede Linearachse und fünf für jede Drehachse. Eine Linearachse ist im Idealfall im Verhältnis zu zwei anderen Linearachsen perfekt rechtwinklig angeordnet (z.B. ein 90°-Winkel zwischen X und Y und X und Z) angeordnet sein soll. Die realen Abweichungen zwischen der Ist-Achse

und der Idealachse werden als Rechtwinkligkeitsfehler bezeichnet. Drehachsen sind schwieriger zu erklären, haben aber jeweils fünf solcher Abweichungen. Rechnet man es bei einer 5-achsigen Maschine mit drei Linearachsen und zwei Drehachsen zusammen, ergeben sich 43 mögliche Abweichungen ($3 \times 6 + 3$ Rechtwinkligkeiten und $2 \times 6 + 2 \times 5$ für die Drehachsen).

Meyer erklärte auch, dass 80 Prozent des Fehlers in einer Drehachse in der Regel auf Lageabweichungen und 20 Prozent auf Komponentenabweichungen zurückzuführen sind, während es bei Linearachsen umgekehrt ist.

Die Identifizierung und Messung einiger dieser Abweichungen erfolgt am besten mit einem Laserinterferometer. Einige Lasersysteme, wie der SIOS SP15000 C5 und der Renishaw XM-60, können alle 6 DOF gleichzeitig erfassen, während sie eine Achse vermessen (Genau genommen misst der SIOS C5 5 Freiheitsgrade mit dem Laser und gleichzeitig das Rollen, den 6. Freiheitsgrad, mit einer elektronischen Wasserwaage).

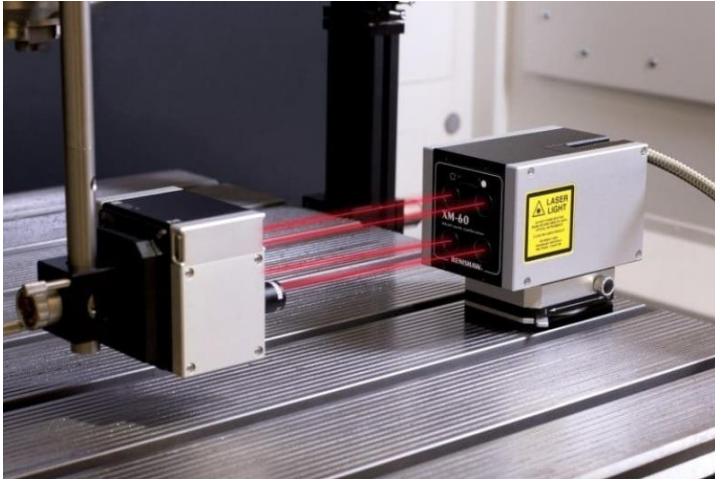
Weil sie auf internationale Normsysteme rückführbar sind, liefern interferometrischer Systeme die präzisesten Ergebnisse erklärte Wilms. Man misst mit der Wellenlänge des Lichts, also dem Bezugsmaß, auf der alle Längenmessungen beruhen. Lasersysteme berücksichtigen sogar den Einfluss von Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit auf das Licht. Zum Beispiel sagte Wilm, dass eine Änderung von 1°C allein einen Fehler von 1 ppm in einer Messung verursachen könnte, wenn man die Temperatur der Luft nicht berücksichtigt. Alle Umgebungsfaktoren zusammengenommen können sich zu einem Fehler von 20-50 ppm in einer Messung summieren, wenn sie nicht kompensiert werden.

Im Vergleich zum Einfluss der Werkstücktemperatur sind diese jedoch unbedeutend. "Wenn ich einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 10 ppm annehme, hätte ich die Unsicherheit von einem Mikrometer pro Meter bereits bei einer Temperaturschwankung von $0,1^\circ \text{C}$ und würde einen Fehler von einem ppm verursachen."

Wenn beispielsweise die Abweichung der Temperatur bei der Bearbeitung von Aluminium (Ausdehnungskoeffizient 24 ppm) nur 1°C beträgt, so beläuft sich der Fehler auf $24 \mu\text{m/m}$, was bei einigen Anwendungen bereits kritisch werden kann. Meyer sagte, dass die permanente Temperaturmessung neben der Bereitstellung wichtiger Informationen zur Kompensation der Sollposition auch "viele Informationen über die Maschinenstruktur, ihr thermisches Verhalten und die Qualität des Kalibrierprozesses liefert. Um alle diese Informationen zu sammeln, sind drahtlose Sensoren wie das LCS-System von SIOS hilfreich."

Weitere Kalibriertechnologien arbeiten mit 3D-Probekörpern (heute Standard bei hochpräzisen Werkzeugmaschinen), Spindelanalysatoren (Spindeln werden typischerweise mit extrem engen Toleranzen hergestellt und dann als gut angenommen) und Drehachskalibratoren. Es gibt einige Kontroversen über letztere. Viele Anwender nehmen an, dass einen Maßstab an einer Drehachse nicht kalibriert werden muss. Aber Wilm sagte, dass diese Annahme falsch ist, da die meisten Systeme nur einen einzigen Lesekopf haben und "wenn es eine exzentrische Bewegung der Welle gibt, die den Maßstab oder Lesekopf hält, entsteht durch diese exzentrische Bewegung ein Positionierungsfehler."

Ein Drehachskalibrator verwendet einen Laser, um die aktuelle Drehposition zu bestimmen. Abschließend sei erwähnt, dass die bisher diskutierten Systeme nicht einzeln eingesetzt werden sollten. Kombinieren Sie sie, um ein umfassendes Bild Ihrer Maschine und einen kompletten Korrekturplan zu erhalten.



The Renishaw XM-60 laser interferometer measures all six degrees of freedom simultaneously while moving down the axis.
(Provided by Renishaw)

Software-Kalibrierung

Wenn man feststellt, dass eine Maschine außerhalb der Spezifikation liegt, muss man Sie entweder mechanisch Instandsetzen oder mit einer hohen Anzahl schlechter Teile leben - und die damit verbundenen Risiken akzeptieren. Aber heute können kleinere Fehler automatisch über die CNC-Steuerung kompensiert werden. Es gibt neue Technologien, die sich damit befassen.

Die Schwenkachsenkompensation ist ein einfaches, aber wichtiges Beispiel.

Wie Cagle erklärte, muss bei einer

Multifunktionsdrehmaschine wie der Okuma MULTUS ein Bediener den Drehpunkt des Gelenks kennen, um die Werkzeugspitze präzise zu steuern. Andernfalls ist eine genaue 5-Achsen-Simultanbearbeitung nicht möglich. Das Gleiche gilt für jeden Schwenk- oder Gelenkkopf oder einen Schwenktisch in einem Bearbeitungszentrum. Okuma führt diese Prüfung mit einem Prüfstab und einem Taster durch. Die Software verwendet dann die Ergebnisse, um die Position des Kopfes in X und Y in Bezug auf die Werkzeugspitze automatisch zu korrigieren.

Okuma bietet auch ein fünfsichtiges Auto-Tuning-System an, das einen Meßtaster und eine Referenzkugel verwendet, um 11 Arten von geometrischen Fehlern in etwa 10 Minuten oder einen vollständigeren Satz von Anpassungen in 30 Minuten zu messen und automatisch zu kompensieren. Zum Beispiel, erklärte Cagle, wenn die X- und Y-Achse gerade sind, die Messung aber einen leichten Fehler in Z erkennt, könnte die Steuerung eine gerade Verfahrbewegung in Z dadurch erzeugen, indem sie X ein wenig über den Verlauf der Z-Bewegung nachführt".

In einem weiteren Beispiel, der Mehrseitenbearbeitung mit Werkzeugen, die für jede Oberfläche in verschiedenen Winkeln geneigt sind, verbesserte das System automatisch den maximalen Flächenehler von 25 auf 10 μm . Meyer fügte hinzu, dass Siemens, Heidenhain und Fidia auch Softwareoptionen anbieten, die eine Messkugel zur Korrektur von Abweichungen der Drehachsen verwenden.

Mitsui Seiki USA Inc., Franklin Lakes, N.J., arbeitet nicht nur an der automatischen Fehlerkorrektur. Das Unternehmen schließt den Produktionskreislauf, um ein Werkstück mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern zu fertigen und diese zu verifizieren, während es noch in der Maschine ist. Béat Ries erklärte, dass dieser Prozess durch die Kombination eines ultrapräzisen Laserinterferometers von SIOS, einer Software von AfM und eines rückverfolgbaren NIST-Prüfkörpers, ein von einem akkreditierten Messlabor zertifiziertem Stufenmaßstab mit vielen maßlichen Merkmalen, ermöglicht wird. Nach Abschluss des laserinterferometrischen Messprozesses lädt der Kalibrierungstechniker Kompensationswerte für Neigungsfehler, bidirektionale Fehler und das 3D "Datenvolumen" ohne zusätzliche Zwischenschritte von der AfM-Software direkt in die FANUC-Steuerung hoch. AfM bietet auch Schnittstellen für Siemens, Heidenhain, Fagor und Bosch und weitere CNC Anbieter. Die Steuerung ist dann in der Lage, an einer bereits präzisen Maschine automatisch Verbesserungen vorzunehmen. So ergab die Messung der Y-Achse an einer Mitsui Seiki Vertex 750 Maschine einen maximalen Positionierfehler von 13,4 μm über den gesamten 800-mm-

Verfahrenweg. Das SIOS-Interferometer und die AfM-Software konnten mit einem einzigen Messzyklus diesen Fehler auf 0,54 µm reduzierten, was einer Verbesserung von 96 Prozent entspricht.

Die Kalibrierung aller drei Linearachsen dauerte 77 Minuten und verbesserte die Gesamtgenauigkeit um 95,7 Prozent. Meyer wies darauf hin, dass solche Ergebnisse zeigen, wie gut die SIOS-Interferometer Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftdruck sowie Totwegsfehler kompensieren. "Das Erreichen solch genauer Werte erfordert schnelle Kalibrierungsprozesse deswegen ist die hohe Datenerfassungsrate ein Vorteil des SIOS-Interferometers", sagte er.

Des Weiteren bietet AfM jetzt eine Software an, die es ermöglicht, die lineare und volumetrische Genauigkeit einer Maschine nach internationalen Standards innerhalb von 15 Minuten zu bestätigen und zu zertifizieren, indem ein NIST-rückverfolgbares Prüfkörper auf der kalibrierten Maschine vermessen wird. Ries wies noch darauf hin, dass solange die Messungen eines Prüfkörpers die Genauigkeit der Maschine bestätigen, die Maßhaltigkeit der auf dieser Maschine gefertigten Teile vertrauenswürdig ist. Damit schließt sich der Herstellungs-/Qualitätssicherungskreislauf und zumindest auf einer Mitsui Seiki-Maschine wird die Ultrapräzisionsbearbeitung nahezu automatisiert.