

Unconventional, lateral measurements with laser focus sensors

for nanopositioning stages

Using its NPS6D200 positioning system as an example, IMMS has demonstrated that a laser focus sensor for lateral distance measurement can be used as an alternative to optical microscopes or linear encoders for characterising nanopositioning systems. Photograph: IMMS.

Motivation and overview

Highly accurate nanopositioning stages are an important component in the production of modern nanotechnological devices. The measurement and calibration of nanopositioning stages using unidimensional or bidimensional artifacts is possible with various instruments. Traditionally, optical microscopes and linear encoders represent a common choice for that. However, an alternative tool for lateral measurements is applicable, the laser focus sensor (LFS). Originally designed to detect vertical distances between the sample and its objective lens, LFS can also characterise lateral stage motion using specific artifacts. The principle of LFS operation is to emit a circular laser spot and monitor changes in vertical positioning by changes in the shape of the reflected spot. By use of a quadrant detector, an LFS achieves nanometre resolution in vertical measurements. In an alternative operation mode, an LFS can also obtain an intensity signal from the returned spot that can be correlated to lateral movement. This is achieved by detecting different reflective materials on a cross grid consisting of a glass substrate with chromium lines.

[www.imms.de/
nanofab](http://www.imms.de/nanofab)

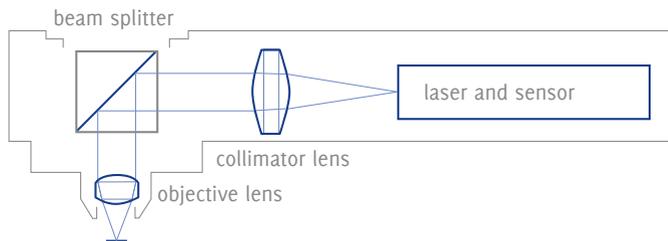


Figure 1:

LFS structure.
Diagram: IMMS.

Functional principle of an LFS system

The LFS is a precise metrological tool capable to measure vertical distances within a narrow range around its focal point, with a typical measuring range of $3 \mu\text{m}$. Illustrated in Figure 1, its design is composed by a single collimated laser beam, deflected by a beam splitter towards the sample. This beam, shaped by the objective lens, interacts with the sample before returning along the same path to a quadrant detector sensor.

Vertical measurements with quadrant detector

Throughout this optical path, the beam's characteristics suffer some transformations. When precisely focused, it manifests as a circular spot; however, deviations from focus result in an ellipsoidal shape, as presented in Figure 2. Furthermore, the orientation of this ellipsoid varies depending on the proximity to or distance from the sample. Signal analysis involves knowing the differences between the quadrants.

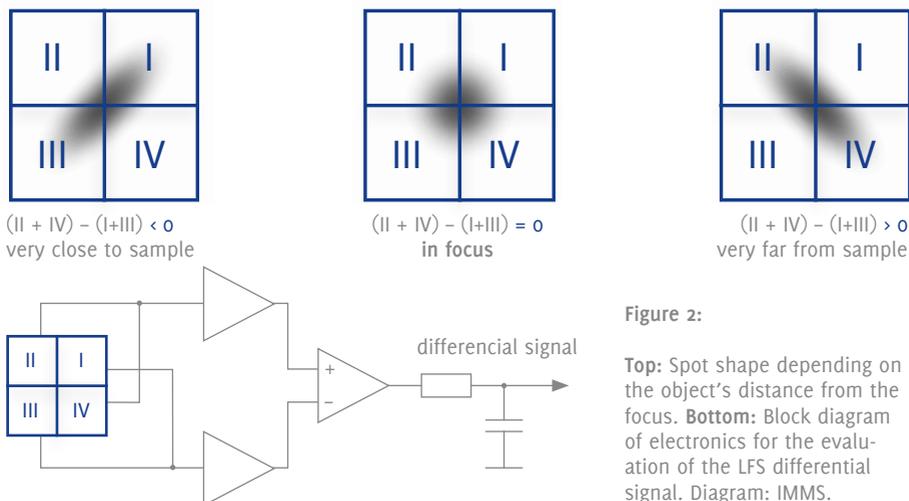


Figure 2:

Top: Spot shape depending on the object's distance from the focus. **Bottom:** Block diagram of electronics for the evaluation of the LFS differential signal. Diagram: IMMS.

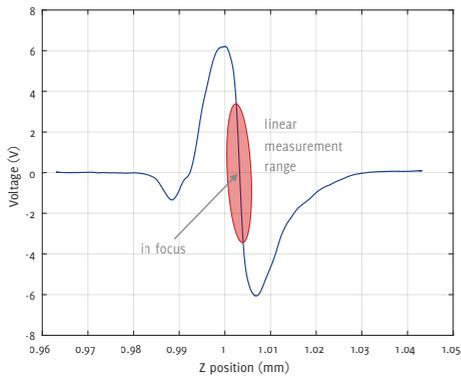


Figure 3:

Difference signal obtained by vertical movement with respect to sample proximity – central zero crossing indicate the focus position.

Diagram: IMMS.

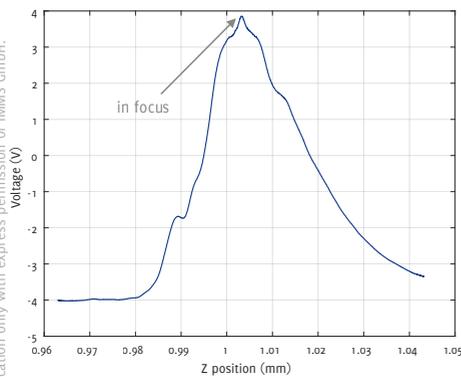


Figure 4:

Sum signal obtained by vertical movement with respect to sample proximity – maximum obtained when the focus is reached.

Diagram: IMMS.

Two signals are provided by the LFS with respect to the laser beam detected by reflection in a sample. The difference signal is obtained from the difference between the diagonal quadrants and is proportional to the vertical position (Figure 3) within the measurement range of the sensor. To characterise the relationship between the vertical position and the voltage obtained in the difference signal, it is necessary to have a vertical movement in the region close to the focus and to align the sample with the axis that will realise the movement. When the distance to the sample is close to the focus, the intensity remains approximately constant.

Simultaneously to the above-mentioned difference signal, the LFS also provides a sum signal of all quadrant signals, which is realised by exchanging the difference block by a sum block in Figure 2. This sum signal provides an impression of the beam intensity, as illustrated in Figure 4. Within the measurement range, the intensity peak means an optimal focus. Beyond this range, signal reduction occurs, as an indicative of the spot exceeding the detector's area. Consequently, intensity remains until reaching a minimum threshold.

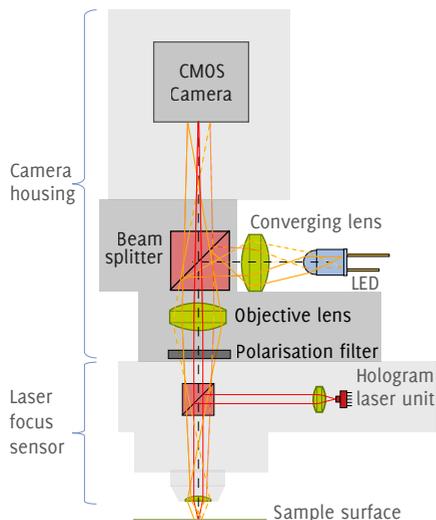


Figure 5: Non-contact probing system of LFS with camera microscope. Graphic: IMMS.

This artifact is composed of different layers with an approximately constant lateral pitch. The type of cross grid used is basically a glass substrate with chromium deposited on top, as shown in Figure 6. Using chemical etching in a microfabrication process, a mask defines areas where the chromium layer is removed, resulting in this physical configuration of lines or squares.

The LFS application here involves the measurement of lateral distances between structures within an available cross grid with a pitch of 40 μm . In this configuration, the motion of the cross grid is realised by a 6D nanopositioning system. This nanopositioning system with six degrees of freedom and 200 mm of planar motion (NPS6D200), shown in Figure 7, incorporates planar direct drives that move a platform in three degrees of freedom over a planar travel range of \varnothing 200 mm. The motion is precisely referenced by differential laser interferometers. To ensure the stability of vertical movements within a range of 25 mm, the platform is supported by three planar aerostatic bearings complemented by three lift modules. Consequently, additional three degrees of freedom in motion can be achieved. This combination of technology and precision engineering results in a 6D motion system capable of pushing the limits of precision measurement and calibration in nanopositioning stages.

Experiment details

For enhanced visualisation, in the following setup a CMOS camera is combined with the LFS (figure 5), promoting the identification of structures within the region of interest. Positioned on top of the LFS, this camera supplements visual guidance, particularly with the aid of additional lighting to enhance image brightness.

A cross grid is selected as a sample to evaluate the performance of the complete system with integration of a nanopositioning machine and the LFS. This

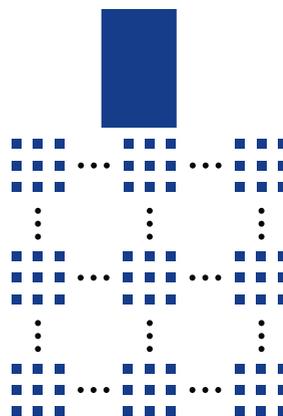


Figure 6: Example of a cross grid where blue parts are the base layer made of glass and white are a chromium layer. Diagram: IMMS.

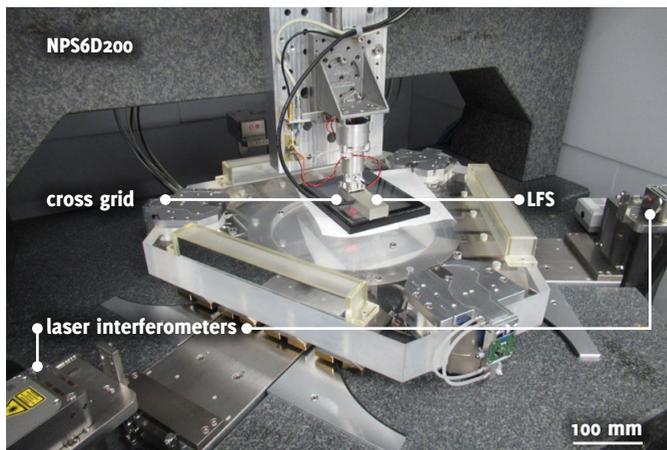


Figure 7:

Laser focus sensor (LFS) assembly with NPS6D200 for cross grid measurements.

Photograph: IMMS.

LFS as an edge detector

Because the cross grid used is made of different materials – glass and chromium – and the distance between the layers is less than $1.5 \mu\text{m}$, the LFS detects a square wave for the sum signal in linear motion, as shown in Figure 8. The difference signal shows some non-linear transitions (peaks in Figure 8) at the edges, which are not useful for the required detection. Consequently, the difference signal cannot be used for lateral measurement based on detected edges. However, the edge positions can be determined from the zero crossings of the sum or intensity signals of the LFS using the laser interferometer data, which means that the LFS can be used as an edge detector.

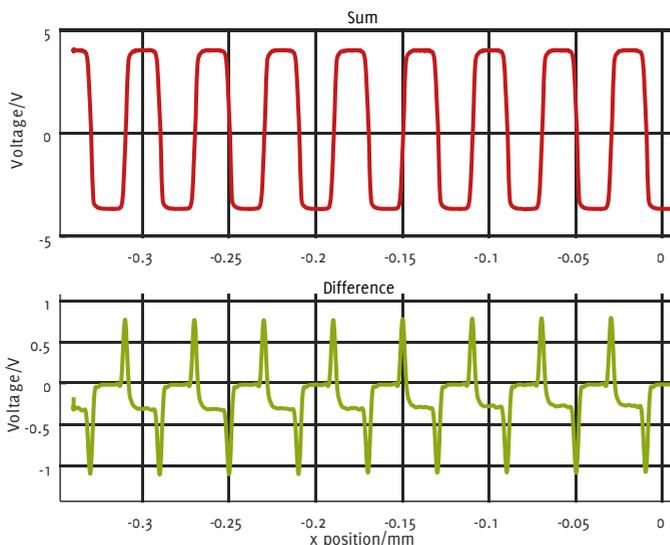


Figure 8:

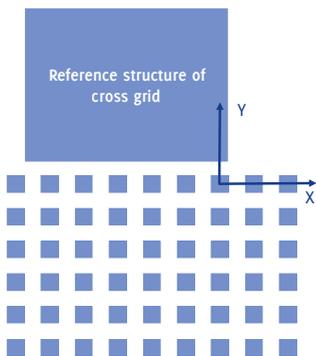
Sum (intensity) and difference (vertical distance from focus) signals with motion in one of the cross grid's major axis.

Diagram: IMMS.

Figure 9:

Coordinate system used to measure cross grid distances.

Diagram: IMMS.



Procedure

Given the coordinate system adopted in Figure 9, the distances between each square shape were calculated from centre to centre. The centre was obtained as the midpoint between the edges of the square.

Each measurement cycle was performed from 0 position to -4 mm and repeated 10 times in X and Y directions. To evaluate the reproducibility, the procedure was repeated on 5 different days. No refractive index correction was applied to these measurements. From the instrumental bias – figures 10 and 11, the standard deviation of the measurement system was evaluated.

Instrumental bias - IB

$IB = \text{average of (nominal value - reference value)}$

- The nominal value is the theoretical value obtained from the accumulated amount of cross grid pitch.
- The reference value is the square centre obtained by laser interferometer positions.

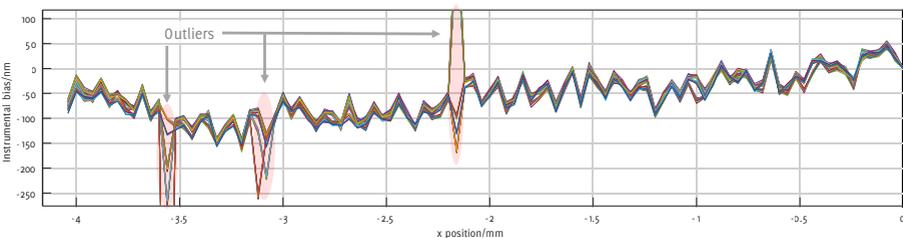


Figure 10: Small changes in cross grid measurements with LFS for X axis on 5 different days – total of 40 measurements. Outliers – contamination – were excluded from the analysis. Diagram: IMMS.

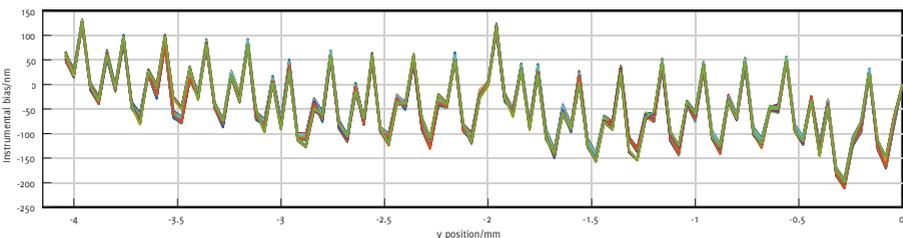


Figure 11: Small changes in cross grid measurements with LFS for Y axis on 5 different days – total of 40 measurements. No major contamination was found. Diagram: IMMS.

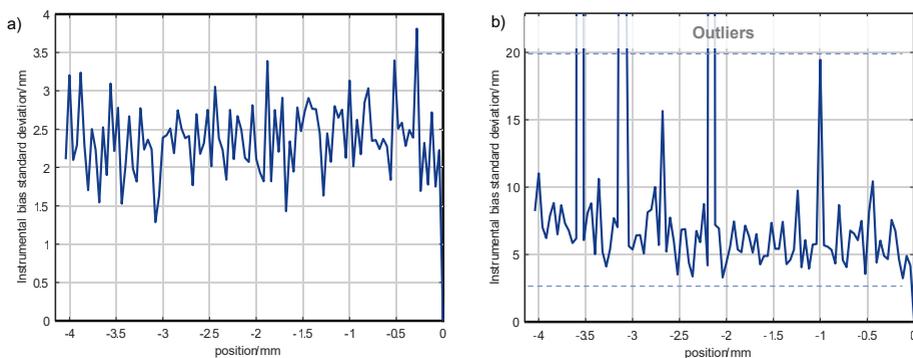


Figure 12: Good repeatability and reproducibility of measurements (outliers not used for analysis) – worst case scenario presented:
a) short term – 10 measurements (1 day); **b) long term** – 40 measurements (5 days). Diagram: IMMS.

Results

For this combination of the LFS and the NPS6D200, less than 4 nm standard deviation of the cross grid centre distance is achieved over a range of 4 mm for X and Y directions in the short term – Figure 12a. In the long term, less than 20 nm standard deviation is determined, Figure 12b, with standard indoor environmental conditions and no further corrections. At the same time, height measurements with the LFS are still possible, although the different reflective properties of the cross grid may reduce the accuracy. The LFS is very sensitive to contamination, which links the outliers in the standard deviation in the long term – Figure 12b – to the instrumental bias detected for the same configuration – Figure 10. These outliers were not included in the analysis. Based on these results, the use of an LFS to measure lateral distances is considered a suitable alternative to optical microscopes and linear encoders in the characterisation of nanopositioning stages.

Contact person: Davi Anders Brasil, M.Sc., davi-anders.brasil@imms.de

Funded by

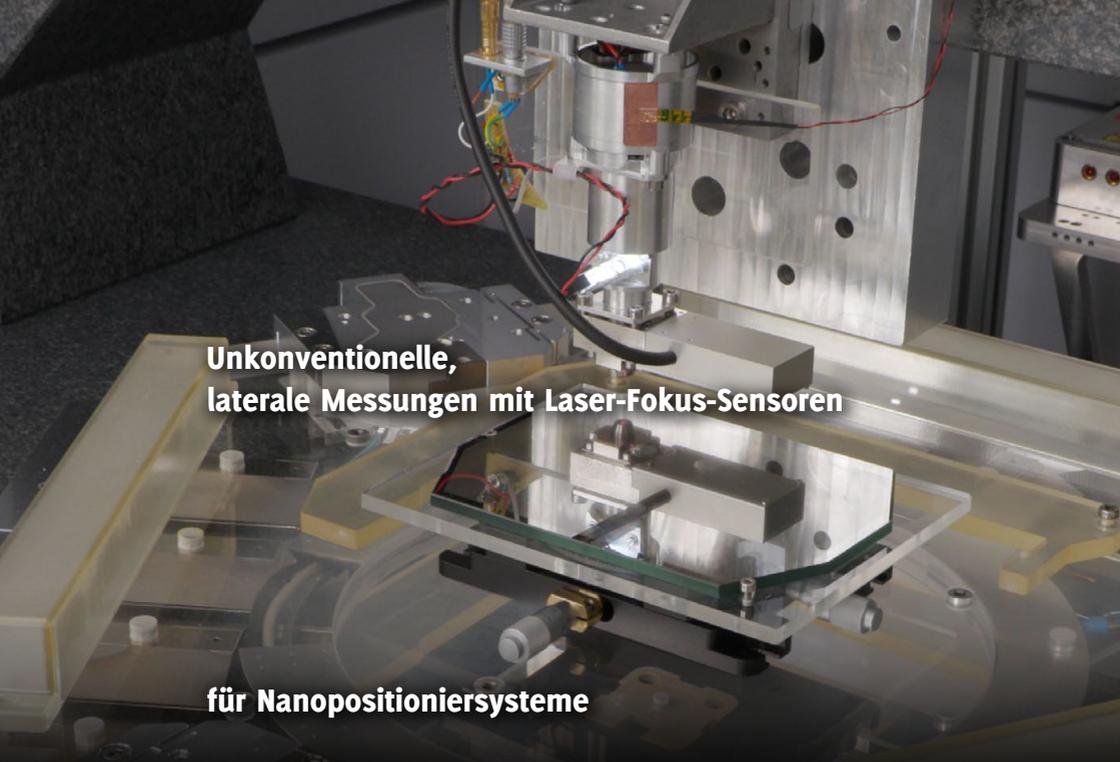
DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

www.imms.de/
nanofab

The Research Training Group 2182 on tip- and laser-based 3D-nanofabrication in extended macroscopic working areas (NanoFab) is funded by the German Research Foundation (DFG) under the funding code DFG GRK 2182.

Annual Report

© IMMS 2023



Unkonventionelle, laterale Messungen mit Laser-Fokus-Sensoren

für Nanopositioniersysteme

Das IMMS hat am Beispiel seines Positioniersystems NPS6D200 nachgewiesen, dass ein Laser-Fokus-Sensor zur lateralen Distanzmessung als Alternative zu optischen Mikroskopen oder Linear-Encodern zur Charakterisierung von Nanopositioniersystemen genutzt werden kann. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Hochgenaue Nanopositioniersysteme sind wichtige Komponenten für die Produktion moderner nanotechnologischer Geräte. Die Messung und Kalibrierung solcher Nanopositioniersysteme mithilfe zwei- oder eindimensionaler Probennormale ist mit verschiedenen Messsystemen möglich. Üblicherweise werden dafür optische Mikroskope oder lineare Encoder genutzt. Alternativ kann aber auch ein Laserfokussensor (LFS) verwendet werden. Diese wurden eigentlich zur Ermittlung vertikaler Abstände zwischen einem Messobjekt und ihrem Objektiv entwickelt. Mit ihnen lassen sich aber auch laterale Positioniersystembewegungen mithilfe spezieller Probennormale über das folgende Funktionsprinzip charakterisieren: Der LFS emittiert einen runden Laserpunkt, dessen Reflexion anschließend bezüglich seiner Form beobachtet wird, die sich abhängig von der vertikalen Positionsänderung verzerrt. Zusammen mit einem Quadrantendetektor werden so für vertikale Messungen LFS-Auflösungen im Nanometerbereich erreicht. Alternativ lässt sich das Intensitätssignal des reflektierten Laserpunktes auswerten und mit lateralen Bewegungen korrelieren. Hierfür

www.imms.de/
nanofab

Jahresbericht

© IMMS 2023

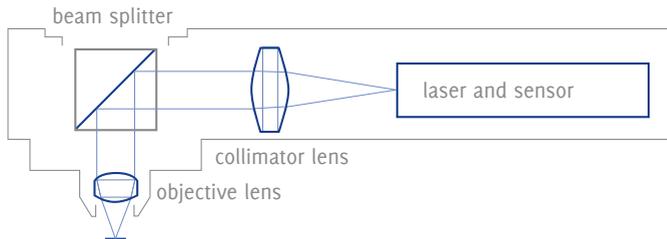


Abbildung 1:

LFS-Prinzip.
Diagramm: IMMS.

werden unterschiedliche Materialien durch ihre individuellen Reflexionseigenschaften auf einem Kreuzraster aus Glas mit aufgetragenen Chrom-Linien detektiert.

Funktionsprinzip eines LFS-Systems

Ein LFS ist ein präzises metrologisches System zur Messung vertikaler Abstände in einem kleinen Bereich um seinen Fokuspunkt mit einem typischen Messbereich von $3 \mu\text{m}$. In Abbildung 1 ist ein Design eines LFS mit einem einzelnen kollimierten Laserstrahl dargestellt, welcher von einem Strahlteiler auf die Probe gelenkt wird. Dieser Laserstrahl wird von einem Objektiv verformt und interagiert mit der Probe. Anschließend läuft er den gleichen Weg zurück zu einem Quadrantendetektor.

Vertikale Messungen mit Quadrantendetektor

Auf dem optischen Weg wird der Strahl transformiert. Ist der Strahl auf der Probe fokussiert, entsteht auf dem Quadrantendetektor ein runder Punkt. Ist die Probe aber nicht im Fokus, erscheint auf dem Quadrantendetektor eine Ellipse, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Orientierung der Ellipse ist abhängig davon, ob die Probe näher oder weiter entfernt ist als die Fokusslänge des Sensors. Durch geeignete Auswertung des Detektors können diese Unterschiede ermittelt werden.

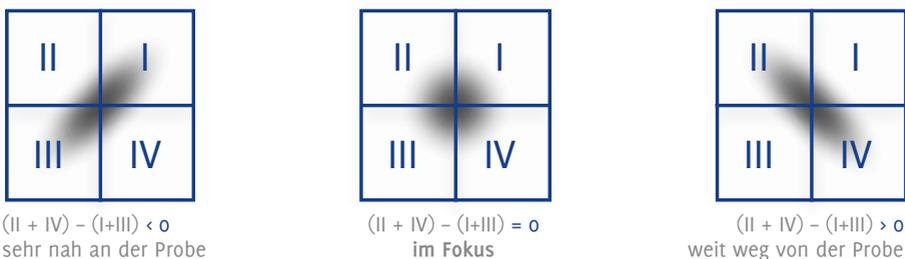
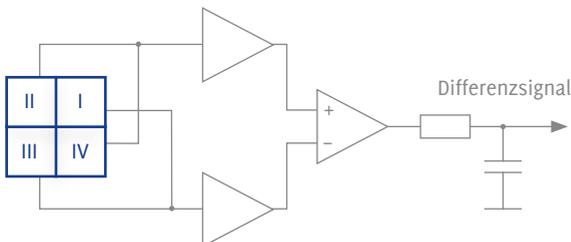


Abbildung 2:

oben: Spotform in
Abhängigkeit von der Entfer-
nung des Objekts vom Fokus;
unten: Blockschaltbild der
Auswerteelektronik des LFS-
Differenzsignals. Grafik: IMMS.



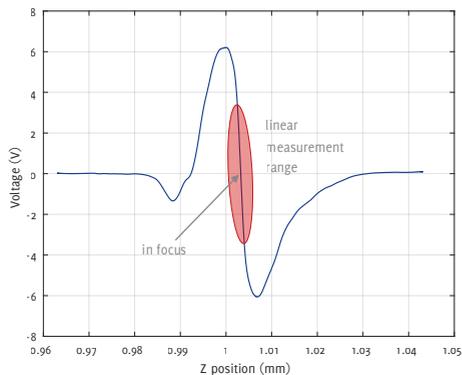


Abbildung 3:

Differenzsignal ermittelt bei Vertikalbewegung bezogen auf die Probe. Der zentrale Nulldurchgang zeigt die Fokusposition.

Diagramm: IMMS.

Der LFS stellt zwei Messsignale aus der Reflexion des Lasers von der Probe zur Verfügung. Das Differenzsignal wird aus der Differenz der diagonalen Quadranten ermittelt und ist proportional zur Vertikalposition (Abbildung 3) innerhalb des Sensor-Messbereiches. Um den Zusammenhang zwischen Vertikalposition und ermittelter Spannung aus dem Differenzsignal zu charakterisieren, ist eine vertikale Bewegung im Bereich nahe dem Fokus zu realisieren sowie die Probe an eben dieser vertikalen Bewegungsachse auszurichten. Wenn der Abstand der Probe nahe dem Fokus ist, verbleibt die Signalintensität ungefähr konstant.

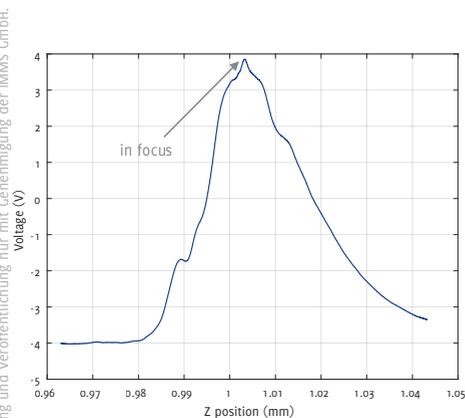


Abbildung 4:

Summensignal, aufgenommen während einer Vertikalbewegung der Probe – Erreichen des Maximums, sobald der Fokus erreicht ist.

Diagramm: IMMS.

Zusammen mit dem oben genannten Differenzsignal stellt der LFS auch ein Summensignal aller Quadrantensignale zur Verfügung, was im Blockschaltbild in Abbildung 2 durch einen Austausch des Differenzblocks durch einen Summenblock erreicht wird. Dieses Summensignal gibt einen Eindruck über die Strahlintensität, dargestellt etwa in Abbildung 4. Innerhalb des Messbereiches stellt die Intensitätsspitze den optimalen Fokus dar. Außerhalb der Spitze ist eine Signalreduktion erkennbar, da die Größe des Lichtpunktes die Detektorfläche überschreitet. Entsprechend verringert sich die Intensität bis auf ein verbleibendes Minimum.

Versuchsbeschreibung

In Versuchen wurde eine CMOS-Kamera mit dem LFS kombiniert, womit Strukturen in der interessierenden Region besser gefunden und dargestellt werden können. Die Kamera ist oberhalb des LFS montiert und verbessert durch zusätzliche Beleuchtung die Bildhelligkeit.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems aus Nanopositioniermaschine und LFS wird als Probe ein Kreuzraster genutzt. Dieses Probennormal stellt verschiedene Schichten mit annähernd konstantem lateralen Abstand dar.

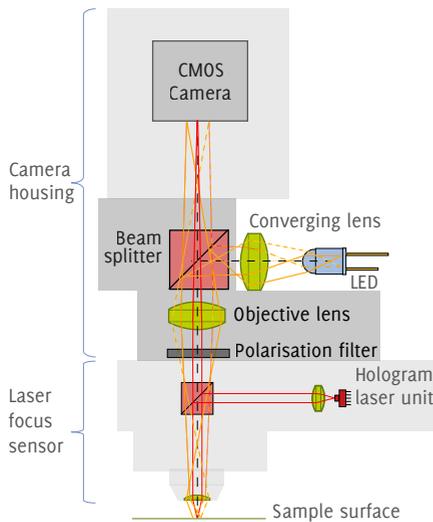


Abbildung 5: Berührungsloses Antastsystem aus LFS und Kameramikroskop. Grafik: IMMS.

Das hier verwendete Kreuzraster besteht aus einem Glas-Substrat mit aufgebrachtem Chrom wie dargestellt in Abbildung 6. Im zugehörigen chemischen Mikrofabrikationsprozess definiert eine Maske, wo die Chromschicht durch Ätzen entfernt wird, was in der physikalischen Ausbildung von Linien und Quadraten resultiert.

In dieser Untersuchung wird der LFS genutzt, um laterale Abstände zwischen den Strukturen eines Kreuzrasters mit 40- μm -Periode zu vermessen. Die Bewegung des Kreuzrasters relativ zum LFS wird durch ein 6D-Nanopositioniersystem realisiert. Dieses Nanopositioniersystem NPS6D200 (dargestellt in Abbildung 7) mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden realisiert mittels elektromagnetischer Direktantriebe einen planaren Bewegungsbereich des Läufers von \varnothing 200 mm. Als Feedbacksystem werden hochpräzise Differenz-Interferometer genutzt. Drei Hubmodule erweitern die Bewegungsfähigkeit des Läufers um drei weitere Bewegungsfreiheitsgrade. Die Stabilität der vertikalen Bewegung wird dabei durch drei aero-statische Planarlager gesichert. Insgesamt wird durch diese Kombination von Technologien und Präzisions-Engineering ein 6D-Positioniersystem realisiert, welches die aktuellen Grenzen von Präzisions-Messungen und -Kalibrierungen zu verschieben vermag.

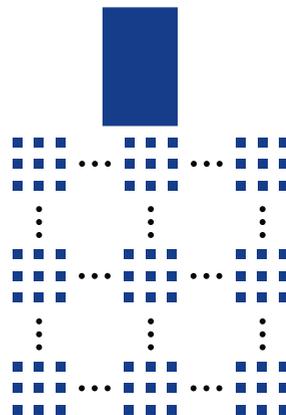


Abbildung 6: Beispiel eines Kreuzrasters, worin die blauen Anteile das Glas-Grundsubstrat und die weißen Anteile die Chromschicht darstellen. Diagramm: IMMS.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

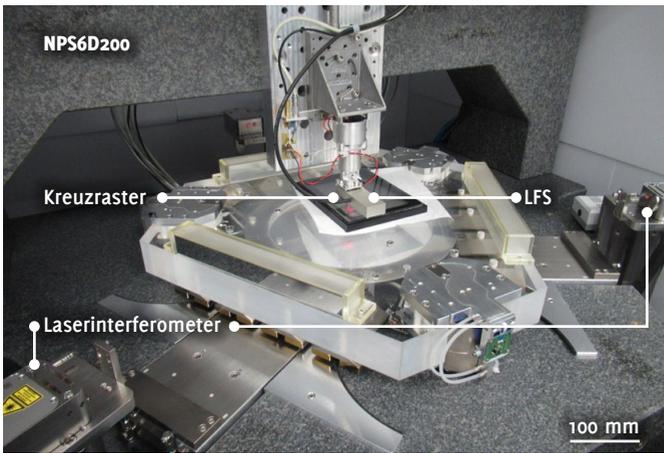


Abbildung 7:

Laser-Fokus-Sensor-Baugruppe (LFS) zusammen mit dem Positioniersystem NPS6D200 zur Vermessung inkrementeller Kreuzraster.

Foto: IMMS.

LFS als Sensor zur Kantenerkennung

Aufgrund der unterschiedlichen Materialien des Kreuzrasters – Glas und Chrom – und des Abstands der beiden Schichten unter $1,5 \mu\text{m}$ ergibt sich für das Summensignal des LFS die Form einer Rechteckwelle während linearer Bewegung, wie dargestellt in Abbildung 8. Das Differenzsignal zeigt einige nicht-lineare Übergänge (Peaks in Abbildung 8) an den Kanten, welche für die geplante Kantendetektion nicht sinnvoll nutzbar sind. Folglich ist das Differenzsignal für die laterale Vermessung anhand detektierter Kanten nicht einsetzbar. Aus den Nulldurchgängen der Summen- bzw. Intensitäts-Signale des LFS können jedoch mit den Laserinterferometer-Daten die Kantenpositionen ermittelt werden, womit der LFS als Kantendetektor eingesetzt werden kann.

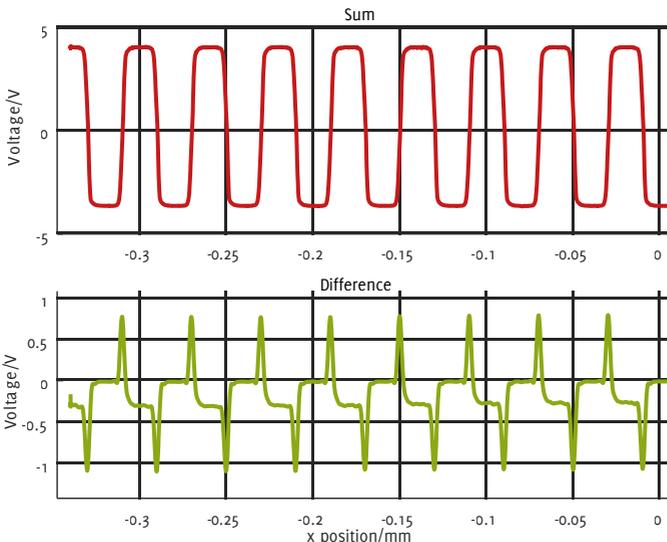


Abbildung 8:

Summen- (Intensität) und Differenzsignal (vertikaler Abstand vom Fokus) während einer Bewegung in Richtung einer der Hauptachsen des Kreuzrasters.

Diagramm: IMMS.

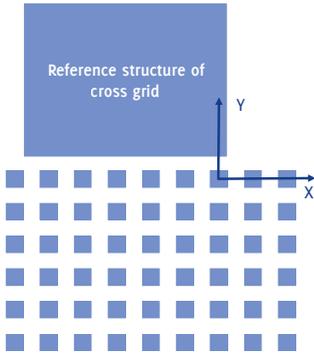
Jahresbericht

© IMMS 2023

Abbildung 9:

Koordinatensystem zur Messung der Kreuzraster-Abstände.

Diagramm: IMMS.



Vorgehen

Ausgehend vom Koordinatensystem aus Abbildung 9 wird der Abstand zwischen jedem Quadrat des Kreuzrasters jeweils von Mittelpunkt zu Mittelpunkt berechnet. Jeder Quadrat-Mittelpunkt wird aus den jeweiligen Kanten errechnet.

Jeder Messzyklus läuft zwischen Null-Position und -4 mm und wird 10-mal jeweils in X- und Y-Richtung wiederholt. Zur Evaluierung der Reproduzierbarkeit wird diese Prozedur an fünf unterschiedlichen Tagen wiederholt. Eine Brechzahl-Korrektur wurde nicht angewandt. Aus der Instrumentenverzerrung wird anschließend die Standardabweichung des Messsystems ermittelt (Abbildung 10 und 11).

97

> Integrierte Sensorsysteme
> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
> Mag6D-nm-Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

Instrumentenverzerrung (Instrumental bias – IB)

$IB = \text{Mittelwert (Nominalwert – Referenzwert)}$

- Der Nominalwert ist der theoretische Wert, welcher aus den akkumulierten Kreuzraster-Abständen ermittelt wird.
- Der Referenzwert ist der Quadrat-Mittelpunkt, welcher durch die Laserinterferometer-Werte ermittelt wird.

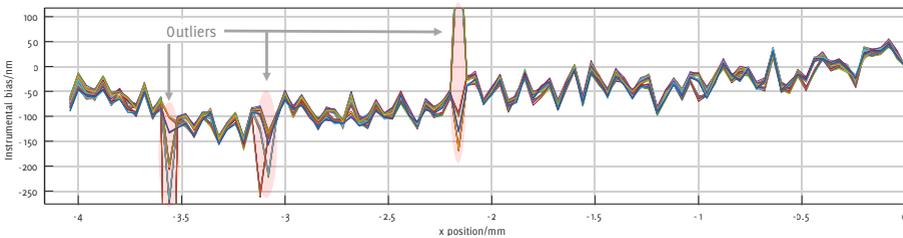


Abbildung 10: Kleine Abweichungen innerhalb der Kreuzraster-Messungen mittels LFS in X-Richtung an 5 unterschiedlichen Tagen – insgesamt 40 Messungen. Ausreißer (Verunreinigungen) wurden aus der Auswertung ausgeschlossen. Diagramm: IMMS.

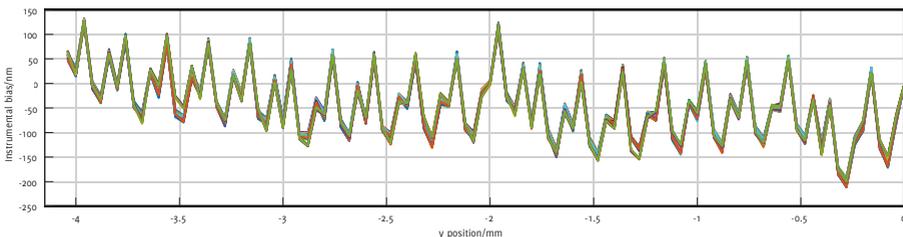


Abbildung 11: Kleine Abweichungen innerhalb der Kreuzraster-Messungen mittels LFS in Y-Richtung an 5 unterschiedlichen Tagen – insgesamt 40 Messungen. Diagramm: IMMS.

Jahresbericht

© IMMS 2023

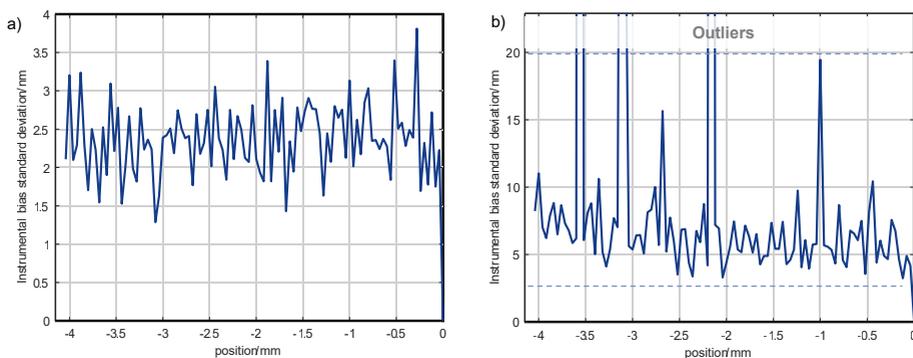


Abbildung 12: Gute Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen (unter Vernachlässigung der Ausreißer) – dargestellt ist das Worst-Case-Szenario:

a) Kurzzeit: 10 Messungen (1 Tag); b) Langzeit: 40 Messungen (5 Tage). Diagramm: IMMS.

Ergebnisse

Wie in Abbildung 12a dargestellt, konnten mit dieser Kombination aus LFS und NPS6D200 über einen kurzen Zeitraum Standardabweichungen kleiner 4 nm für die Mittelpunkt-Abstandsmessung über einen Bereich von 4 mm in X- und Y-Richtung erreicht werden. Wie in Abbildung 12b dargestellt, konnten für lange Zeiträume bei normalen Innenraum-Umgebungsbedingungen sowie ohne weitere Umweltkorrekturen kleiner 20 nm Standardabweichung ermittelt werden. Höhenmessungen sind mit dem LFS gleichzeitig möglich, die unterschiedlichen Reflexivitäten der Kreuzraster-Materialien reduzieren aber die Genauigkeit. Der LFS ist sehr sensibel gegenüber Verunreinigungen, welche die Ausreißer der Langzeit-Standardabweichung (Abbildung 12b) mit der Instrumentenverzerrung für die gleiche Konfiguration (Abbildung 10) kombinieren. Diese Ausreißer wurden entsprechend nicht mit ausgewertet. Diese Resultate zeigen, dass ein LFS zur lateralen Distanzmessung genutzt werden kann und somit eine Alternative zu optischen Mikroskopen oder Linear-Encodern zur Charakterisierung von Nanopositioniersystemen darstellt.

Kontakt: Davi Anders Brasil, M.Sc., davi-anders.brasil@imms.de

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

www.imms.de/

nanofab

Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wird unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Jahresbericht

© IMMS 2023