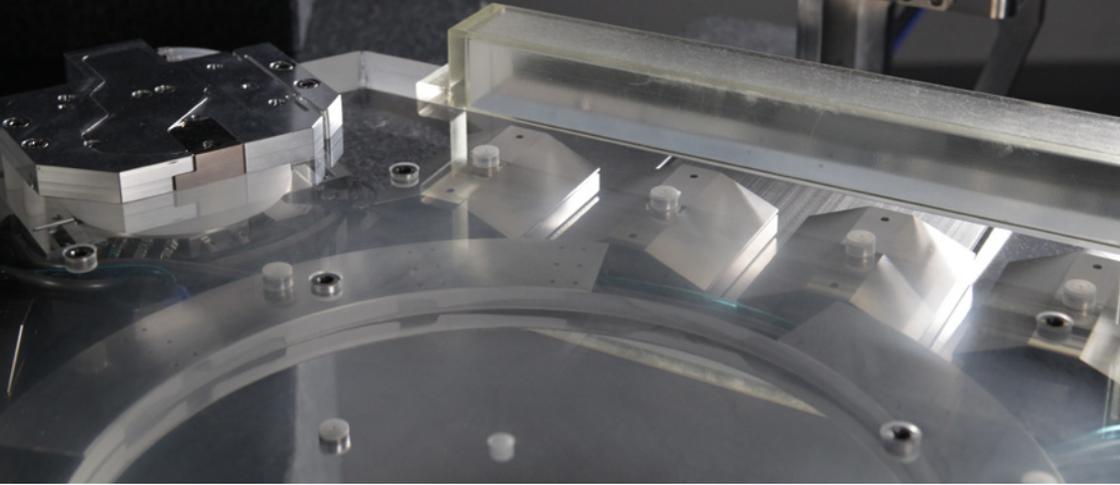


NPS6D200 – 6D-controlled direct drive system

for nanometre-precise positioning
in the motion range of \varnothing 200 mm x 25 mm



6D-controlled nanopositioning system NPS6D200 developed at IMMS: The close-up shows the slider with one of the three lifting modules for vertical movements up to 25 mm, magnetic bridges and a laser interferometer. Important milestones for this system were developed in the internal research group NextGenPos and in the DFG research training group NanoFab. Photograph: IMMS.

Motivation and overview

Nanotechnology has not only been on the rise in recent years. In the meantime, cutting-edge research in the nanosciences has advanced into the sub-nanometre range. It is not only the semiconductor industry, but also a growing number of new applications, e.g. in nano-optics, photonics or biosensor technology, that require measurement and fabrication techniques that offer a resolution and precision of less than 10 nm. In addition to the further development of the CMOS process, the research field of “sub-10 nm fabrication” has established itself, which represents a wide range of new applications that require nanometre-precise positioning. The dimensions of the substrates (e.g. wafers) and thus the required working range of the positioning systems are constantly increasing. This trend is the central impetus for the further development and research of high-end measuring and production machines and for the need for multi-axis positioning systems that enable nanometre-precise deterministic movements in large working ranges.

www.imms.de/nmdrives

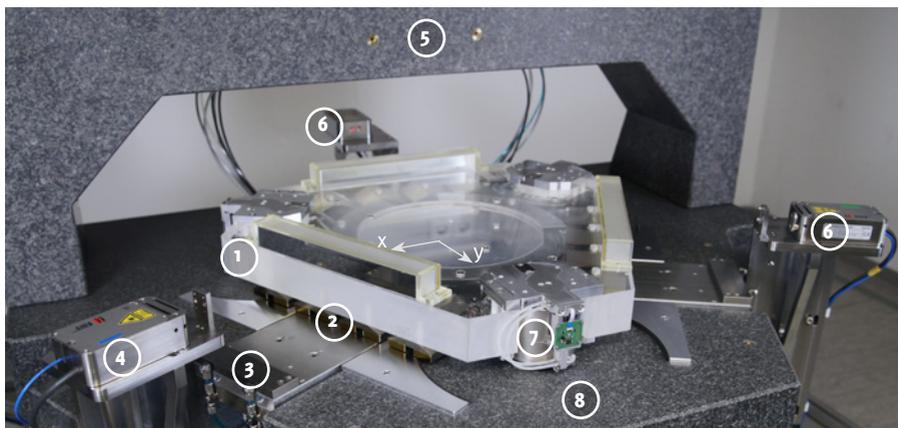


Figure 1: NPS6D200 (1) Slider with reflectors; (2) Magnets of the planar direct drive (move with the slider); (3) Coils of the planar direct drive (encapsulated); (4) Laserinterferometer; (5) Granite portal with interface for the probe system; (6) Laserinterferometer; (7) Lifting module LAU25; (8) Granite stator. Photograph/Graphic: IMMS.

To achieve good controllability and finally servo errors in the nanometre range in the actively controlled axis directions, the basic architecture of the motion system plays an important role. In conventionally structured systems with serially stacked individual axes, long force transmission paths, soft coupling points within the force transmission, low-frequency mechanical resonances or position-dependent changes in the system transmission behaviour can very quickly limit the positioning performance that can be achieved at the point of interest. Parallel kinematic structures offer great potential for improvement here, especially when they are combined with direct force transmission to the moving part and friction-free guidance of the same.

www.imms.de/
nm drives

Direct drive principle as a basic approach

With this basic philosophy, a nanopositioning system controlled in 6 degrees of freedom (6D) for a working range of $\varnothing 200$ mm (planar) and 25 mm (vertical) was developed at IMMS – the NPS6D200, see Figure 1. The architecture is based on the concept of an integrated planar direct drive for large-scale lateral positioning, as already used for other positioning solutions at IMMS. The main idea behind the new development of the NPS6D200 is to extend this concept to include vertical actuation with a motion distance of 25 mm. Thanks to the flat design of the integrated planar direct drive, vertical adjustment can be achieved directly between the stator and the moving part. In this way, the advantages of the direct drive principle are retained and all drive forces can continue to act directly and contact-free on the same body.

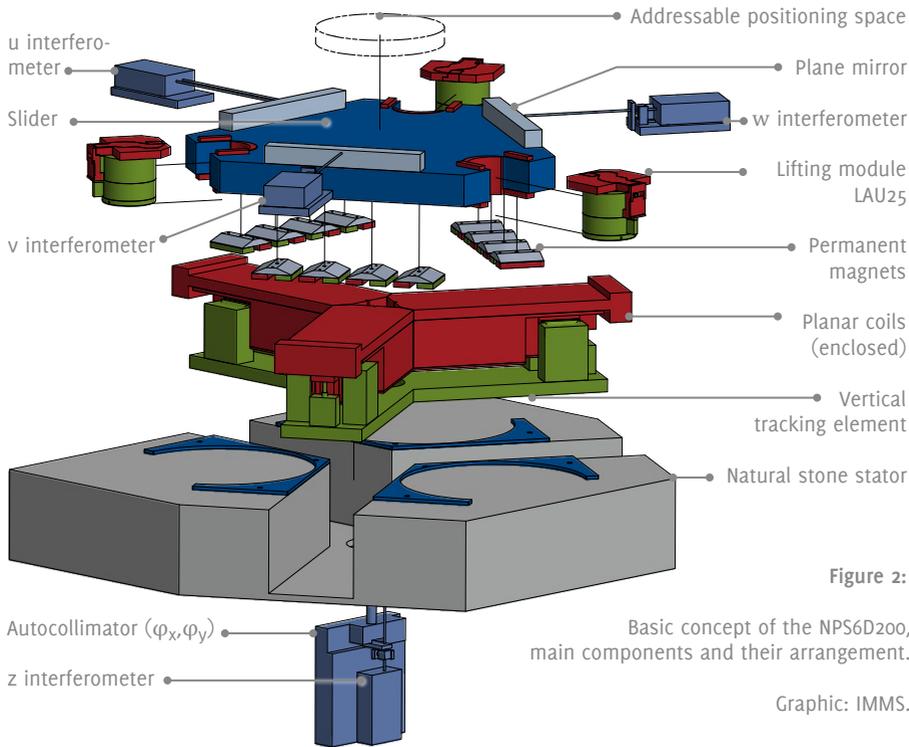


Figure 2:

Basic concept of the NPS6D200, main components and their arrangement.

Graphic: IMMS.

> *Integrated sensor systems*
 > *Distributed measurement+ test systems*
 > *nm-precise 6D direct drives*
 > *Contents*
 * *Funding*

This body is the so-called slider, whose movement is controlled in all six degrees of freedom (DOFs). The displacements in x , y , z are available for large-scale movements, while the rotational degrees of freedom φ_x , φ_y , φ_z are operated as zero-point control.

www.imms.de/
nm drives

Compared to purely planar positioning, vertical adjustment enables a significantly extended range of functions for the resulting overall system:

- Compensation of guiding deviations in z , φ_x , φ_y
- Probing of 3D objects, inclined surfaces and macroscopic step heights
- Applications with vertical displacement, e.g. focus variations in interferometry or contour following with optical or mechanical probing
- Loading/unloading of the measurement object without dismantling the probing or manipulation tool.
- Vertical adjustment using over-actuated lifting modules with aerostatic guidance.

As can be seen in Figure 2, the NPS6D200 is based on a planar drive in a triangular basic configuration and three lifting and actuating units (LAU25), which realise the vertical drive as well as the aerostatic guidance. The integrated direct drive

for controlling the planar movement is made up of three linear actuators in a 120° arrangement, each unit consisting of stationary flat coils and a moving magnet array. The three actuators together generate the drive force in the xy plane as well as the torque for addressing the rotation around the vertical axis φ_z . For precise vertical movement of the quartz slider, three lifting modules (LAU25) are positioned at the corners of the triangle and, in combination, cause the displacement in the z-direction and the tilting in the rotational degrees of freedom φ_x and φ_y .

Each LAU25 module combines several functions in a compact, integrated design:

- Dynamic actuator with high bandwidth using voice coil actuator,
- Quasi-static pneumatic actuator for weight compensation,
- Aerostatic guiding for frictionless movement,
- Internal optical encoder for initialisation.

The heart of the lifting modules is a pneumatic actuator that generates low-frequency vertical forces primarily for weight compensation. For this purpose, the pressure in a contactlessly sealed pressure chamber, see figure 3, is controlled individually and with high precision. The non-contact gap seal of the pressure chamber is integrated into the shape of the vertical air guiding, so that friction is consequently avoided as a source of interference and the introduction of disturbances into the system is minimised. While the pneumatic actuator bears the static load, a concentrically arranged and parallel acting voice coil actuator generates the dynamic forces required for high-precision control. As a result, the lifting modules allow the slider's own weight to be carried without any significant power consumption in the voice coil actuators and at the same time its vertical position can be adjusted very sensitively.

www.imms.de/
nmdrives

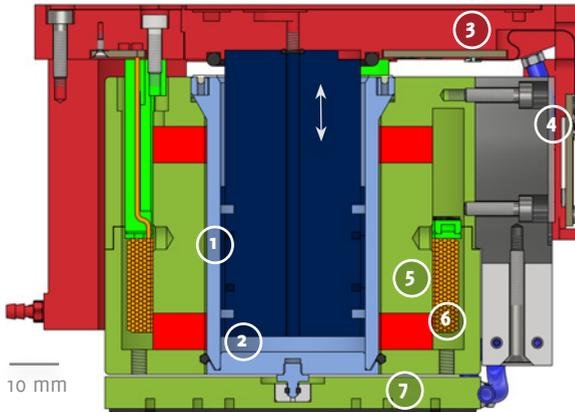


Figure 3:

Sectional view of the LAU25 lifting module: (1) Vertical aerostatic bushing guide; (2) Pressure chamber for pneumatic weight compensation; (3) Vertically moving part (interface to the slider); (4) Encoder measuring system; (5) Voice coil actuator, field part; (6) Voice coil actuator, coil section (moving); (7) planar air bearing.

Graphics: IMMS.

The slider made of quartz glass not only represents the moving part of the drive system, but also contains the reflectors for high-resolution displacement and angle measurement via laser interferometers and a 2D autocollimator. The machine metrology is defined by the arrangement of the reflectors (on the slider) and the measuring heads (on the stator). The closed-loop control of the slider position on the basis of this 6DOF measurement means that the imperfections of the various air guides do not become effective as positioning errors and the accuracy of the slider movement is only determined by the machine metrology and the achievable control performance.

Characteristics of the NPS6D200 system at a glance:

– xyz motion range: \emptyset 200 mm x 25 mm	– xyz measurement resolution: 20 pm	www.imms.de/
– xy speed: 50 mm/s	– Moved mass: 36 kg	nmdrives
– z speed: 2 mm/s	– Payload: 5 kg	
– Acceleration: 250 mm/s ²		

3D nanopositioning in point-to-point mode and on trajectories

When operating with a constant target value, the NPS6D200 achieves an RMS control deviation of less than 1 nm in all three axis directions, see Figure 4. This closed-loop performance is made possible by the consistent implementation of the direct drive principle, the avoidance of internally generated disturbances and, last but not least, a specially developed 6D control of the over-actuated overall system. This enables positioning with steps at nanometre level as well as simultaneous and synchronised movement in all three axes along complex 3D trajectories with nanometre precision. In cross-scale helix tests with dimensions ranging from 40 nanometres to 40 millimetres, path deviations in the low single-digit nanometre range are achieved – Figure 5 shows an example of the measured slider position for a \emptyset 40 nm x 20 nm helix. At the same time, despite the high moving mass, only a very low current consumption of a few milliamperes can be observed in the vertical actuators.

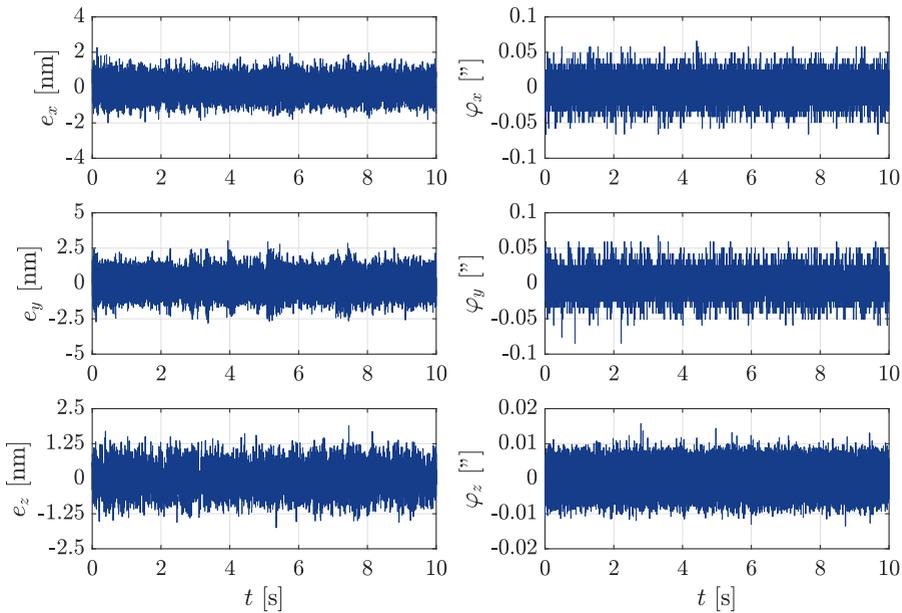


Figure 4: Position time signal in closed-loop operation with constant target value. The RMS control deviation is $e_x = 0.47$ nm, $e_y = 0.68$ nm, $e_z = 0.41$ nm (figure on the left) and $e_{\varphi_x} = 11.21$ m", $e_{\varphi_y} = 9.83$ m", $e_{\varphi_z} = 3.03$ m" (figure on the right). Graphics: IMMS.

This positioning capability demonstrates the suitability of the NPS6D200 for nano-positioning tasks in large 3D working areas, while at the same time generating very little heat and minimising emissions into the measurement volume. With this combination, the system is well suited as a positioning platform for nanotechnology

www.imms.de/
nm-drives

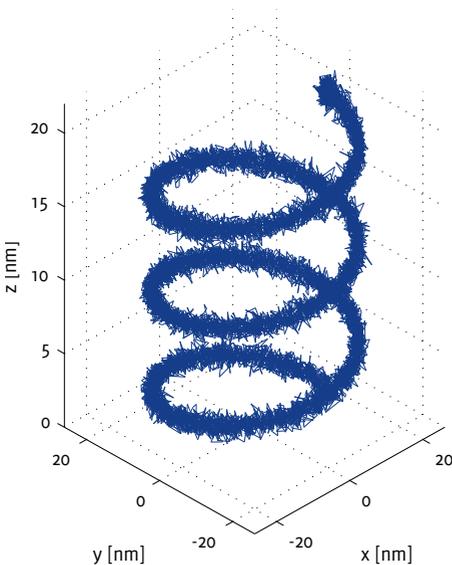


Figure 5:

Position measurement signal of a 3D trajectory, helix:
 \varnothing 40 nm x 20 nm (height),

RMS trajectory error:

$e_x = 0.71$ nm,
 $e_y = 0.88$ nm,
 $e_z = 0.39$ nm.

Graphics: IMMS.

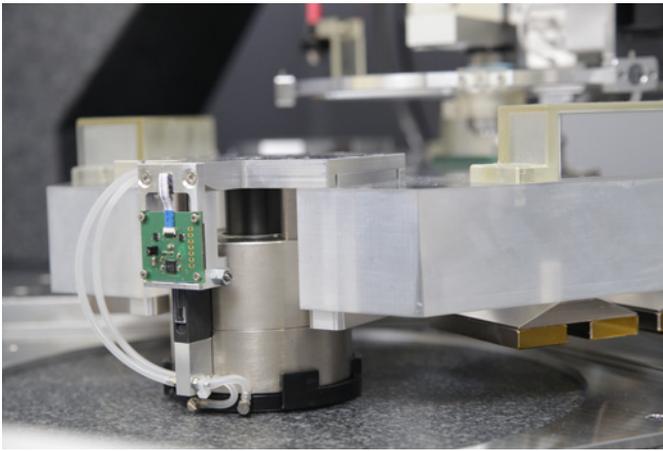


Figure 6:

One of the three LAU25 lifting modules integrated in the NPS6D200 for vertical movements of up to 25 mm.

Photograph: IMMS.

applications that require such precise position control between the tool and substrate up to wafer size on the one hand and that rely on minimised interference in the interaction area on the other, for example wafer-based inspection, long-range AFM scans or sub-10 nm fabrication.

www.imms.de/nmdrives

Contact person: Steffen Hesse, steffen.hesse@imms.de

Freistaat
Thüringen 

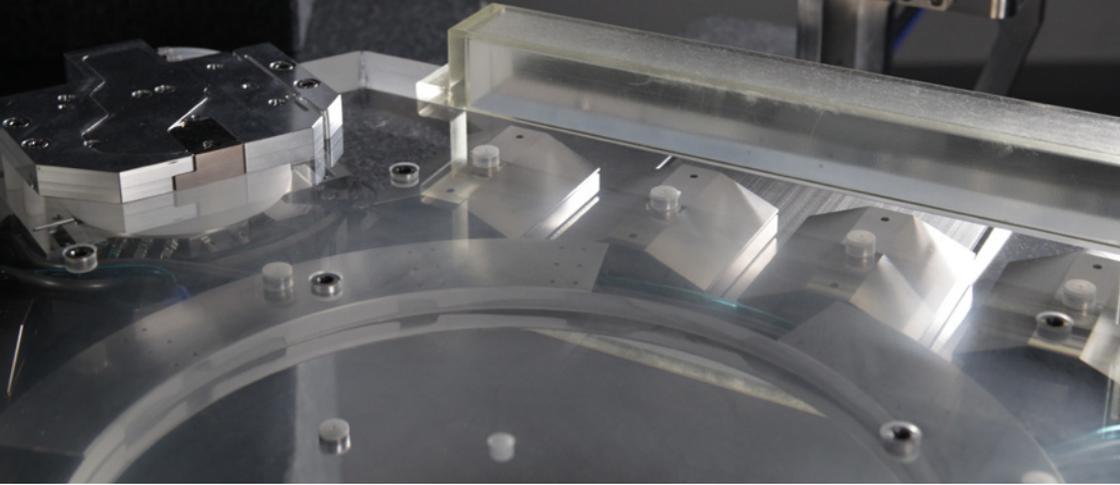
Funded by
DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft
German Research Foundation

Parts of the work presented were carried out in the internal research group NextGenPos and the NanoFab graduate programme. The internal research group "Next Generation Positioning" (NextGenPos) was funded by the German Land of Thüringen. The Research Training Group 2182 on Tip- and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working areas (NanoFab) was funded by the German Research Foundation (DFG) under the funding code DFG GRK 2182.

www.imms.de/nanofab

NPS6D200 – 6D-geregeltes Direktantriebssystem

für die nanometergenaue Positionierung
im Verfahrbereich von \varnothing 200 mm x 25 mm



Am IMMS entwickeltes 6D-geregeltes Nanopositioniersystem NPS6D200: Die Detailaufnahme zeigt den Läufer mit einem der drei Hubmodule für vertikale Bewegungen bis 25 mm, Magnetbrücken und Laserinterferometer. Wichtige Meileinsteine für dieses System wurden in der internen Forschungsgruppe NextGenPos und im DFG-Graduiertenkolleg NanoFab erarbeitet. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Nicht erst in den letzten Jahren sind die Nanotechnologien auf dem Vormarsch und mittlerweile ist die Spitzenforschung in den Nanowissenschaften in den Subnanometerbereich vorgedrungen. Dabei ist es nicht nur die Halbleiterindustrie, sondern auch eine wachsende Zahl neuer Anwendungen, z.B. in der Nanooptik, Photonik oder der Biosensorik, benötigt Mess- und Fabrikationstechnologien, die eine Auflösung und Präzision von unter 10 nm bieten. So hat sich über die Weiterentwicklung des CMOS-Prozesses hinaus der Forschungsbereich der „sub-10 nm fabrication“ etabliert, der eine breite Palette neuer Anwendungen darstellt, die nanometerpräzise Positionierung erfordern. Die Abmessungen der Substrate (z.B. Wafer) und somit der benötigte Arbeitsbereich der Positioniersysteme steigt dabei beständig an. Dieser Trend ist die zentrale Triebfeder für die Weiterentwicklung und Erforschung von High-End-Mess- und Fertigungsmaschinen und für den Bedarf an mehrachsigen Positioniersystemen, welche nanometergenaue deterministische Bewegungen in großen Arbeitsbereichen ermöglichen.

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

Jahresbericht

© IMMS 2024

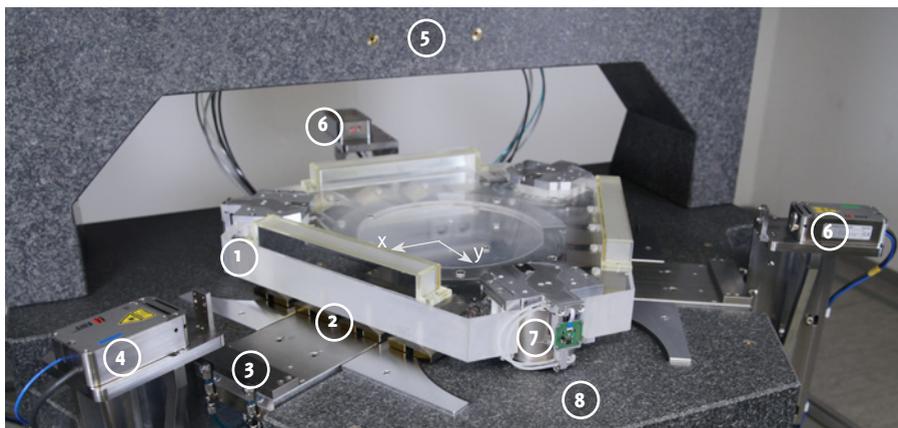


Abbildung 1: NPS6D200 (1) Läufer mit Reflektoren; (2) Magnete des planaren Direktantriebs (bewegen sich mit dem Läufer); (3) Spulen des planaren Direktantriebs (gekapselt); (4) Laserinterferometer; (5) Granitportal mit Schnittstelle für das Antastsystem; (6) Laserinterferometer; (7) Hubmodul LAU25; (8) Granitstator. Foto/Grafik: IMMS.

Um in den aktiv gesteuerten Achsrichtungen eine gute Regelbarkeit und letztendlich Regelabweichungen im Nanometerbereich zu erzielen, spielt bereits die Grundarchitektur des Bewegungssystems eine wichtige Rolle. Bei konventionell strukturierten Systemen mit seriell gestapelten Einzelachsen können lange Kraftübertragungswege, weiche Koppelstellen innerhalb der Kraftübertragung, niederfrequente mechanische Resonanzen oder auch positionsabhängige Änderungen im Systemübertragungsverhalten sehr schnell die im Antastpunkt erreichbare Positionierperformance entscheidend begrenzen. Parallelkinematik-Strukturen bringen hier ein großes Verbesserungspotential mit, vor allem, wenn sie mit einer direkten Kraftübertragung auf das bewegte Teil und einer reibungsfreien Führung desselben kombiniert werden.

Direktantriebsprinzip als Grundansatz

Mit dieser Grundphilosophie wurde am IMMS ein in 6 Freiheitsgraden (6D) geregeltes Nanopositioniersystem für einen Arbeitsbereich von $\varnothing 200$ mm (planar) und 25 mm (vertikal) entwickelt – das NPS6D200, siehe Abbildung 1. Die Architektur basiert auf dem Konzept eines integrierten planaren Direktantriebs für die großräumige laterale Positionierung, wie es bereits anderen Positionierlösungen des IMMS zum Einsatz kommt. Hauptidee bei der Neuentwicklung des NPS6D200 ist die Erweiterung dieses Konzepts um eine vertikale Aktuierung mit 25 mm Verfahrweg. Durch die flächige Bauform des integrierten planaren Direktantriebs kann die vertikale Verstellung direkt zwischen Stator und beweglichem Teil realisiert werden. Auf diese Weise

www.imms.de/
nm-drives

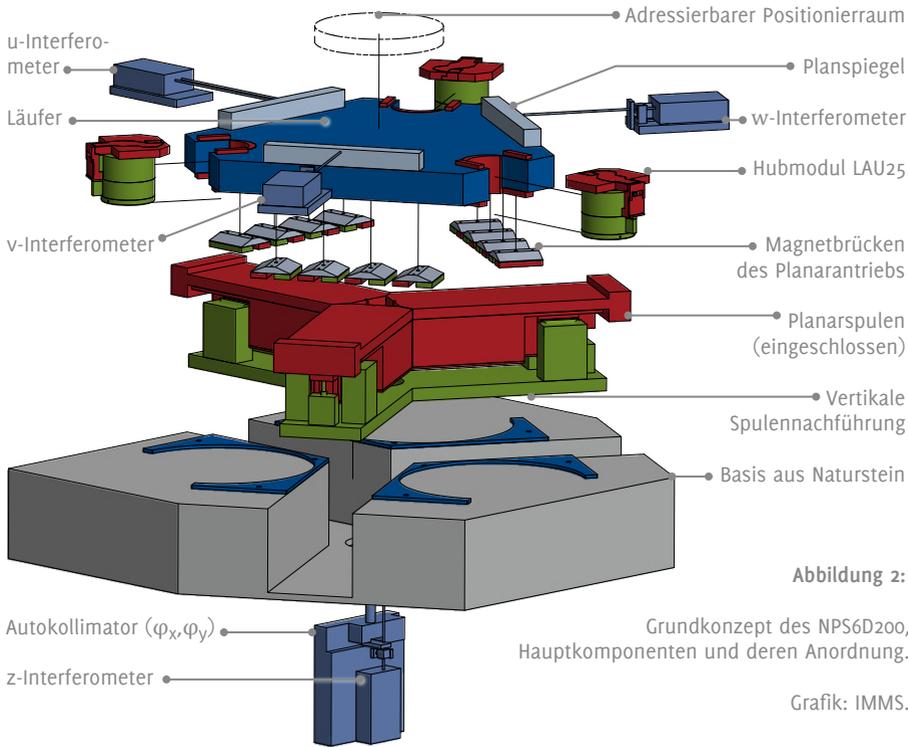


Abbildung 2:

Grundkonzept des NPS6D200,
Hauptkomponenten und deren Anordnung.

Grafik: IMMS.

werden die Vorteile des Direktantriebsprinzips beibehalten und weiterhin können alle Antriebskräfte direkt und berührungsfrei auf denselben Körper wirken. Dieser Körper ist der so genannte Läufer, dessen Bewegung in allen sechs Freiheitsgraden (DOFs) kontrolliert wird. Die Verschiebungen in x , y , z stehen dabei für großräumige Bewegungen zur Verfügung, während die rotatorischen Freiheitsgrade φ_x , φ_y , φ_z als Nullpunkt-Regelung betrieben werden.

www.imms.de/
nm drives

Gegenüber der rein planaren Positionierung ermöglicht die Vertikalverstellung einen entscheidend erweiterten Funktionsumfang des entstehenden Gesamtsystems:

- Kompensation von Führungsabweichungen in z , φ_x , φ_y
- Antastung von 3D-Objekten, geneigten Oberflächen und makroskopischen Stufenhöhen
- Anwendungen mit vertikaler Verschiebung, z. B. Fokusvariationen in der Interferometrie oder Konturfolge bei optischer oder mechanischer Antastung
- Ein-/Ausladen des Messobjekts ohne Demontage des Antast- oder Manipulationstools.
- Vertikalverstellung durch überaktuierte Hubmodule mit aerostatischer Führung

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, beruht das NPS6D200 auf einem Planarantrieb in dreieckiger Grundkonfiguration und drei Hubmodulen (Lifting and Actuating Units, LAU25), welche den Vertikaltrieb wie auch die aerostatische Führung realisieren. Der integrierte Direktantrieb zur Steuerung der planaren Bewegung bildet sich aus drei Linearaktoren in einer 120°-Anordnung, wobei jede Einheit aus stationären Flachspulen und einem mitbewegten Magnetarray besteht. Die drei Aktoren gemeinsam erzeugen die Antriebskraft in der xy-Ebene sowie das Drehmoment zur Adressierung der Rotation um die Hochachse φ_z . Zur präzisen vertikalen Bewegung des Quarzläufers sind drei Hubmodule (LAU25) an den Ecken des Dreiecks platziert und bewirken in Kombination die Verschiebung in z-Richtung und die Verkipfung in den rotatorischen Freiheitsgraden φ_x und φ_y .

Jedes LAU25-Modul vereint dabei mehrere Funktionen in einer kompakten, integrierten Bauform:

- dynamischer Antrieb mit hoher Bandbreite mittels Voice-Coil-Aktor,
- quasistatischer pneumatischer Aktor zur Gewichtskompensation,
- aerostatische Führung für reibungsfreie Bewegung,
- internes optisches Encodermesssystem zur Initialisierung.

Herzstück der Hubmodule ist ein pneumatischer Aktor, der niedrigfrequente Vertikalkräfte primär zur Gewichtskraftkompensation erzeugt. Hierzu wird der Druck in einer berührungsfrei abgedichteten Druckkammer, siehe Abbildung 3, individuell und hochgenau geregelt. Die kontaktlose Spaltdichtung der Druckkammer ist in die Gestalt der vertikalen Luftführung integriert, so dass Reibung als Störungsquelle konsequent vermieden und der Störungseintrag in das System minimiert wird. Während

www.imms.de/
nmdrives

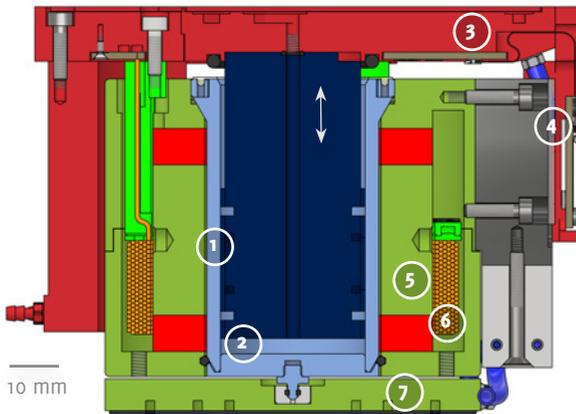


Abbildung 3:

Hubmodul LAU25 in der Schnittansicht: (1) vertikale aerostatische Buchsenführung; (2) Druckkammer der pneumatischen Gewichtsentlastung; (3) vertikal bewegtes Teil (Schnittstelle zum Läufer); (4) Encodermesssystem; (5) Voice-Coil-Aktor, Feldteil; (6) Voice-Coil-Aktor, Spulenteil (bewegt); (7) planares Luftlager.

Grafik: IMMS.

der Pneumatikaktor die statische Last trägt, erzeugt ein konzentrisch angeordneter und parallel wirkender Voice-Coil-Aktor die für die hochgenaue Regelung benötigten dynamischen Kräfte. Im Ergebnis kann durch die Hubmodule das Eigengewicht des Läufers ohne nennenswerten Leistungsumsatz in den Voice-Coil-Aktoren getragen und gleichzeitig seine Vertikalposition sehr feinfühlig verstellt werden.

Rein kraftgekoppelte Läuferführung durch 6D-Regelung

Der Läufer aus Quarzglas stellt nicht nur das bewegte Teil des Antriebssystems dar, sondern beinhaltet auch die Reflektoren für die hochaufgelöste Weg- und Winkelmessung über Laserinterferometer und einen 2D-Autokollimator. Die Maschinenmetrologie ist dabei definiert durch die Anordnung der Reflektoren (am Läufer) und der Messköpfe (am Stator). Die Closed-Loop-Regelung der Läuferposition auf Basis dieser 6DOF-Messung bewirkt, dass die Ablaufeigenschaften der verschiedenen Luftführungen nicht als Positionierfehler wirksam werden und die Genauigkeit der Läuferbewegung lediglich durch die Maschinenmetrologie und die erreichbare Regelungsperformance bestimmt wird.

Kenndaten des NPS6D200-Systems im Überblick:

– xyz-Bewegungsbereich: $\varnothing 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$	– xyz-Messauflösung: 20 pm	www.imms.de/
– xy-Geschwindigkeit: 50 mm/s	– bewegte Masse: 36 kg	nmdrives
– z-Geschwindigkeit: 2 mm/s	– Nutzlast: 5 kg	
– Beschleunigung: 250 mm/s ²		

3D-Nanopositionierung im Punkt-zu-Punkt-Betrieb und auf Trajektorien

Beim Betrieb mit konstantem Sollwert erreicht das NPS6D200 eine RMS-Regelabweichung von weniger als 1 nm in allen drei Achsrichtungen, siehe Abbildung 4. Diese Closed-Loop-Performance wird einerseits durch konsequente Umsetzung des Direktantriebsprinzips, die Vermeidung intern generierter Störeinflüsse und nicht zuletzt auch durch eine speziell entwickelte 6D-Regelung des überaktuierten Gesamtsystems ermöglicht. Eine Positionierung mit Schrittweiten auf Nanometer-Level ist dadurch ebenso möglich wie auch die gleichzeitige und synchronisierte Bewegung

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

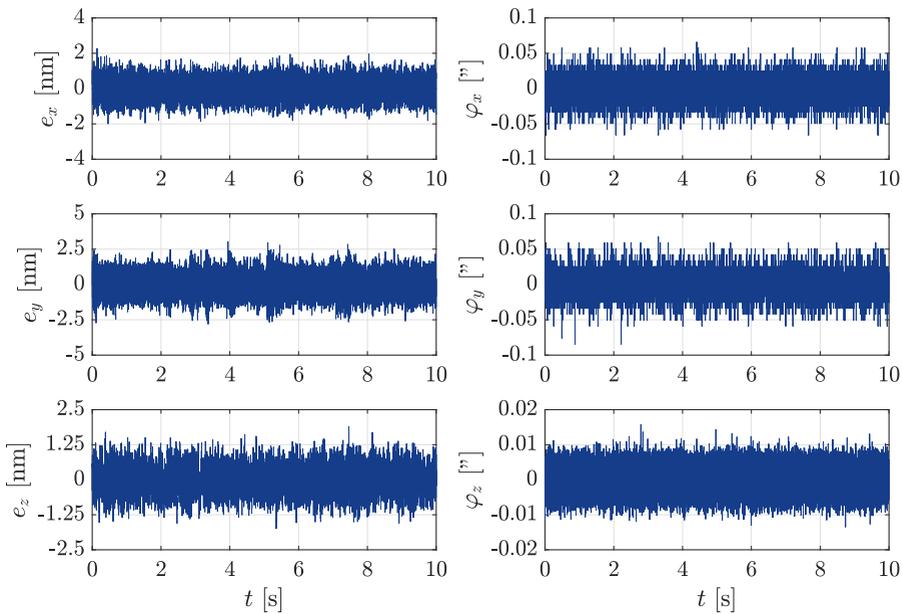


Abbildung 4: Positionszeitsignal im geregelten Betrieb mit konstantem Sollwert. Die RMS-Regelabweichung beträgt $e_x = 0,47$ nm, $e_y = 0,68$ nm, $e_z = 0,41$ nm (Abbildung links) sowie $e_{\varphi_x} = 11,21$ m", $e_{\varphi_y} = 9,83$ m", $e_{\varphi_z} = 3,03$ m" (Abbildung rechts). Grafik: IMMS.

in allen drei Achsen entlang komplexer 3D-Trajektion mit Nanometerpräzision. Bei skalenerübergreifenden Helixtests mit Abmessungen von 40 Nanometern bis hin zu 40 Millimetern werden Bahnabweichungen im niedrigen einstelligen Nanometerbereich erreicht – Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Verlauf der Läuferposition bei einer $\varnothing 40$ nm x 20 nm Helix. Gleichzeitig ist trotz der hohen bewegten Masse nur eine

www.imms.de/
nmdrives

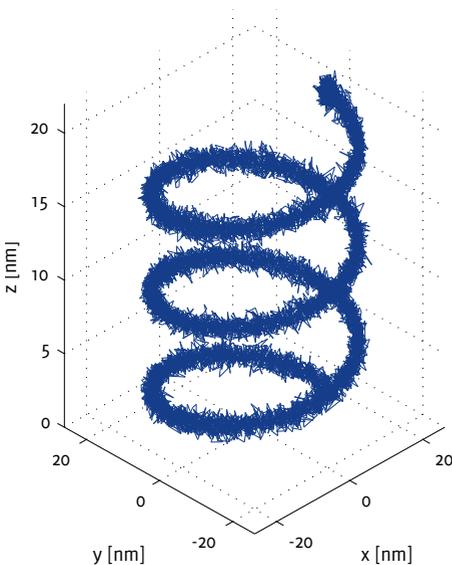


Abbildung 5:

Positionsmesssignal einer
3D-Trajektorie, Helix:
 $\varnothing 40$ nm x 20 nm (Höhe),

RMS-Bahnfehler dabei:

$e_x = 0,71$ nm,
 $e_y = 0,88$ nm,
 $e_z = 0,39$ nm.

Grafik: IMMS.

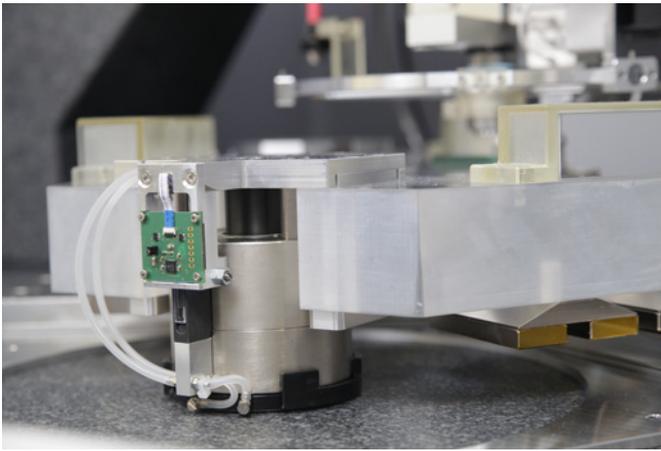


Abbildung 6:

Eines der drei im NPS6D200 integrierten LAU25-Hubmodule für vertikale Bewegungen bis 25 mm.

Foto: IMMS.

sehr geringe Stromaufnahme von wenigen Milliampere bei den Vertikalaktoren zu beobachten. Dieses Positioniervermögen demonstriert die Eignung des NPS6D200 für Nanopositionieraufgaben in großen 3D-Arbeitsbereichen, bei gleichzeitig sehr geringer Wärmeentwicklung und einem minimiertem Störeintrag in das Messvolumen. Mit dieser Kombination empfiehlt sich das System als Positionierplattform für Nanotechnologie-Anwendungen, die einerseits eine derart präzise Positionskontrolle zwischen Tool und Substrat bis zur Wafergröße erfordern und andererseits auf einen minimierten Störeintrag in den Interaktionsbereich angewiesen sind, beispielsweise die waferbasierte Inspektion, long-range AFM-Scans oder die sub-10-nm-Fabrikation.

www.imms.de/
nmdrives

Kontakt: Steffen Hesse, steffen.hesse@imms.de

Freistaat
Thüringen



Gefördert durch

DFG Deutsche
 Forschungsgemeinschaft

Teile der präsentierten Arbeiten entstanden in der internen Forschungsgruppe NextGenPos und dem Graduiertenkolleg NanoFab. Die interne Forschungsgruppe „Next Generation Positioning“ (NextGenPos) wurde 2024 durch den Freistaat Thüringen gefördert. Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ (NanoFab) wurde 2024 unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

www.imms.de/
nanofab