

New generation of lifting modules
for the vertical nano-positioning
with a travel range of up to 25 mm

At IMMS, new lifting modules for up to 15 kg load capacity and 25 mm stroke each have been developed and integrated into a 6D drive system as vertical nanopositioners that combine a practically powerless carrying of the payload with nanometre positioning capability. Photograph: IMMS.

Introduction and motivation

For positioning systems with nanometre positioning accuracy, there has been a steadily growing number of applications in recent years. In semiconductor manufacturing and many related high-tech areas, positioning resolution in the sub-nanometre range is now being sought. Also, in the precision manufacturing of mechanical components, optical inspection, or in the qualification of sensor systems, the requirements are increasingly shifting from a few tens of nanometres to the lower nanometre range. Compared to the lateral movement of the object, vertical positioning once again takes on a special role, since here the quite considerable moving mass must be carried permanently, but as far as possible without heat emission. At IMMS, new lifting modules for up to 15 kg load capacity and 25 mm stroke each have been developed and integrated as vertical nano-positioners into a 6D drive system, combining practically powerless carrying of the payload with nanometre positioning capability.

[www.imms.de/
k4pnpz](http://www.imms.de/k4pnpz)

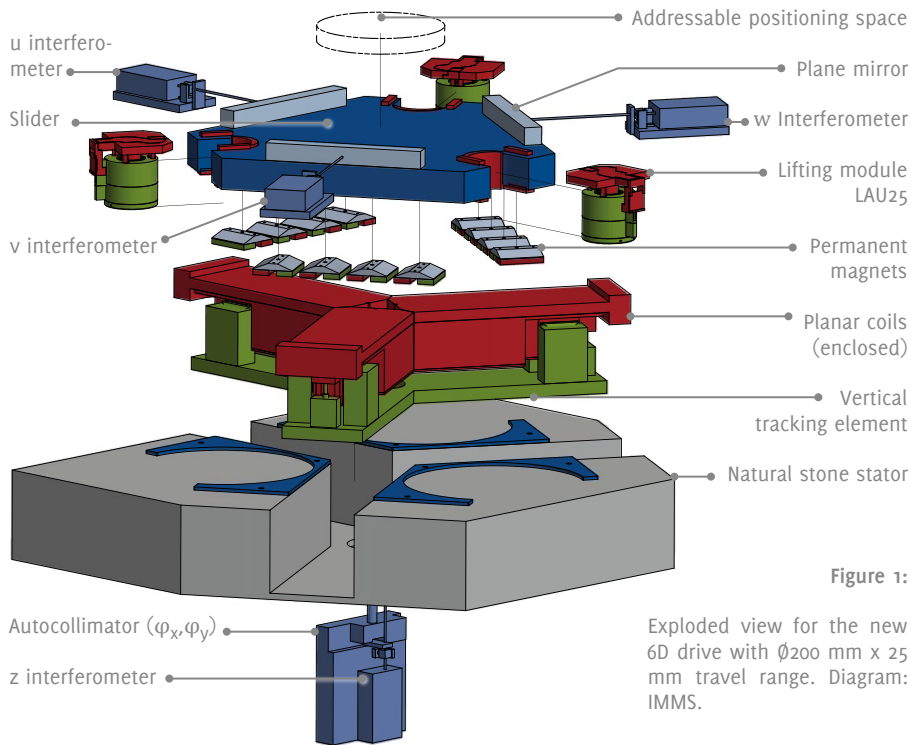


Figure 1:

Exploded view for the new 6D drive with $\varnothing 200$ mm x 25 mm travel range. Diagram: IMMS.

> Integrated sensor systems
 > Distributed measurement + test systems
 > Mag6D nm direct drives
 > Contents
 * Funding

6D direct drives for even greater travel ranges

In current research work, IMMS is realising a novel nano-positioning system with a drastically increased working range compared to *previous drives*. The planar range of motion grows to $\varnothing 200$ mm, while the available vertical stroke increases from formerly 10 to 25 mm. This creates a 6D drive system that can position even larger objects, such as wafers, masks, or optical lenses, with high precision in space as part of a fabrication or inspection application in the three spatial axes and the respective rotation around these axes.

Figure 1 and figure 2 show the realised nano-positioning system: The moving object, the slider, is a large central body made of quartz glass with lateral mirror surfaces. The position of the slider is measured in all six degrees of freedom by laser interferometers and autocollimators without contact and with nanometre precision. Permanent magnets are mounted on the underside of the slider, to which the horizontal drive forces can be applied by planar coils. By a star-shaped arrangement of these drive units, the slider can be positioned contactless and field-guided in the xy-plane. For vertical positioning in the z-direction, a new generation of lifting modules

www.imms.de/
 inpos

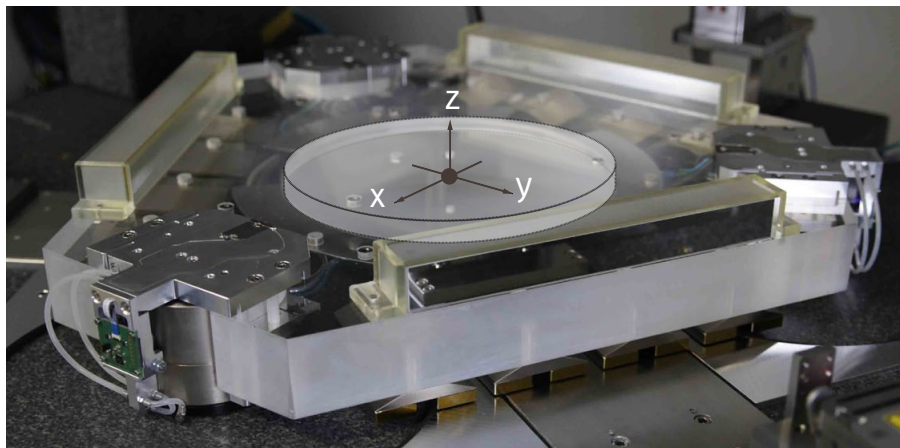


Figure 2: Photograph of the constructed drive system; the addressable positioning space is marked accordingly. Photograph: IMMS.

has been developed, which are placed at the three corner points of the slider, where they allow frictionless planar guidance of the slider and at the same time its sensitive vertical adjustment, too. In this way, the z-position and the angular positions of the slider are adjusted with high precision by the three lifting modules. In addition, for large vertical strokes, the planar drive coils follow the slider movement to maintain its efficiency over the entire stroke by keeping the air gap constant. In addition to the integrated planar drive system, the specially developed lifting modules represent the core functional components of this 6D drive concept. The integration of several functions (carrying, guiding, driving, measuring) in a highly integrated and compact design enables the step from a planar system (3D) to a controlled 6D positioning of the slider.

Novel lifting modules for increased load and stroke

The design know-how for the new generation of lifting modules is based on many years of IMMS' research activity in this field and a development guide that has emerged from this. This enables a fast and targeted design of the positioning modules for new stroke and load specifications and changed boundary conditions. For the present concept, the rotor mass of approximately 40 kg and the payload of 5 kg are distributed nearly equally over all three lifting modules, so that each is loaded with approximately 150 N. Along with the increased load and the longer stroke, a larger installation space (approximately \varnothing 85 mm x 90 mm) is also available compared with earlier applications. This allows better adaptation of the included actuator elements to the load situation and better integration of the other functional components.

www.imms.de/

nm drives

The core elements of each lifting module are the two actuators working in parallel: A pneumatic cylinder primarily and quasi-statically compensates the weight force and an electromagnetic actuator generates the precise and dynamic positioning forces. The pneumatic actuator is located concentrically inside the electromagnetic actuator. As a result, both actuator forces are on the same effective axis, thus an extremely compact design is possible.

In the first step of the new design, the pneumatic weight compensation is adapted to the load to be supported and the frictionless vertical guide is structurally integrated into it. The design and production of the air bearing components is carried out here together with IMMS' long-standing development partner, the air bearing specialist AeroLas. The surrounding design space is divided among the components of the electromagnetic drive using an optimisation algorithm and finite element magnetic field simulations contained therein. The goal of the optimisation is to minimise the heat input during operation to keep thermal disturbances to the machine metrology low. The result of the simulations in Figure 3 shows the final geometry of the coil, the back iron parts (Fe) and the permanent magnets (M). This dimensioning results in the magnetic field lines penetrating the range of motion of the coil (white frame) very uniformly.

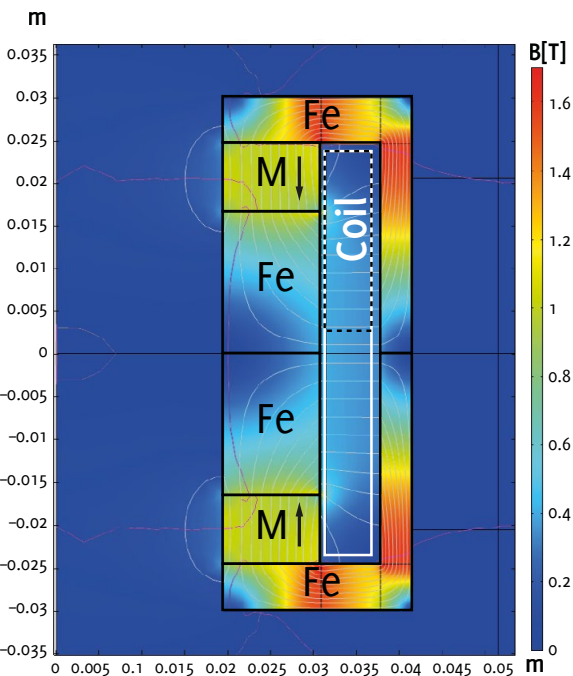


Figure 3:

Magnet field simulation
(M: magnet, Fe: back iron,
white frame: travel range of
the coil, coil exemplarily at
the upper end of the travel
range).

Diagram: IMMS.

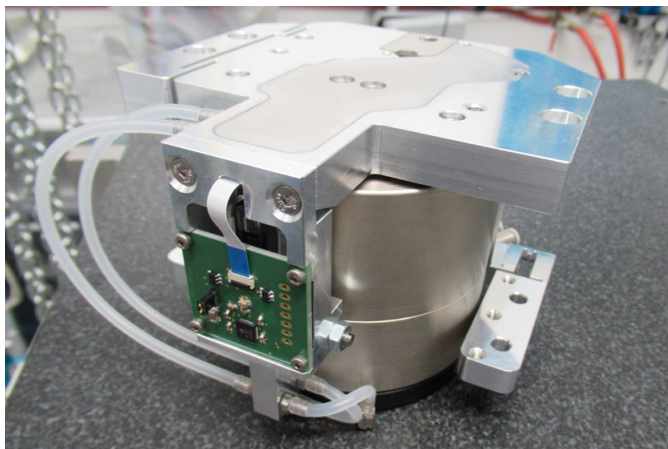


Figure 4:

Assembled lifting unit for 25 mm travel range and 15 kg load capacity.

Photograph: IMMS.

In addition to the pneumatic and electromagnetic design, the electrical and pneumatic supply and return lines are largely relocated to the inside of the mechanical system and merged to a single interface during the design process. When the lifting modules are mounted on the slider, all the necessary supply lines are connected via this universal interface.

Implementation and validation of the lifting modules as vertical nano-positioners

Mounted on the slider and implemented in the control periphery, the three lifting modules are able to position the slider vertically (z-direction) and in the two tilting axes (r_x , r_y). Figure 5 shows the first results for the control deviation at constant

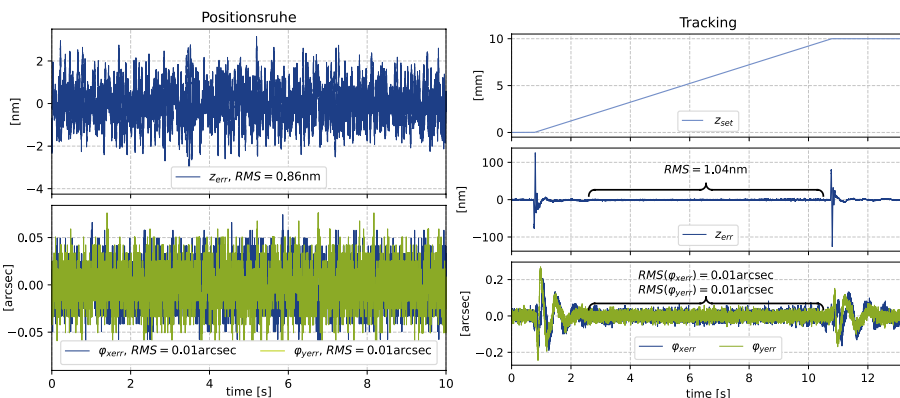


Figure 5: Measurement results for the vertically controlled operation with three lifting modules attached to the slider. Left panel: control deviation of the vertical position (z_{err}) and two tilting angles (φ_{xerr} , φ_{yerr}) at constant setpoint; Right panel: target trajectory and related control deviation while traversing a trajectory. Diagrams: IMMS.

target position (left panel) as well as during the traversing of a target trajectory increasing in z-direction (right panel). During standstill at a target position, the control deviations of the vertical position (z_{err}) and the tilt angles (φ_{xerr} , φ_{yerr}) are very small. The root mean square (RMS) of these error signals is only 0.86 nm and 0.01 arc seconds, respectively. During vertical motion from 0 to 10 mm with constant velocity (Figure 5, right panel), the RMS value of the z-control deviation increases only marginally to 1.04 nm. Only in acceleration and braking phases appreciable deviations from the nominal trajectory occur, which are smaller than 150 nm in the current configuration and can be further reduced by additional control measures (feedforward control, jerk limitation, etc.).

Progressive development towards a 6D nano-positioning system

Right off, nanometre-level position control was achieved with the newly developed vertical drives. This confirms the chosen design approach and the suitability of the integrated solution found as a combined drive and guide element for vertical nano-positioning. At the same time, this work also further extended and refined the development guide for the design and optimisation of such vertical actuators and added a successfully realised design variant for 25 mm stroke.

The lifting modules and the partial results already achieved with them are thus an important intermediate step on the way to commissioning the complete system controlled in 6D.

Such a 6D nano-positioning system, with its large planar and vertical travel range, thus represents an excellent basis for the implementation of high-tech probing or manipulation systems, such as atomic force microscopy, and opens up completely new application scenarios for such high-tech applications.

Contact person: Dr.-Ing. Ludwig Herzog, ludwig.herzog@imms.de

www.imms.de/nmdrives

www.imms.de/mechatronics

Supported by:



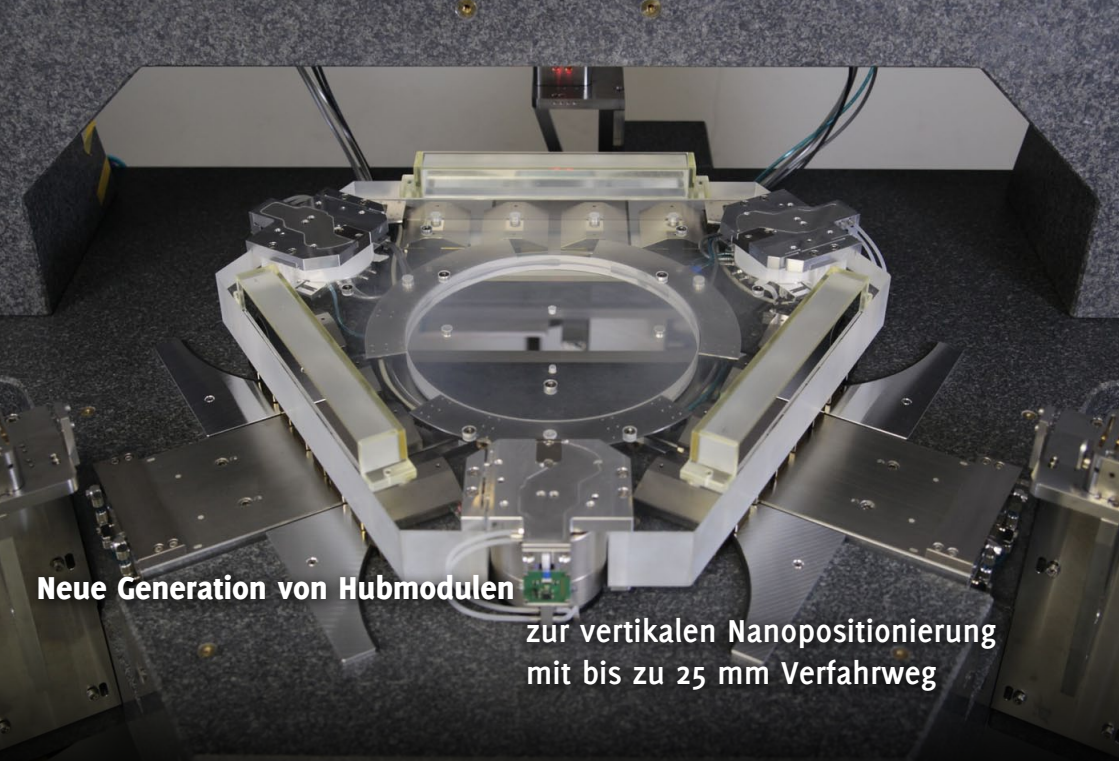
Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



on the basis of a decision
by the German Bundestag

The K4PNP+Z project is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) / Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) as part of the "Central Innovation Programme for SMEs (ZIM)" under the reference ZF4085714J09.

www.imms.de/k4pnpz



Neue Generation von Hubmodulen

zur vertikalen Nanopositionierung
mit bis zu 25 mm Verfahrweg

Am IMMS wurden neue Hubmodule für jeweils bis zu 15 kg Tragfähigkeit und 25 mm Hub entwickelt und als vertikale Nanopositionierer in ein 6D-Antriebssystem integriert, die ein praktisch leistungsloses Tragen der Nutzlast mit einer Nanometer-Positionierfähigkeit kombinieren. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Für Positioniersysteme mit Nanometer-Positioniergenauigkeit gibt es in den letzten Jahren eine stetig wachsende Zahl von Anwendungen. In der Halbleiterfertigung und vielen damit verbundenen Hochtechnologiebereichen wird mittlerweile eine Positionierauflösung im Sub-Nanometerbereich angestrebt. Aber auch in der Präzisionsfertigung mechanischer Komponenten, der Optikinspektion oder bei der Qualifizierung von Sensorsystemen verschieben sich die Anforderungen von einigen zehn Nanometern zunehmend in den unteren Nanometerbereich. Gegenüber der lateralen Bewegung des Objekts nimmt dabei die Vertikalpositionierung noch einmal eine besondere Rolle ein, da hier die mitunter beachtliche bewegte Masse permanent, jedoch möglichst ohne Wärmeemission zu tragen ist. Am IMMS wurden neue Hubmodule für jeweils bis zu 15 kg Tragfähigkeit und 25 mm Hub entwickelt und als vertikale Nanopositionierer in ein 6D-Antriebssystem integriert, die ein praktisch leistungsloses Tragen der Nutzlast mit einer Nanometer-Positionierfähigkeit kombinieren.

[www.imms.de/
k4pnpz](http://www.imms.de/k4pnpz)

Jahresbericht

© IMMS 2022

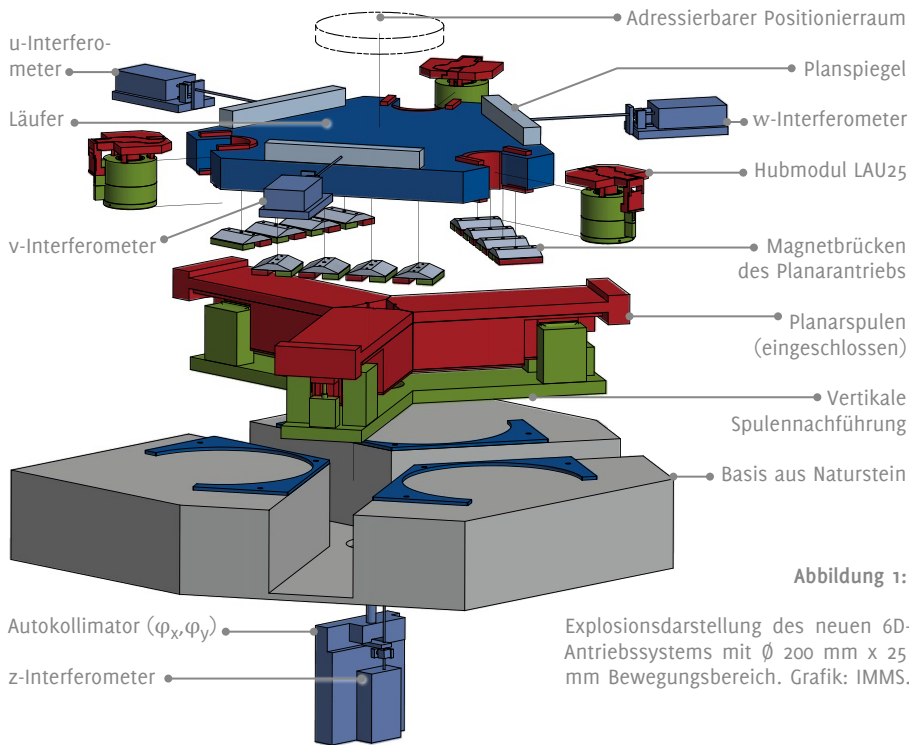


Abbildung 1:

Explosionsdarstellung des neuen 6D-Antriebssystems mit \varnothing 200 mm x 25 mm Bewegungsbereich. Grafik: IMMS.

6D-Direktantrieb für noch größere Stellbereiche

In aktuellen Forschungsarbeiten realisiert das IMMS ein neuartiges Nanopositioniersystem mit einem gegenüber früheren Antrieben drastisch vergrößertem Arbeitsbereich. Der planare Bewegungsbereich wächst auf \varnothing 200 mm, während der verfügbare vertikale Hub von ehemals 10 auf 25 mm ansteigt. Damit entsteht ein 6D-Antriebssystem, welches noch größere Objekte, wie beispielsweise Wafer, Masken oder Optiklinsen, als Teil einer Fabrikations- oder Inspektionsanwendung in den drei Raumachsen und der jeweiligen Rotation um diese Achsen hochpräzise im Raum positionieren kann.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen das realisierte Nanopositioniersystem: Das bewegte Objekt, der Läufer, ist ein großer zentraler Körper aus Quarzglas mit seitlichen Spiegelflächen. Die Position des Läufers wird in allen 6 Freiheitsgraden über Laserinterferometer und Autokollimatoren kontaktlos und nanometergenau gemessen. Läuferunterseitig sind Dauermagnete montiert, auf welche durch Planarspulen die horizontalen Antriebskräfte aufgebracht werden können. Durch eine sternförmige Anordnung dieser Antriebseinheiten kann der Läufer kontaktlos und feldgeführt in

www.imms.de/
inpos

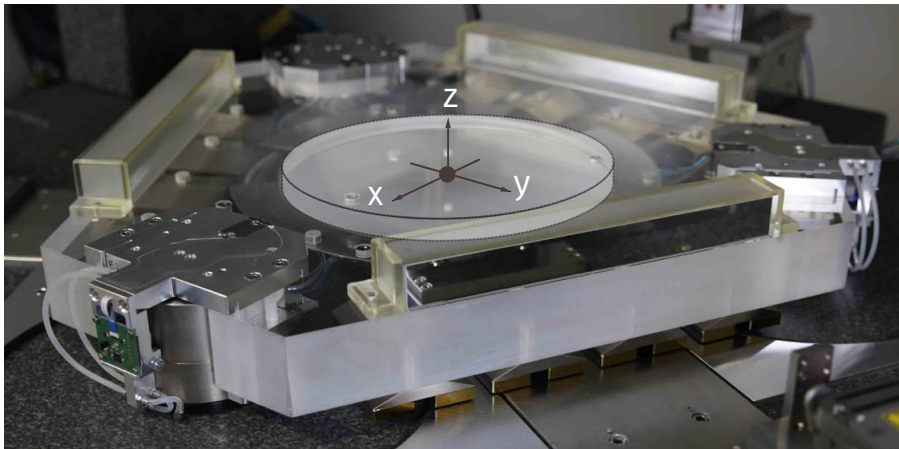


Abbildung 2: Foto des aufgebauten Antriebssystems; der adressierbare Positionierraum ist entsprechend markiert. Foto: IMMS.

der xy-Ebene positioniert werden. Für die vertikale Positionierung in z-Richtung wurde eine neue Generation von Hubmodulen entwickelt, welche an den drei Eckpunkten des Läufers platziert sind und dort jeweils die reibungsfreie planare Führung des Läufers und gleichzeitig auch seine feinfühlig vertikale Verstellung ermöglichen. Auf diese Weise werden die z-Position und die Winkellage des Läufers hochpräzise durch die drei Hubmodule eingestellt. Bei großem vertikalem Hub werden zudem die planaren Antriebsspulen der Läuferbewegung nachgeführt, um deren Effizienz über den gesamten Hub durch Konstanthalten des Luftspaltes beizubehalten. Neben dem integrierten planaren Antriebssystem stellen die eigens entwickelten Hubmodule die funktionellen Kernkomponenten dieses 6D-Antriebskonzeptes dar. Die Integration mehrerer Funktionen (Tragen, Führen, Antreiben, Messen) in eine hochintegrierte und kompakte Bauform ermöglicht den Schritt vom planaren System (3D) zu einer geregelten 6D-Positionierung des Läufers.

Neue Hubmodule für mehr Last und mehr Hub

Das Entwurfs-Know-how für die neue Generation der Hubmodule basiert auf der langjährigen Forschungstätigkeit des IMMS auf diesem Gebiet und einem daraus entstandenen Entwicklungsleitfaden. Dieser ermöglicht einen schnellen und zielgerichteten Entwurf der Positioniermodule für neue Hub- und Lastspezifikationen und geänderte Randbedingungen. Für das vorliegende Konzept verteilen sich die Läufermasse von ca. 40 kg und die Nutzlast von 5 kg auf alle drei Hubmodule in etwa gleich, sodass jedes mit ca. 150 N belastet wird. Einhergehend mit der gestiegenen Last und dem größeren Hub steht gegenüber früheren Anwendungen auch ein größerer Bauraum (ca. $\varnothing 85$ mm x 90 mm) zur Verfügung. Dies erlaubt eine bessere

www.imms.de/

nmdrives

Jahresbericht

© IMMS 2022

Anpassung der enthaltenen Aktorelemente an die Lastsituation und eine bessere Integration der anderen Funktionskomponenten.

Kernelemente eines jeden Hubmoduls sind die zwei parallel arbeitenden Aktoren: Ein pneumatischer Zylinder kompensiert primär und quasistatisch die Gewichtskraft und ein elektromagnetischer Aktor erzeugt die präzisen und dynamischen Stellkräfte zur Positionierung. Der Pneumatik-Aktor sitzt dabei konzentrisch im Inneren des elektromagnetischen Aktors. Dadurch liegen beide Aktorkräfte auf derselben Wirkachse und eine äußerst kompakte Bauform wird ermöglicht.

Im ersten Schritt des neuen Entwurfs wird die pneumatische Gewichtskraftkompensation an die zu tragende Last angepasst und die reibungsfreie Vertikalführung konstruktiv darin integriert. Die Auslegung und Fertigung der Luftlagerkomponenten erfolgt hier gemeinsam mit dem langjährigen Entwicklungspartner, dem Luftlager-spezialisten AeroLas. Der umliegende Bauraum wird durch einen Optimierungsalgorithmus und darin enthaltene Finite-Elemente-Magnetfeldsimulationen auf die Komponenten des elektromagnetischen Antriebs aufgeteilt. Ziel der Optimierung ist es, die Abwärme im Betrieb auf ein Minimum zu begrenzen, um thermische Störungen der Maschinenmetrologie gering zu halten. Das Ergebnis der Simulationen in Abbildung 3 zeigt die finale Geometrie der Spule (Coil), der Eisenrückschlussteile (Fe) und der Dauermagnete (M). Diese Dimensionierung führt dazu, dass die Magnetfeldlinien den Bewegungsbereich der Spule (weißer Rahmen) sehr gleichmäßig durchdringen.

m

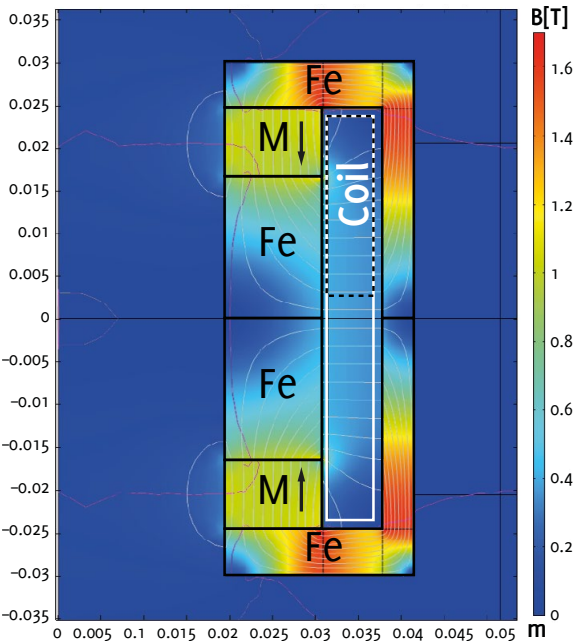


Abbildung 3:

Magnetische Feldsimulation (M: Magnet, Fe: Eisenrückschluss, weißer Rahmen: Bewegungsbereich der Spule, Coil: Spule beispielhaft am oberen Ende des Bewegungsbereichs)

Diagramm: IMMS.

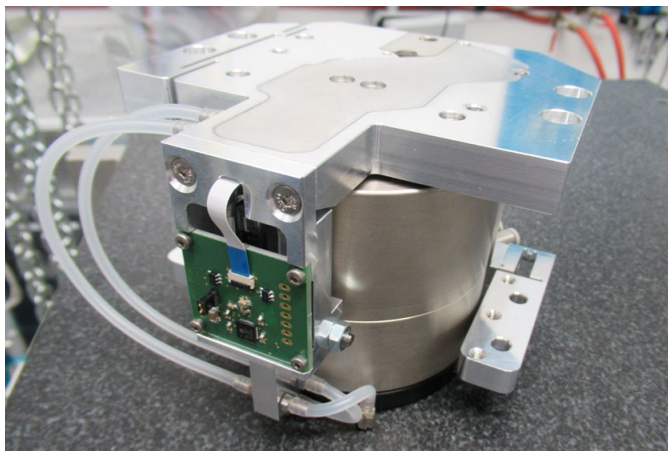


Abbildung 4:

Fertig montiertes
Hubmodul für 25
mm Hub und 15 kg
Traglast.

Foto: IMMS.

Neben der pneumatischen und elektromagnetischen Auslegung werden im Zuge der Konstruktion die elektrischen und pneumatischen Zu- und Ableitungen weitgehend in das Innere der Mechanik verlegt und auf eine einzige Schnittstelle zusammengeführt. Bei der Montage der Hubmodule am Läufer werden über diese universelle Schnittstelle sämtliche benötigten Versorgungsleitungen verbunden.

Implementierung und Validierung der Hubmodule als vertikale Nanopositionierer

Am Läufer montiert und in die Steuerungsperipherie implementiert sind die drei Hubmodule in der Lage, den Läufer vertikal (z-Richtung) und in den zwei Kippachsen (r_x , r_y) zu positionieren. Abbildung 5 zeigt die ersten Ergebnisse für die Regelabweichung bei konstanter Sollposition (links) wie auch während des Abfahrens einer in z-Richtung ansteigenden Soll-Trajektorie (rechts).

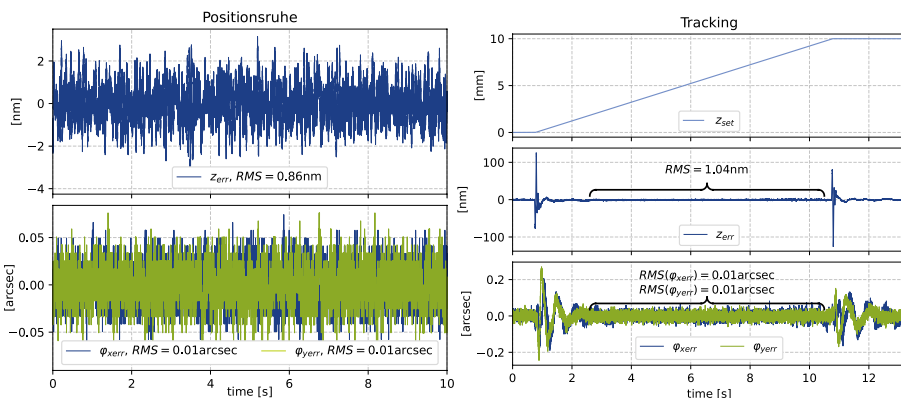


Abbildung 5: Messergebnisse für den vertikal geregelten Betrieb mit drei Hubmodulen am Läufer. links: Regelabweichung der Vertikalposition (z_{err}) und zwei Kippwinkel (φ_{xerr} , φ_{yerr}) bei konstantem Sollwert; rechts: Soll-Trajektorie und zugehörige Regelabweichungen beim Abfahren einer Trajektorie. Diagramme: IMMS.

Während des Stillstands an einer Sollposition sind die Regelabweichungen der Vertikalposition (z_{err}) und der Kippwinkel (φ_{xerr} , φ_{yerr}) sehr gering. Der quadratische Mittelwert (RMS) dieser Fehlersignale liegt bei nur 0,86 nm bzw. 0,01 Bogensekunden. Während der Vertikalbewegung von 0 bis 10 mm mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 5 rechts) steigt der RMS-Wert der z-Regelabweichung nur marginal auf 1,04 nm an. Lediglich in Beschleunigungs- und Bremsphasen treten nennenswerte Abweichungen von der Solltrajektorie auf, welche in der derzeitigen Konfiguration kleiner als 150 nm sind und durch zusätzliche regelungstechnische Maßnahmen (Vorsteuerung, Ruckbegrenzung, etc.) weiter reduziert werden können.

Fortschreitende Entwicklung hin zu einem 6D-Nanopositioniersystem

Auf Antrieb konnte mit den neu entwickelten Vertikalantrieben eine Positionskontrolle auf Nanometer-Level erreicht werden. Dies bestätigt den gewählten Design-Ansatz und die Eignung der gefundenen integrierten Lösung als kombiniertes Antriebs- und Führungselement zur vertikalen Nanopositionierung. Gleichzeitig wurde mit diesen Arbeiten auch der Entwicklungsleitfaden zur Auslegung und Optimierung derartiger Vertikalaktoren weiter ausgebaut, verfeinert und um eine erfolgreich realisierte Designvariante für 25 mm Hub ergänzt.

Die Hubmodule und die bereits damit erzielten Teilergebnisse sind somit ein wichtiger Zwischenschritt auf dem Weg zur Inbetriebnahme des in 6D geregelten Gesamtsystems.

Ein solches 6D-Nanopositioniersystem stellt mit dem großen planaren und vertikalen Verfahrbereich somit eine ausgezeichnete Basis für die Implementierung von High-Tech-Antast- oder Manipulationssystemen, wie beispielsweise Atomkraftmikroskopie, dar und eröffnet ganz neue Einsatzszenarien für derartige High-Tech-Applikationen.

Kontakt: Dr.-Ing. Ludwig Herzog, ludwig.herzog@imms.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Projekt K4PNP+Z wurde unter dem Kennzeichen ZF4085714J09 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

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

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

[www.imms.de/
k4pnpz](http://www.imms.de/k4pnpz)