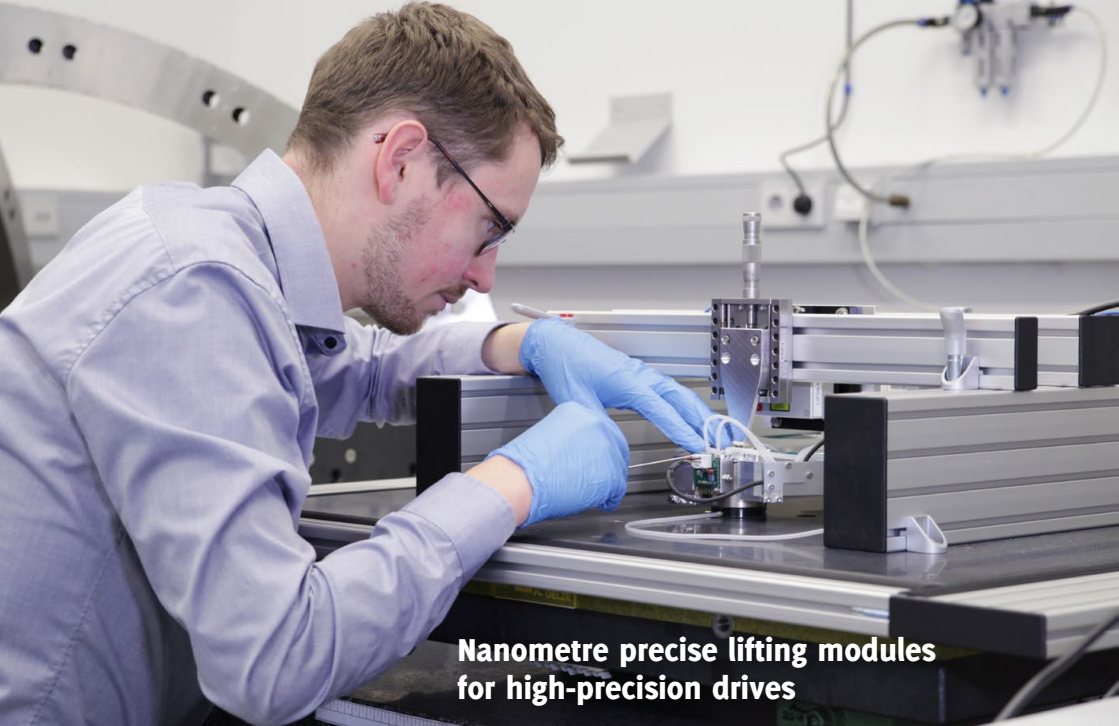




Nanometre precise lifting modules for high-precision drives

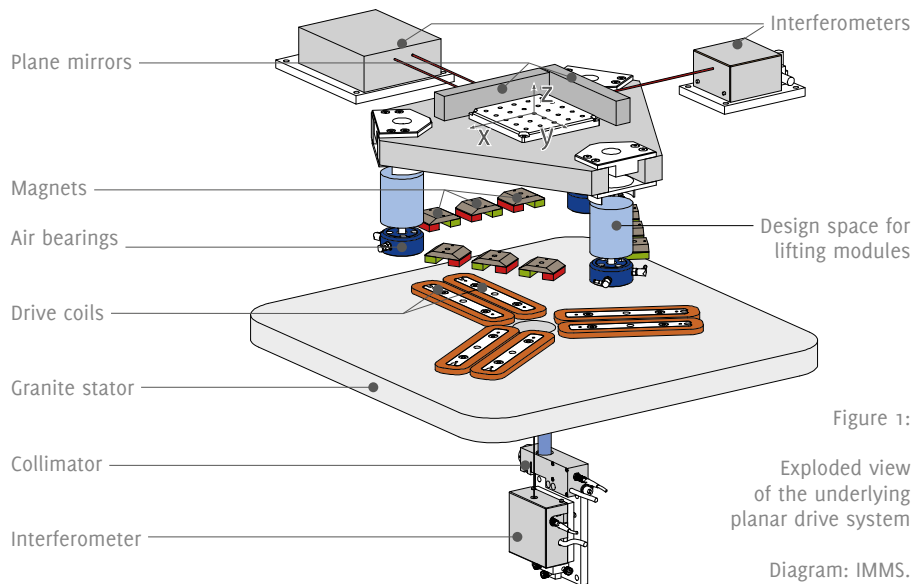
The lifting modules developed at IMMS operate in a travel range of 10 mm with an accuracy of up to 0.29 nm (standard deviation) and are optimised for use in manufacturing and metrology with an average heat dissipation of 54 nW. Photo: IMMS.

Motivation and overview

Positioning systems in semiconductor manufacturing and high-precision metrology need to move with increasing precision to cope with advancing miniaturisation. Increasingly larger vertical positioning ranges are required for new manufacturing processes. Therefore, IMMS has already developed a 6D direct drive that positions objects freely in space with nanometre precision in a planar range of $\varnothing 100$ mm and a lifting range of 10 mm. The newly improved lifting modules optimise the system for the use in manufacturing and metrology, thanks to their 75 % lower heat output. The developed design flow for large travel ranges is the basis for even more efficient and application-specific designs.

The basis for the redesign

Together with its partners, IMMS develops and implements precision drives for nanometre-precise positioning in travel ranges of 100 mm and more. By integrating



in-house developed lifting modules, not only planar positioning in the xy-plane is possible but also movement in the z-direction, for example over 10 mm.¹

A newly developed design process is the basis for the optimised enhancement of these highly integrated lifting modules, enabling efficient and rapid design for future lifting-load combinations. For the redesign of the lifting modules, the underlying planar drive system (Figure 1) was considered holistically. It is based on a monolithic central body (slider), which sits on three air bearings allowing a frictionless motion in the xy-plane.

Utilizing 4 laser interferometers, an autocollimator and plane mirrors integrated into the slider, it is possible to determine its position and orientation in space. Fixed coils generate forces on NdFeB magnets on the underside of the slider, allowing it to be moved precisely in the x- and y-directions. Additional guidings and actuators are introduced between the air bearings and the corners of the central body to allow a 10 mm z-stroke of the slider and to eliminate the remaining errors in the tilt angles φ_x and φ_y . With this arrangement, only minimal modifications of the slider are necessary and it is possible to use 3 identical modules on which the sliders mass of approx. 12 kg is evenly distributed.

Physical effects that are negligible in classical mechanical engineering can have a considerable influence on the achievable accuracy in precision metrology. In order to meet all requirements, a suitable constructive development process is essential. Here, the design principles from precision engineering (separation of functions) are harmonised with those from mechatronics (integration of functions). This applies in particular to the two functional core components: the vertical drive and the vertical guide.

The new lifting module should be capable to lift 4 kg over 10 mm with nanometre accuracy and stick-slip-free. The available design space is only about $\varnothing$ 50 mm x 60 mm. Special emphasis is put on the generated heat during operation: It should be minimised, since any heating results in thermal expansion and thus loss of precision. In addition, the drive and guide should be designed in such a way that they can be easily scaled up for larger loads and travel ranges. An analysis of suitable drive principles (pneumatic, piezoelectric, electromagnetic) has shown that none alone meets all requirements adequately.

A modification of the coarse drive/fine drive principle yields a suitable solution: A first actuator significantly compensates the weight force, thus a second actuator only needs to create very small forces to enable precision positioning. A pneumatic cylinder is especially suitable as a weight force compensation, as it has a high force density, does not locally introduce heat into the system and can be adjusted to different loads via the pressure. A pneumatic cylinder is particularly suitable for weight force compensation, as it has a high force density, does not introduce any heat into the system locally and can be adapted to different loads via the pressure. The remaining low but highly dynamic precision forces can then be achieved by an optimally shaped electromagnetic actuator. Furthermore, both actuator principles can be adapted very well to larger strokes and loads.

Aerostatic guidings are especially suitable as a frictionless guiding system. They can be integrated very well into the pneumatic cylinder without compromising on functionality.

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

Modelling the actuators is the central step in the design process. With the help of these models, conclusions can be drawn about the static and dynamic behaviour as well as the air consumption of the pneumatic cylinder. Thus, the piston-cylinder combination with a frictionless seal was ideally adapted to the requirements and the existing infrastructure.

The design of the electromagnetic actuator has a significantly higher degree of freedom and is thus the key to application-specific designs: A wide variety of magnet arrangements can be combined with differently designed iron yokes and coils. Using a universal performance parameter, 13 topologies were investigated to find the ideal drive for the given boundary conditions. For precision drives the force-to-power ratio is particularly suitable, since the drive structures can be evaluated independently of the used power amplifier and the expected trajectory curve.

The electromagnetic field simulations are embedded in a numerical optimisation to find the ideal geometry for each topology. The derived electromagnetic drive has a force-to-power ratio of over $60\text{N}^2/\text{W}$ while fitting in a space of approx. $\varnothing 50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$. In Figure 2 the corresponding optimisation run (left) and the magnetic field distribution (right) can be seen.

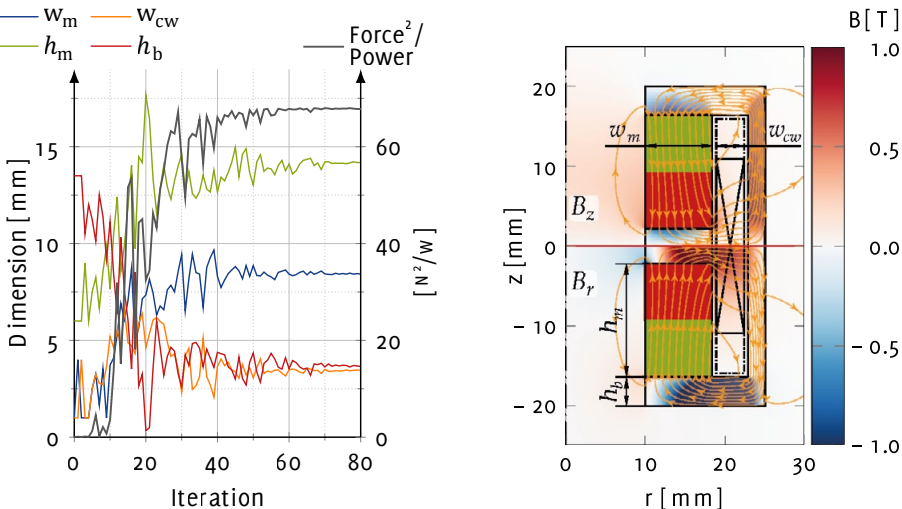


Figure 2: left: Optimisation of the actuator geometry for the chosen drive topology found via an automatised optimisation algorithm which derives the dimensions of the magnet and coil (w_m , w_{cw} , h_m , h_b); right: 2D-cross section of the optimal drive geometry, its FEM results and magnetic flux density. Diagrams: IMMS.

The final geometry of magnet, coil and yoke yield an electrodynamic actuator with maximum force-to-power ratio and a homogeneous distributed flux density along the stroke of the coil, see Figure 2 right. Thus, the drive force characteristics are close to constant along the travel. From a subsequent parameter study a coil can be chosen which fits best to the used power amplifier. Overall, the dissipated heat of the drive has been reduced by approx. 75% compared to the previous lifting module. If needed, the remaining low power losses can be discharged from the measuring chamber via an integrated cooling system.

Additionally to the design results above, a proven design procedure is now available. In the future it can be used to quickly and efficiently derive new lifting modules for other travel, load and design space requirements.

Results pave the way for industrial application

Figure 3 shows the derived lifting module. The electromagnetic drive encloses most of the other components, therefore all driving forces act exactly along the guiding axis. Thus, parasitic tilting loads can be avoided. Disturbing forces created by the drag of the tubes and wires were greatly reduced by integrating all those components that require a supply line into the slider-fixed assembly.

Figure 4 shows the first measurement results from a single axis measuring stand, which confirm the simulations. At first, the module was set down and resting on the massive granite stator. The noise in the position signal has a standard deviation of 0.22 nm; hence it represents the theoretical limit. In closed-loop operation (aerostatic guiding, pneumatic weight-force compensation, magnetic drive and ac-



Figure 3:

Newly developed lifting module.

Photograph: IMMS.

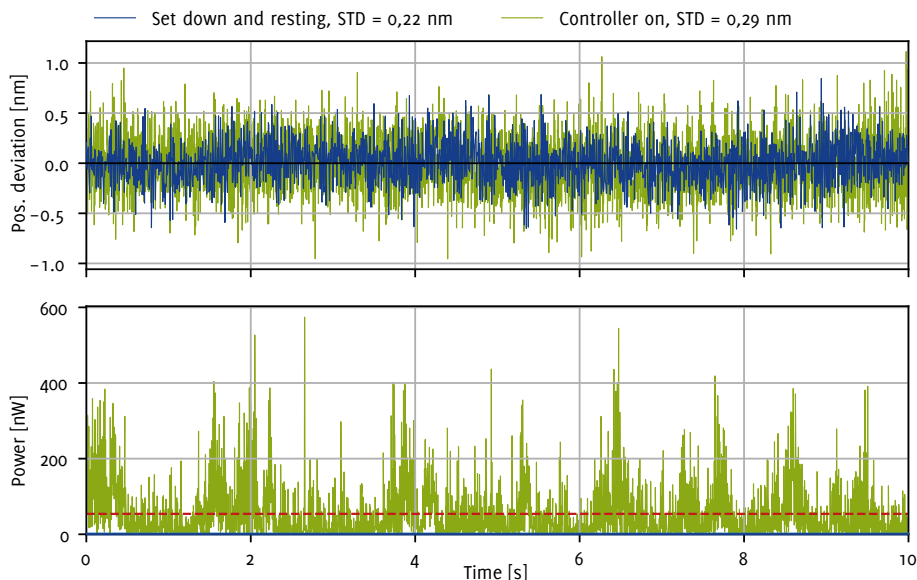


Figure 4: **top:** the blue graph represents the position measurement while the module was unpowered and resting on the base, the green graph shows the position deviation from the setpoint in closed-loop operation (with active pneumatic weight-force compensation and position control via the electromagnetic drive); **bottom:** the corresponding electrical power for the positioning process (red: green: in the magnetic drive, average power of 54 nW). Diagrams: IMMS.

tive controller) the standard deviation grew only marginally to 0.29 nm, while the extremely low average electrical power of just 54 nW was achieved.

The newly developed lifting modules have proven that it is possible to lift several kilograms through a macroscopic travel range with nanometre precision, while only emitting some nanowatts of heat into the measurement space. Thus, they mark an important milestone for the industrial application in 6D-measurement and nanofabrication systems, which move objects on complex spatial trajectories with subnanometre precision. Moreover, the developed constructive design process is currently proving its effectiveness in the development of new modules for a lifting range of 25 mm and a load of 13 kg.

Services for
mechatronic
systems at
www.imms.de

Contact person: Dr.-Ing. Stephan Gorges, stephan.gorges@imms.de

Funded by

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft
German Research Foundation

The authors gratefully acknowledge the support by the German Research Foundation (DFG) in the framework of the Research Training Group "Tip- and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working areas" (GRK 2182) at Technische Universität Ilmenau, Germany.

More on
NanoFab at
www.imms.de.

This text is based on the results of the dissertation "A lifting and actuating unit for a planar nanoprecision drive system", by Stephan Gorges (https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00047399)

Annual report
© IMMS 2020



Nanometergenaue Hubmodule für die Präzisionsantriebstechnik

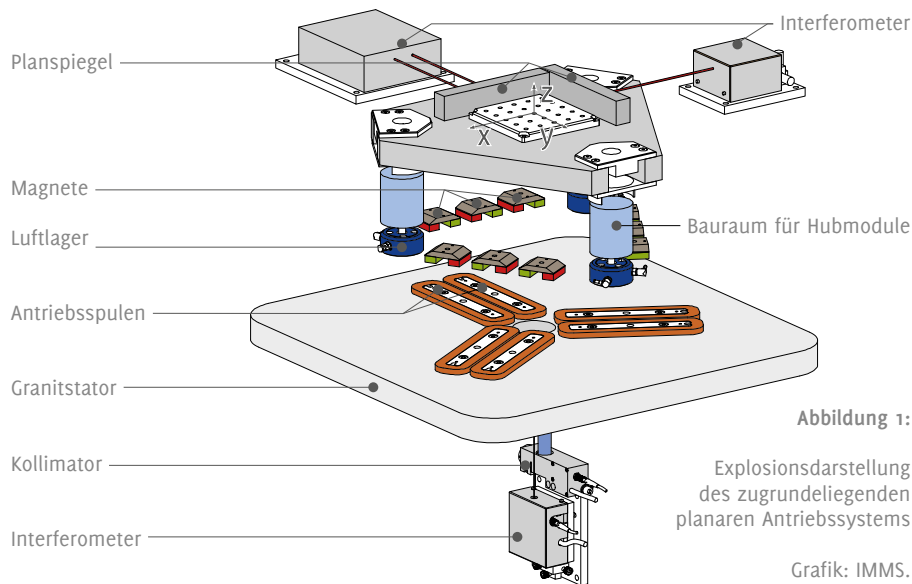
Die am IMMS entwickelten Hubmodule arbeiten in einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm bis auf 0,29 nm (Standardabweichung) genau und sind mit einem durchschnittlichen Wärmeeintrag von 54 nW für den Einsatz in der Fertigung und Messtechnik optimiert. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Positioniersysteme in der Halbleiterfertigung und der hochgenauen Messtechnik müssen immer präziser bewegen, um die voranschreitende Miniaturisierung zu bewältigen. Für neue Fertigungsverfahren werden immer größere vertikale Stellbereiche gefordert. Dafür hat das IMMS bereits einen 6D-Direktantrieb entwickelt, der Objekte in einem Verfahrbereich von $\varnothing 100$ mm in einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm frei im Raum nanometergenau und aktiv geregelt positioniert. Die Hubmodule wurden nun weiterentwickelt, um das System dank des 75% geringeren Wärmeeintrags für den Einsatz in der Fertigung und Messtechnik zu optimieren. Der parallel erarbeitete Design-Flow für große Bewegungsbereiche ist die Basis für noch effizientere anwendungsspezifische Entwicklungen.

Ausgangspunkt der Neuentwicklung

Gemeinsam mit seinen Partnern entwickelt und realisiert das IMMS Präzisionsantriebe für die nanometergenaue Positionierung in Verfahrbereichen von 100 mm und mehr. Durch die Integration eigens entwickelter Hubmodule wird dies nicht nur für



eine planare Positionierung in der xy-Ebene sondern zusätzlich auch für die Bewegung in z-Richtung, beispielsweise über 10 mm möglich.¹

Ein neu erarbeiteter Entwurfsprozess bildet die Grundlage für die passgenaue und optimierte Weiterentwicklung dieser hochintegrierten Hubmodule, womit auch für zukünftige Hub-Last-Kombinationen ein effizienter und schneller Entwurf möglich ist. Für den Neuentwurf der Hubmodule wurde zunächst das zugrundeliegende planare Antriebssystem (Abbildung 1) ganzheitlich betrachtet. Es basiert auf einem monolithischen Zentralkörper (Läufer), welcher auf drei Luftlagern reibungsfrei in der xy-Ebene bewegt werden kann.

Mit Hilfe von 4 Laserinterferometern, einem Autokollimator und in den Läufer integrierter Planspiegel ist es möglich, dessen Lage und Orientierung im Raum zu bestimmen. Gestellfeste Spulen erzeugen Kräfte auf NdFeB-Magneten auf der Unterseite des Läufers, wodurch dieser präzise in x- und y-Richtung bewegt werden kann. Zwischen den Luftlagern an den Ecken und dem Zentralkörper sollen nun zusätzliche Führungen und Aktoren eingebracht werden, um einen z-Hub des Läufers um 10 mm zu ermöglichen und die verbleibenden Fehler in den Kippwinkeln φ_x und φ_y eliminieren zu können. Mit dieser Anordnung muss der Läufer nur minimal modifiziert werden und es ist möglich, 3 identische Module einzusetzen, auf welche sich die zu tragende Masse von ca. 12 kg gleichmäßig verteilt.

Das Lastenheft für ein Präzisionssystem ist meist sehr ausführlich, da Wechselwirkungen, die im klassischen Maschinenbau vernachlässigbar sind, im Präzisionsbereich einen erheblichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit haben können. Um alle Anforderungen angemessen zu erfüllen, ist ein geeigneter konstruktiver Entwicklungsprozess unerlässlich. Dazu werden in diesem Fall die Konstruktionsprinzipien aus der Präzisionstechnik (Funktionstrennung) mit denen aus der Mechatronik (Funktionsintegration) in Einklang gebracht. Das betrifft insbesondere die zwei funktionalen Kernkomponenten: den Vertikaltrieb und die Vertikalführung.

Das zu entwerfende Hubmodul soll in der Lage sein, 4 kg über 10 mm nanometergenau und stick-slip-frei zu heben, wofür ein Bauraum von lediglich ca. $\varnothing$ 50 mm x 60 mm zur Verfügung steht. Besonderes Augenmerk liegt auf der entstehenden Wärme im Betrieb: Diese soll minimal sein, da jede Erwärmung thermische Ausdehnung und damit Präzisionsverlust zur Folge hat. Zusätzlich sollen Antrieb und Führung so gestaltet sein, dass sie sich gut für größere Lasten und Bewegungsbereiche skalieren lassen. Eine Analyse der in Frage kommenden Antriebsprinzipien (pneumatisch, piezoelektrisch, elektromagnetisch) hat gezeigt, dass keines allein in der Lage ist, alle Anforderungen hinreichend zu erfüllen.

Eine sinnvolle Lösung bietet die Abwandlung des Grobtrieb-Feintrieb-Prinzips: Ein erster Aktor kompensiert maßgeblich die Gewichtskraft, wodurch ein zweiter Aktor nur noch sehr geringe Kräfte benötigt, um die Präzisionspositionierung zu ermöglichen. Als Gewichtskraftkompensation eignet sich besonders ein Pneumatikzylinder, da dieser über eine hohe Kraftdichte verfügt, lokal keine Wärme ins System einträgt und über den Druck an verschiedene Lasten anpassbar ist. Die verbleibenden niedrigen, aber hochdynamischen Präzisionskräfte sind dann durch einen optimal gestalteten elektromagnetischen Aktor realisierbar. Außerdem können beide Aktorprinzipien sehr gut an größere Hübe und Lasten angepasst werden.

Als reibungsfrei arbeitende Führung eignet sich insbesondere eine aerostatische Buchsenführung. Diese kann zusätzlich sehr gut in den Pneumatikzylinder integriert werden, ohne funktionale Abstriche zu machen.

Zentraler Entwicklungsschritt der Auslegung und Dimensionierung ist die Modellierung der Aktoren. Detaillierte pneumatische Modelle erlauben es, Rückschlüsse auf das statische und dynamische Verhalten sowie den Luftverbrauch des Pneumatikzylinders zu ziehen. So konnte die Kolben-Zylinder-Kombination mit einer reibungsfreien Dichtung ideal an die Anforderungen und die vorhandene Infrastruktur angepasst werden.

Der elektromagnetische Aktor hat einen deutlich höheren Design-Freiheitsgrad und ist damit der Schlüssel für darauf aufbauende anwendungsspezifische Entwürfe: Verschiedenste Magnetanordnungen können mit unterschiedlich gestalteten Eisenrückschlüssen und Spulen kombiniert werden. Um den idealen Antrieb für die gegebenen Randbedingungen zu finden, wurden 13 Topologien anhand eines universellen Performance-Parameters detailliert untersucht. Für Präzisionsantriebe eignet sich vor allem das Kraft-Leistungsverhältnis, da so die Antriebsstrukturen unabhängig von der verwendeten Endstufe und der erwarteten Bahnkurve bewertet werden können.

Die elektromagnetischen Feldsimulationen sind in eine numerische Optimierung eingebettet, wodurch für jede Topologie die ideale Geometrie gefunden werden kann. Der hier ermittelte Magnetantrieb verfügt über ein Kraft-Leistungsverhältnis von über $60\text{ N}^2/\text{W}$ in einem Bauraum von ca. $\varnothing 50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$. In Abbildung 2 sind der entsprechende Optimierungslauf (links) und die Magnetfeldverteilung (rechts) zu sehen.

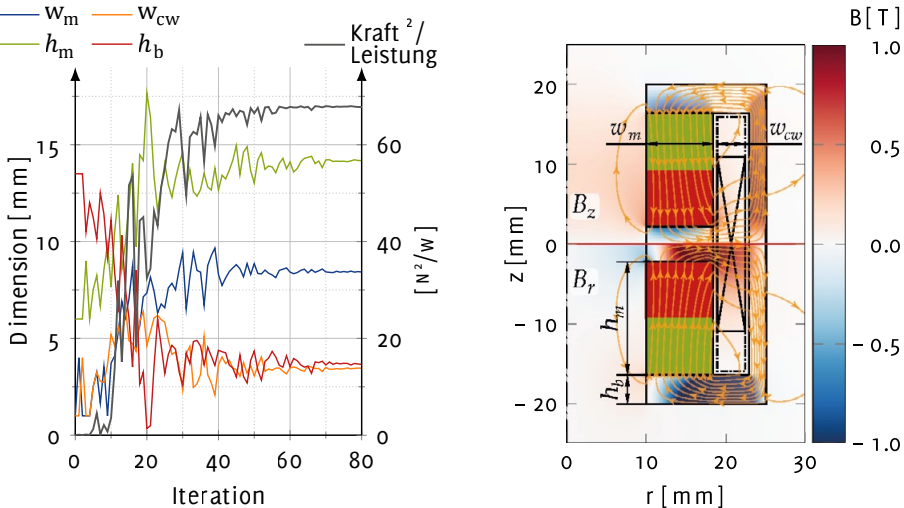


Abbildung 2: links: Optimierung der Aktorgeometrie für die final gewählte Antriebstopologie, per automatisiertem Optimierungsalgorithmus werden die Abmessungen von Magnet und Spule (w_m , w_{cw} , h_m , h_b) festgelegt; rechts: 2D-Querschnitt der gefundenen optimalen Antriebsgeometrie und FEM-basierte Analyse der zugehörigen Flussdichteverteilung. Grafik: IMMS.

Die endgültige Geometrie von Magnet, Spule und Rückschluss ergibt einen elektrodynamischen Aktuator mit maximalem Kraft-Leistungs-Verhältnis und einer homogen verteilten Flussdichte über den Hub der Spule, siehe Abbildung 2 rechts. Somit ist die Krafterzeugungscharakteristik des Antriebs über den Hub nahezu konstant. Aus einer anschließenden Parameterstudie kann dann die Spule ausgewählt werden, welche am besten zur Leistungsendstufe passt. Insgesamt konnte die entstehende Wärme gegenüber dem vorhergehenden Hubmodul um ca. 75% reduziert werden. Die geringe verbleibende Verlustleistung kann bei Bedarf zusätzlich durch ein integriertes Temperiersystem aus dem Messraum transportiert werden.

Neben dem konkreten Entwurfsergebnis steht nun zusätzlich eine erprobte Methodik zur Verfügung, um zukünftig auch für andere Hub/Last-Kombinationen und zugehörige Bauraumvorgaben schnell und effizient zu einem optimierten Entwurf des Hubmoduls zu kommen.

Ergebnisse ebnen den Weg für industrielle Anwendung

Abbildung 3 zeigt das entwickelte Hubmodul. Der Magnetantrieb schließt dabei die meisten Komponenten in seinem Inneren ein, wodurch alle Antriebskräfte exakt auf der Führungsachse liegen und somit keine parasitären Kipplasten entstehen. Die Störkräfte durch geschleppte Leitungen konnten maßgeblich reduziert werden, indem die Komponenten, welche eine Zuleitung benötigen, in die läuferfeste Bau-Gruppe integriert wurden. Die ersten Messergebnisse aus einem einachsigen Messstand in Abbildung 4 bestätigen den Entwurf. Im ersten Schritt wurde das Hubmodul druck- und stromlos auf dem massiven Granitstator abgestellt.

Das Positionsrauschen weist dabei eine Standardabweichung von 0,22 nm auf, was somit das theoretische Limit darstellt. Im Closed-loop-Betrieb (Luftführung, pneumatische Gewichtskraftkompensation, Magnetantrieb und Regler aktiv) wurde



Abbildung 3:

Neuentwickeltes
Hubmodul.

Foto: IMMS.

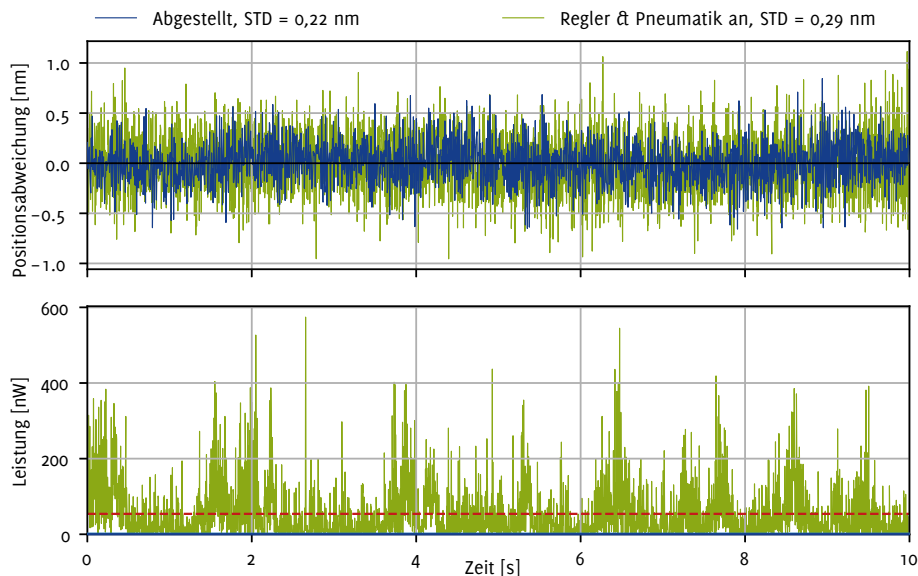


Abbildung 4: Oben: Blau: Positionsmessung, während das Modul druck- und stromlos auf der Unterlage ruht, Grün: Positionsabweichung vom Sollwert im closed-loop Betrieb (mit aktiver pneumatischer Gewichtskraftkompensation und Positionsregelung durch den Magnetantrieb); Unten: Grün: zugehörige abfallende elektrische Leistung im Magnetantrieb; Rot: Durchschnittswert von 54 nW der zum Positionierprozess benötigten elektrischen Leistung. Grafik: IMMS.

ein nur minimal größerer Fehler von 0,29 nm bei einer elektrischen Leistungsabgabe von durchschnittlichen nur etwa 54 nW erreicht.

Die neu entwickelten Hubmodule konnten beweisen, dass mehrere Kilogramm in einem makroskopischen Bewegungsbereich Nanometer-genau positioniert werden können, während nur eine Verlustleistung im niedrigen Nanowattbereich in den Messraum emittiert wird. Sie sind somit ein wichtiger Meilenstein für die industrielle Verwendung in 6D-Mess- und Nanofabrikationsystemen, die Objekte auf komplexen räumlichen Wegstrecken nano- und subnanometergenau positionieren sollen. Darüber hinaus bewährt sich der erarbeitete Konstruktionsleitfaden aktuell bei dem Entwurf weiterer Module für einen Hub von 25 mm und einer Last von 13 kg.

Kontakt: Dr.-Ing. Stephan Gorges, stephan.gorges@imms.de

Gefördert durch

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Graduiertenkollegs „Tip and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working areas“ (GRK 2182), gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), durchgeführt.

Mehr zu

NanoFab auf

www.imms.de.

Der Text basiert auf den Ergebnissen der Dissertation „A lifting and actuating unit for a planar nanoprecision drive system“ von Stephan Gorges (https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00047399).

Jahresbericht

© IMMS 2020

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

Dienstleistungen
für mechatroni-
sche Systeme:
www.imms.de