

3D-Messtechnik mit Nanometergenauigkeit

Komplexe Bauteilgeometrien und erhöhte Toleranzen bei Mikrolinsen, Einspritzdüsen, Extrusionsdüsen oder Mikrozahnrädern erfordern immer häufiger dreidimensionale Messungen mit nm-Genauigkeit. Die **NANOMESSMASCHINE** ›NMM-1‹ wurde zu diesem Zweck mit erweiterten 3D-Funktionen sowie 3D-Mikrotastern ausgerüstet.

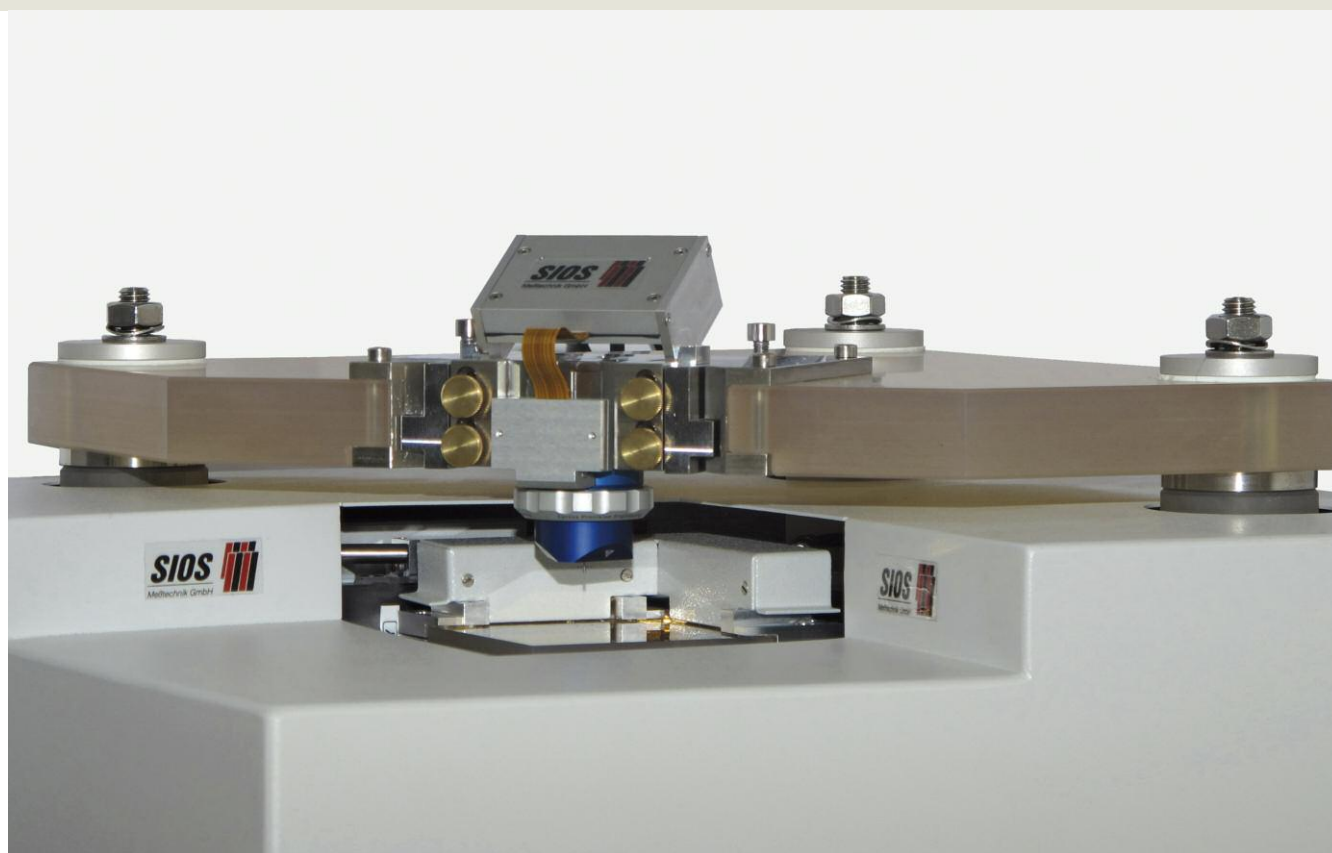


Bild 1. 3D-Mikrotaster ›GannenXP‹ der Firma Express Engineering

ENRICO LANGLOTZ, DENIS DONTSOV UND WALTER SCHOTT

Die Möglichkeit, Messungen mit Nanometergenauigkeit durchzuführen, wird in allen Phasen der Produktentwicklung und Herstellung immer wichtiger, sei es im Prototypenbau, in der Qualitätskontrolle oder in der Prozessanalyse und Endkontrolle von Bauteilen und Baugruppen. Beispiele finden sich bei Mikrozahnrädern, Einspritzdüsen, Presswerkzeugen, Schneidwerkzeugen oder Extrusionswerkzeugen. Die weitere Miniaturisierung dieser Bauteile treibt die Nachfrage nach dreidimensionalen Messungen mit Nanometerpräzision voran. Auch die Form und Maßhaltigkeit von optischen Komponenten und Oberflächen erfordert hochpräzise metrologische Geräte.

Die Nanomessmaschine ›NMM-1‹, die an der TU Ilmenau am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik entwickelt wurde und von Sios Meßtechnik produziert wird, bietet vielfältige Möglichkeiten zur Lösung dieser messtechnischen Herausforderungen [1]. Die NMM-1 besticht hierbei durch eine Auflösung von 0,1 nm in einem Messbereich von $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$

> KONTAKT

HERSTELLER
SIOS Meßtechnik GmbH
98693 Ilmenau
Tel. +49 3677 6447-0
Fax +49 3677 6447-8
www.sios.de

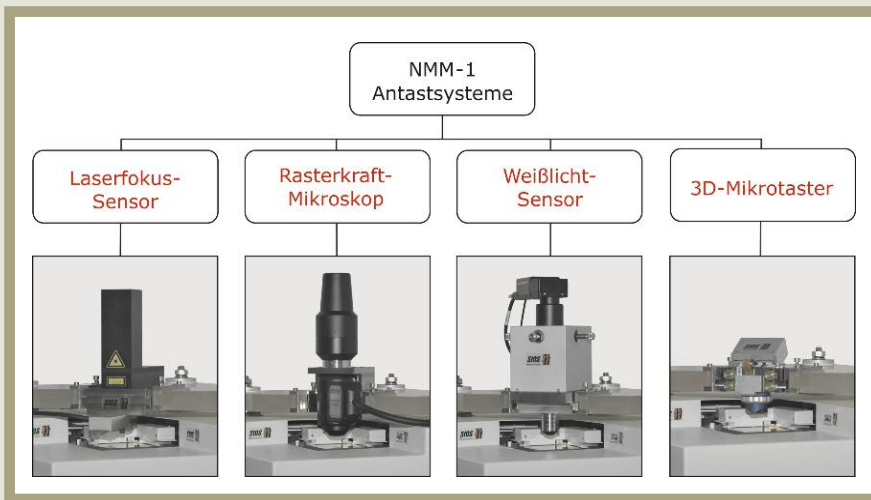


Bild 2. Sensoren für die Nanomessmaschine ›NMM-1‹

und kann mit unterschiedlichsten Antastsensoren ausgerüstet werden [2, 3]. Die metrologischen Eigenschaften der NMM-1 werden weltweit von einigen Staatsinstituten zur Kalibrierung von Transferstandards, beispielsweise Stufenhöhenstandards, ein- und zweidimensionalen Gitterstandards oder Ebenheits- und Rauheitsstandards, genutzt und sind in Ringvergleichen bestätigt worden.

Das Grundprinzip der NMM-1 sah bisher nur die Nutzung eines Z-Antastsensors vor, bei dem jedem XY-Wertepaar ein Z-Antastwert zugeordnet wird. Eine solche Messung wird auch als 2,5D-Oberflächenmessung bezeichnet. Die Antastung vertikaler Flächen ist mit 2,5D-Oberflächenmessungen jedoch nicht möglich. Auch bei stark geneigten Oberflächen, die bei Linsen oder Presswerkzeugen auftreten können, geraten solche Messgeräte an ihre Grenzen. Um alle Anforderungen an die hochpräzise Messung von Mikrokomponenten zu erfüllen, ist eine volle 3D-Fähigkeit notwendig.

Aufbau der ›NMM-1‹ mit Laserinterferometern

Die NMM-1 besteht aus einem XYZ-Führungs- und Antriebssystem, auf dem eine Zerodurspiegelecke befestigt ist. Diese dient als Reflektor für drei faser-

gekoppelte Laserinterferometer. Die Laserinterferometer sind an einem thermisch stabilen metrologischen Rahmen befestigt, der ebenfalls aus Zerodur besteht. Die drei Strahlen der Interferometer schneiden sich in einem Punkt, in dem auch das Antastsystem platziert wird. Das Messobjekt wird auf der Spiegelecke positioniert und mit dieser bewegt. Damit ist das Abbe'sche Komparatorprinzip für alle Achsen und Positionen erfüllt. Es besagt, dass systematische Messabweichungen aufgrund von Führungs- und Justierfehlern vermieden werden, wenn das Messobjekt und das Tastsystem fluchtend hintereinander angeordnet werden. Dies bildet die Präzisionsgrundlage der NMM-1. Zwei Winkelsensoren, die nach dem Autokollimationsprinzip arbeiten, messen zusätzlich die Verkippung der Spiegelecke, die anschließend in einem geschlossenen Regelkreis über die Z-Achsantriebe ausgeglichen wird. Das Antastsystem arbeitet innerhalb der Nanomessmaschine als Nullpunktindikator. Dank der offenen Schnittstellen können hier unterschiedliche Sensoren eingesetzt werden (Bild 2).

Aufgrund verschiedenster Untersuchungen und Erfahrungen der letzten Jahre wurde der mechanische Aufbau angepasst. Hier wären die integrierte Gewichtskraftkompensation sowie das monolithische

productronica B2-161
sps ipc drives 7A-638

Optiken für die Qualitätssicherung

- Telezentrische Objektive
- Zoomsysteme
- Miniaturmikroskope

Solutions in Optics – Reduced to your Needs

www.opto.de

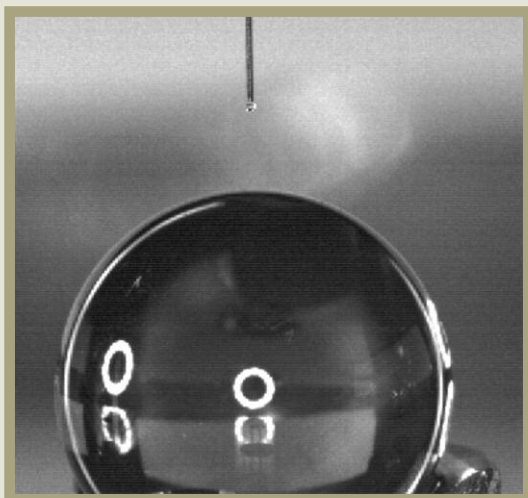


Bild 3. Kalibrierung an einer Referenzkugel

Design der Spiegelecke zu nennen, die einen flexiblen Umgang mit unterschiedlichsten Messobjekten erlauben. Auch die DSP-Einheit wurde grundlegend überarbeitet. Sie basiert jetzt auf einem schnellen 32-bit-Prozessor und wurde mit einer 4-kanaligen Interferometer-Auswerteeinheit ausgerüstet. Dies ermöglicht die Integration eines interferometrischen Antastsensors in die NMM-1.

In die Firmware der DSP-Einheit wurden zudem viele Befehle der I++/DME-Spezifikation, einer nicht-proprietären Schnittstelle zwischen Koordinatenmessmaschine und Software, eingegliedert. Die ersten Ergebnisse hierzu sind bereits von der TU Ilmenau veröffentlicht worden [4]. Diese enthalten zum Beispiel Open-Loop-Scan-Befehle, die die Bewegung der NMM-1 entlang einer festgelegten Trajektorie ermöglichen. Das Tastsystem wird dabei durch Oberflächenabweichungen ausgelenkt. Mit weiteren, ebenfalls integrierten Closed-Loop-Scan-Befehlen lässt sich die Maschine entlang einer geraden Linie im Raum oder entlang einer Kreisbahn mit vorgegebener Richtung bewegen. Die Antastkraft des Tastsystems wird dabei konstant gehalten. Auch Freiform-Scanmessungen sind mit der überarbeiteten Firmware möglich. Hier werden die Antastrichtung und somit auch die Bewegungsrichtung aus den Sensorsignalen des Antastsystems berechnet. Einzelpunktmessungen sowie zusätzliche Befehle, die nicht Bestandteil der I++/DME-Spezifikation sind, erlauben den Einsatz verschiedenster Tastsysteme. Auf diese Weise lassen sich auch Weißlichtsensoren und andere Flächensensoren, die keine Feedbacksignale liefern, integrieren.

3D-Mikrotaster auf Basis einer Siliziummembran

Die Miniaturisierung von 3D-Tastsystemen für Mikro- und Nanomessungen führt zu weiteren Herausforderungen im Vergleich zu herkömmlichen CMM-Anwendungen. Eine davon besteht in der Charakteri-

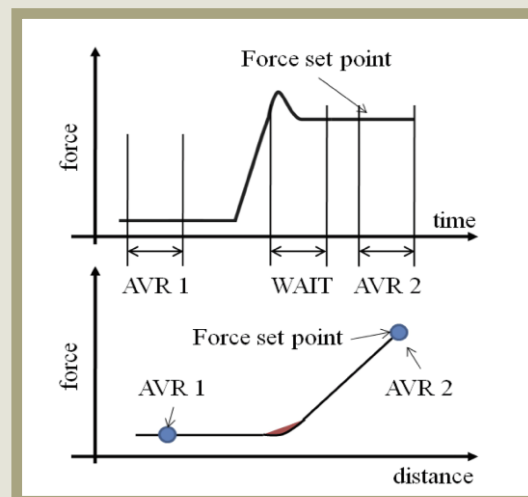


Bild 4. Prinzip der Punktantastung in der NMM-1

sierung und Kalibrierung der Tastkugel. Die dafür notwendigen umfangreichen Messungen, wie die Bestimmung der Antastkraft und die Messung des Kugelradius, wurden bereits untersucht und ausführlich beschrieben [5].

Als Antastsystem wurde der ›GannenXP‹-Mikrotaster der Firma Express Engineering ausgewählt (**Bild 1**). Dieser besteht aus einer Siliziummembran und zwölf piezoresistiven Elementen als Sensorelement. Diese sind in drei Gruppen um den Taststift im 120°-Winkel angeordnet. Jede Gruppe wird zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet, die das Messsignal liefert. Der Taststift mit Tastkugel wird direkt auf die Membran geklebt. Die Steifigkeit im Tastpunkt beträgt 400 N/m, wobei Kugeln mit Durchmessern von 120, 300 oder 500 µm zum Einsatz kommen. Für eine typische Auslenkung von etwa einem Mikrometer ergibt sich so eine Antastkraft von 0,4 mN. Die spezielle Form der Membran stellt eine isotropische Kraftverteilung sicher.

Kalibrierung des Tastsystems

Die Kalibrierung des Tastsystems erfolgt innerhalb der Nanomessmaschine, wobei die Spiegelecke in alle drei Raumrichtungen bewegt wird. Als Kalibrierobjekt wird eine Referenzkugel benutzt. Die Größe der Antastkugel bedingt den Einsatz eines Kamerasystems zur Beobachtung des Antastvorgangs.

Bild 3 zeigt einen Mikrotaster mit 120 µm Tastkugeldurchmesser an einer 5-mm-Kalibrierkugel. Es wurde eine automatisierte Kalibrierstrategie entwickelt, die die Berechnung des Mittelpunkts der Kalibrierkugel, das Kalibrieren des Tasters und das Verifizieren der Kalibrierwerte in allen drei Raumrichtungen umfasst. Üblich sind Kalibrierwege von 2 µm mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 10 µm/s.

Aus den aufgenommenen Kalibrierdaten lässt sich nun eine Koeffizientenmatrix des Tastsystems erstellen, die eine Berechnung der Tasterauslenkung in

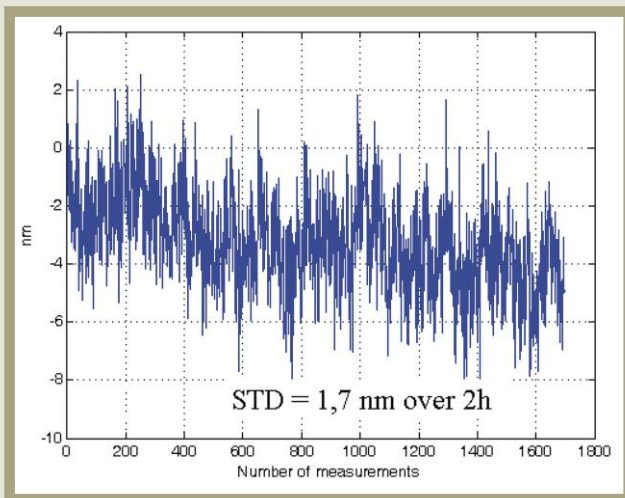


Bild 5. Wiederholbarkeit der Punktantastung über zwei Stunden

alle drei Raumrichtungen und – mithilfe der Federkonstanten der Membran – eine Berechnung des Antastkraftvektors ermöglicht. Da diese Koeffizientenmatrix von der Orientierung der Membran innerhalb der NMM-1 abhängt, ist nach einem Membranwechsel immer eine Kalibrierung notwendig.

Sorgfältige Auswahl der Taststrategie

Der Einsatz von 3D-Mikrotastsystemen zur nanometergenauen Messung erfordert besondere Sorgfalt bei der

Wahl der Antaststrategie. Durch den kleinen Tastkugeldurchmesser und die geringe Antastkraft haben Oberflächeneinflüsse vom Messobjekt einen größeren Einfluss auf das Messergebnis, als dies bei makroskopischen Tastsystemen der Fall ist. Beispiele hierfür sind Oberflächenrauheit, Kugelabplattung, plastische Verformung der Messobjektfläche oder Verschleiß [6].

In **Bild 4** ist das Prinzip der Punktantastung innerhalb der NMM-1 dargestellt. Es entspricht einer vereinfachten Berechnung der Nullantastkraft und basiert auf der Nutzung der linearen Kennlinien des

Sonderpreis
Technologie

Wir machen Sie fit für Ihre Gründung.

Sie haben eine zündende Geschäftsidee? Mit dem Gründungswettbewerb start2grow 2014 starten Sie erfolgreich durch!

Bundesweiter Wettbewerb:

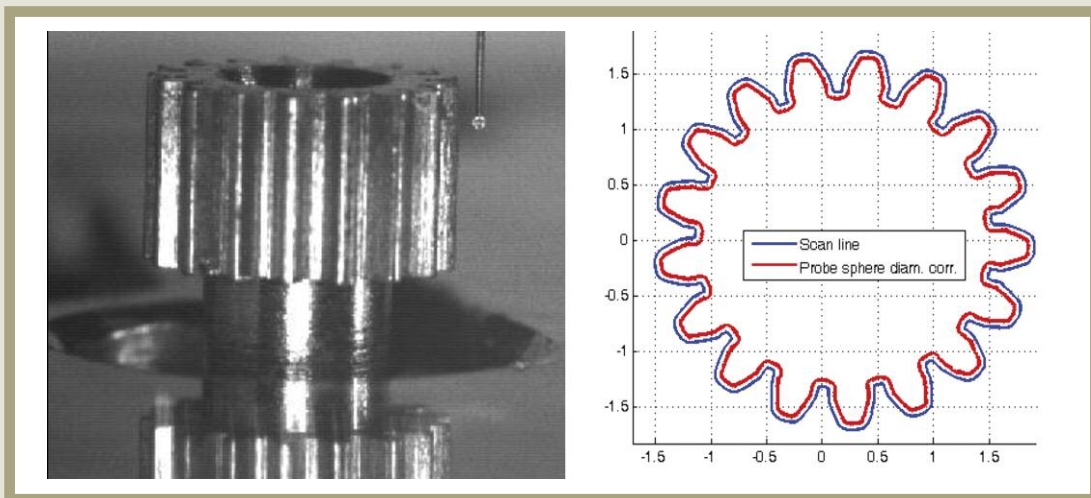
- Kostenfreie Teilnahme
- Hohe Geld- und Sachpreise
- Netzwerk mit mehr als 600 Coaches

Start ab 11. November 2013. Jetzt anmelden: www.start2grow.de



Eine Initiative des dortmund-project.

Bild 6. Dreidimensionaler Freiformscan eines Mikrozahnrads mit der NMM-1



3D-Mikrotaster. Der Signaloffset des Tasters wird vor dem Kontakt mit dem Messobjekt aufgezeichnet (AVR1). Die Nanomessmaschine lenkt dann den Taster bis zum vordefinierten Tastkraft-Sollpunkt aus. Das plötzliche Anhalten der NMM-1 verursacht im Allgemeinen ein Überschwingen der Taster- und Interferometerwerte, daher wurde eine Wartezeit von 50 ms nach Erreichen des Sollwerts eingeführt. Danach werden die Messwerte über eine vordefinierte Zeit (AVR2) gemittelt. Aus Offsetwerten und Sollwerten lässt sich nun die Nullantastkraft berechnen. Elastische Verformungen der Messobjekt Oberfläche fließen somit nicht in das Messergebnis ein. **Bild 5** zeigt die Wiederholbarkeit einer Punktantastung am Scheitelpunkt einer Kalibrierkugel über zwei Stunden. Hier wird eine Standardabweichung von 1,7 nm erreicht.

Freiformscans mit NMM-1 und Mikrotaster

Der große Einfluss der Oberfläche des Messobjekts erschwert das Scannen mit 3D-Mikrotastern erheblich. Beim Start des Scanvorgangs muss das Regelungssystem der NMM-1 zuerst die Haftreibung überwinden. Ist diese wesentlich größer als die darauffolgende Gleitreibung, kann es zu unerwünschten Stick-Slip-Effekten kommen. Der Einfluss solcher Effekte wird durch einen zusätzlichen Feedbackfilter minimiert. **Bild 6** zeigt den Freiformscan eines Mikrozahnrads, eine Beispielanwendung der NMM-1 mit 3D-Mikrotaster.

Die NMM-1 in Verbindung mit dem GannenXP-Mikrotaster ermöglicht nicht nur hochpräzise Freiformflächenmessungen, sondern auch dreidimensionale Scan- und Tastmessungen an Mikrokomponenten. Damit eröffnen sich viele neue Anwendungsfelder wie die Positionierung, Manipulation, Herstellung und Messung von mikroelektronischen, mikromechanischen, optischen und mikrosystemtechnischen Objekten. Des Weiteren sind hochpräzise Kalibrierungen von Leerringen, lateralen Gitterstandards und Stufenhöhenstandards möglich. Messunsicherheiten

im Nanometerbereich werden erreicht, und der Einsatz von Laserinterferometern zur Positionsmessung erlaubt die Rückführbarkeit der Messungen für Kalibrierzwecke. ■ MI110278

AUTOREN

Dipl.-Ing. ENRICO LANGLOTZ ist Entwicklungsingenieur bei Sios Meßtechnik in Ilmenau; langlotz@sios.de

Dr.-Ing. DENIS DONTSOV ist Leiter des Bereichs Forschung und Entwicklung im selben Unternehmen; dontsov@sios.de

Dr.-Ing. WALTER SCHOTT ist Geschäftsführer von Sios Meßtechnik; schott@sios.de

LITERATUR

- Jäger, G.: Three-Dimensional Nanopositioning and Nanomeasuring Machine with a Resolution of 0,1 nm, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2010, Vol. 46, pp. 318–323
- Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, H-J.: The metrological basis and operation of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine NMM-1; Technisches Messen, Vol. 76, No. 5, 2009, pp. 227–233
- Manske, E.; Jäger, G.; Hausotte, T.; Füßl, R.: Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology; Meas. Sci. Technol., Vol. 23, No. 7, 2012
- Hausotte, T.; Percle, B.; Jäger, G.: Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine; Meas. Sci. Technol., Vol. 20 084004, 2009
- Hofmann, N.; Jäger, G.: Measuring the metrological properties of 3D microprobes; Proceedings of the 14th International Conference on Mechatronics Technology – ICMT 2010, Osaka
- Bos, R.: Aspects of tactile probing on the micro scale; Precision Engineering, Vol. 35, Issue 2, 2011, pp. 228–240