

Investigations on tracking control of vertical motion systems for nanometre precision applications

Figure 1: IMMS developed a model-based control strategy to integrate lifting and actuating units into its existing planar nanoprecision drives. This should enable high-precision manufacturing with complete 6D systems in the future. With this test setup with one degree of freedom for one lifting and actuating unit the model-based control strategy was validated to be used in full 6D systems. Photograph: IMMS.

Motivation and overview

The rapid progress in the miniaturisation of micro- and nanosystems demands high-precision positioning systems integrating vertical actuation. In semiconductor industry and other branches where high-precision drive systems for industrial machinery are needed, requirements increasingly evolve towards ever more precise systems with sub-nanometre precision. At the same time ever larger vertical movements are to be carried out to enable more functionality and higher accuracy due to the ability to compensate for flatness deviations and to consistently touch the probe with minimum Abbe error, i.e. with minimal angular errors and offsets.

For those vertical movements of a drive system, IMMS and partners are conducting research and development to equip an existing nanometre planar positioning system (NPPS100), which has a planar travel range of $\varnothing 100$ mm, with purpose-designed lifting and actuating units (LAUs). The result will be a 6D system that allows not only

More on
NanoFab at
www.imms.de.

Lead application
nm measure-
ment and struc-
turing of objects
www.imms.de

Annual report
© IMMS 2021



Figure 2:

Nanometre planar positioning system NPPS100.

Photograph: IMMS.

positioning in the horizontal xy -plane but also displacement in the z -direction, e.g. over 10 mm, with sub-nanometre resolution.

In the course of these investigations an initial step was the design and optimisation of a custom tailored closed-loop control for each individual LAU. This critical step in research on vertical positioning and trajectory tracking tasks is described in this article. Systematic experimental studies validate the projected performance of each lifting module and confirm the effectiveness of the proposed control system thus enabling the next steps towards the full 6D system implementation.

Concept of the 6D drive system

A full 6D system evolves from the combination of the planar drive NPPS100 (featuring motion in x , y , and φ_z) with three identical LAUs for vertical actuation in z -direction with associated tilting angles φ_x and φ_y . By using four laser interferometers (LIFs), an autocollimator, and plane mirrors mounted in the slider, it is possible to determine the position and orientation in the Euclidean space. Within this framework, vertical actuation allows the measurement and manipulation of real 3D objects rendering a minimum Abbe-error. Figure 3 shows the exploded view of the underlying planar system integrating three lifting modules.

*Lead application
nm measure-
ment and struc-
turing of objects
www.imms.de*

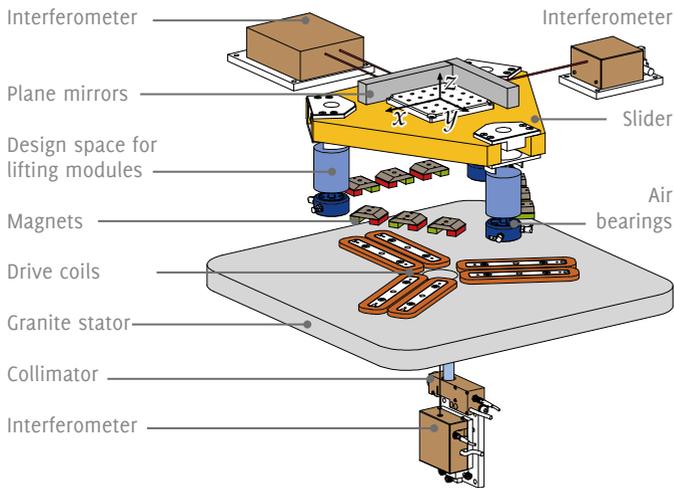


Figure 3:

Exploded view of the NPPS100-6D.

Diagram: IMMS.

Design of the lifting module revisited

The purpose of the earlier developed single LAUs is to lift a total mass of 4 kg with precise nanometre positioning. The target of the lifting module is to mimic the performance of the planar drive NPPS100 (see Figure 2) in terms of precision and dynamics, i.e. RMS position errors below 1 nm and maximum accelerations of 250 mm/s². The key task of the 3D vertical actuation (z, φ_x, φ_y) consists in moving the slider and further components, i.e. a total of 12 kg, over a vertical stroke of 10 mm. Due to the symmetric design of the triangular slider, three identical LAUs are mounted on each corner, therefore transitioning to a full 6D system ($x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$), see Figure 3.

The design of one compact lifting module integrates a pneumatic actuator for weight-force compensation (WFC), an electromagnetic drive for precision motion, and an aerostatic vertical guiding for frictionless and stick-slip-free motion fitted into an assembly space of just 50 mm diameter by 60 mm height. An optical linear encoder is additionally integrated to initialise the LIFs. In relation to vertical actuation, the biggest shortcoming is heat emission, i.e. thermal expansion, and further associated perturbations into the measurement space.

This is solved by utilising a thermally passive WFC to counteract the static weight force. In consequence, the electromagnetic actuator only creates the precision motion force fulfilling the heat emission constraint. Real-time experimentation found that a pneumatic piston as a WFC and a Lorentz-force drive as a precision actuator

Lead application
nm measure-
ment and struc-
turing of objects
www.imms.de

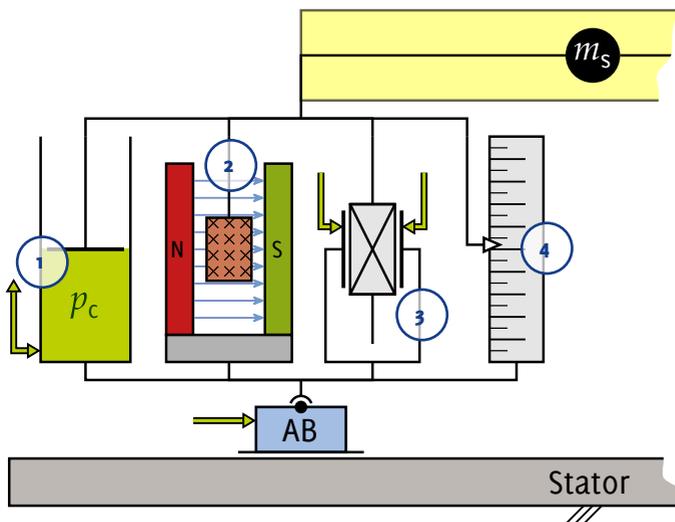


Figure 4:

Functional components of a single LAU:

- (1) pneumatic WFC,
- (2) precision Lorentz-force actuator,
- (3) vertical guiding,
- (4) integrated encoder.

Diagram: IMMS.

complement each other very well. In addition, the integrated encoder can be utilised as a fallback system in case of a laser beam break. Figure 4 depicts the functional components of a single LAU.

Single degree of freedom test-bench

As an intermediate step toward a full 6D system, one single LAU is installed individually on a test stand configuring a vertical motion system with one degree of freedom (DOF) that integrates two actuators. Figure 5 shows an overview of the test setup. The motion system is placed on a passive vibration-isolating granite stator. A single LAU is mounted at one corner of a triangular dummy slider while the other corners are hinged on a passive secondary support. By means of a high-precision LIF, the vertical displacement is measured with a resolution of 20 pm. In addition, a mirror is fixed on the centre of the slider. For precise measurement, the reflected beam must be coincident with the outgoing beam. To this end, the mirror must be adjusted precisely perpendicular to the beam of the LIF with an angular tolerance of 145 μrad approx. Note that this physical constraint limits the maximum vertical displacement up to 80 μm . For data acquisition and rapid control prototyping, we utilise a dSpace real-time system in combination with Matlab and Simulink.

Lead application nm measurement and structuring of objects

www.imms.de



Figure 5:

Lifting module that has been integrated into the 1-DOF test setup.

Photograph: IMMS.

Model-based control strategy

Typical controls used for industrial applications not suitable

The design of an appropriate control system is the key element in research on positioning and trajectory tracking tasks. Consequently, the selection of the control strategy, as well as its fine-tuning, is essential to achieve the desired performance and robustness. In industrial applications, the widely-known proportional-integral-derivative (PID) controller stands out for its remarkable performance and because it can be easily tuned using heuristic methods. However, due to the complex dynamics of the LAU, standard PID-type approaches neither meet the desired accuracy (z-position error below 1 nm) nor successfully minimise heat emission (via low current in the electromagnetic actuator), and also lack robustness against parametric uncertainties and external disturbances. Model-based control strategies provide a constructive procedure, resulting in an iterative approach for controller design whenever the dynamic model of the process is updated. This results in a more efficient implementation.

Integration of parallel vertical forces into a single pure control force

The starting point for the design of the control system is the derivation of a detailed model. It should describe the overactuated nature of the system, i.e. a system which has more actuators than degrees of freedom (DOF). In our case, the model comprised the complex overactuated dynamics of the LAU plus further components of the 1-DOF test bench (i.e. slider, air guidings, and secondary support). To this end, the forces generated by the pneumatic WFC and the electromagnetic drive are

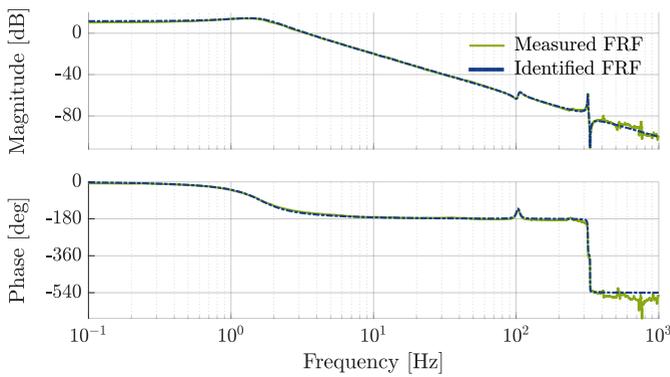


Figure 6:

Frequency response function. Input: force F^* [N], output: displacement q_z [mm]

Source: IMMS.

integrated into a single pure control force by means of the application of a control allocation method (see Figure 7). By utilising control allocation, the model is reduced into a single-input and single-output system. Given the dominantly linear dynamics of the 1-DOF motion system, the frequency response is measured to get a closer look into the plant dynamics, see Figure 5. Through the application of frequency-domain system identification tools, a very reliable model is identified which captures most of the relevant dynamics (i.e., further resonance modes) of the 1-DOF vertical motion system.

The control system is designed on the basis of the identified dynamic model. Fig. 6 depicts the functional closed-loop system. The control architecture comprises a feedforward stage for trajectory tracking and a feedback stage for stabilisation and complex disturbance rejection. The core of the feedback control is an optimal linear-quadratic (LQ) baseline controller plus an adaptive augmentation. The LQ-type controller meets the expected performance via high bandwidth and provides robust-

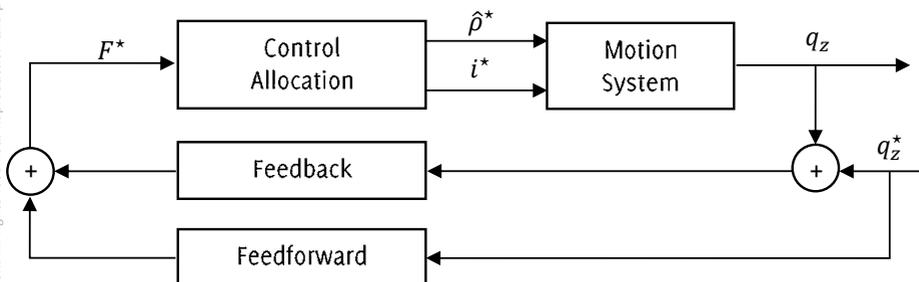


Figure 7: Block diagram of the closed-loop system. Diagram: IMMS.

ness properties. The adaptive component plays a central role to recover the target performance even in presence of external disturbances and parametric uncertainties. In this context, for real-time implementation full-state information is reconstructed by an integrated (extended) state estimator.

Results towards a full 3D vertical actuation

Investigations on tracking control are closed by evaluating the effectiveness of the proposed control system through real-time data, which is appealing for potential industrial applications. Figure 8 shows the final measurement results from the 1-DOF testing setup. At the beginning of the experiments, the lifting module was set down and rested on the massive granite stator. In the upper left graph, the noise in the position signal (in blue) has a standard deviation of 0.21 nm; while in closed-loop operation, the position error (in green) has a standard deviation of 0.22 nm. The current in the electromagnetic drive has a root mean square (RMS) as low as 0.26 mA (see the upper right graph), and the equilibrium pressure for a mass of 4 kg approx. is bounded around 1.18 bar (see the lower left graph). Further experiments were also performed in closed-loop operation over the vertical stroke of 10 mm. In the lower right graph, the RMS positioning error and the RMS control current stay below 0.25 nm and 0.3 mA, respectively. Given the very low current, heat emission is minimised by emitting only a few nanowatts (54 nW approx.) into the measurement space.

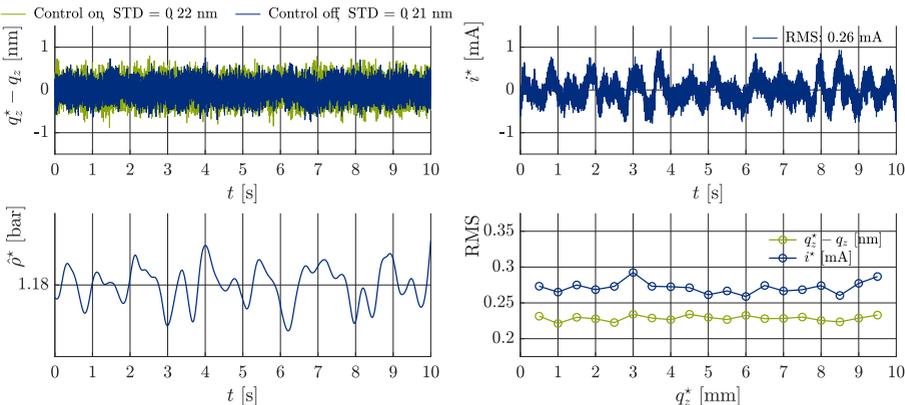


Figure 8: Time series of the closed-loop positioning error (in nm), control current (in mA), pneumatic pressure (in bar), and RMS deviation w.r.t. the vertical displacement.

These impressive results in positioning applications play a central role for future research towards a full 6D system and, additionally, validate the projected performance of an individual LAU using a modern control system in order to achieve sub-nanometer precision positioning with RMS errors below 0.25 nm while heat emission is minimised via an almost zero current in the electromagnetic actuator. Further research will address a 3D vertical motion system comprising three LAUs to provide motion in z-direction, as well as tilting angles φ_x and φ_y .

Contact person: Alex S. Huaman, M.Sc., alex.huaman@imms.de

Funded by



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.

114 ○

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

More on NanoFab at www.imms.de.



Untersuchungen zur Positionsregelung von vertikalen Bewegungssystemen für Präzisionsanwendungen im Nanometerbereich

Abbildung 1: Das IMMS hat eine modellbasierte Steuerung und Regelung entwickelt, um Vertikalhubmodule in seine bestehenden planaren Nanopräzisionsantriebe zu integrieren. Dies soll in Zukunft eine hochpräzise Positionierung mit kompletten 6D-Systemen ermöglichen. Mit dem abgebildeten 1D-Versuchsaufbau wurde zunächst für ein einzelnes Hubmodul die modellbasierte Regelung umgesetzt und für den späteren Einsatz in 6D-Systemen validiert. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Der rasante Fortschritt bei der Miniaturisierung von Mikro- und Nanosystemen erfordert hochpräzise Positioniersysteme mit integrierter vertikaler Antriebstechnik. In der Halbleiterindustrie und anderen Branchen, in denen hochpräzise Antriebssysteme für industrielle Fertigungsprozesse benötigt werden, entwickeln sich die Anforderungen zunehmend zu immer präziseren Systemen mit einer Genauigkeit bis in den Sub-Nanometerbereich. Gleichzeitig sollen immer größere vertikale Bewegungen ausgeführt werden, um mehr Funktionalität und höhere Genauigkeit zu ermöglichen, weil durch die Vertikalverstellung einerseits Ebenheitsabweichungen kompensiert und andererseits die Messobjekte bzw. zu strukturierende oder zu produzierende Teile stets mit minimalem Abbe-Fehler, d. h. mit minimalen Winkelfehlern und Versätzen, angetastet werden können.

Vor diesem Hintergrund arbeiten das IMMS und seine Partner daran, ein bestehendes planares Nanometer-Positioniersystem (NPPS100), das einen planaren Verfah-

Mehr zu NanoFab auf www.imms.de.

Leitanwendung nm-Vermessung u. -Bearbeitung von Objekten: www.imms.de

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2021



Abbildung 2:

Nanometergenaues
planares Positio-
nierungssystem
NPPS100.

Foto: IMMS.

bereich von $\varnothing 100$ mm hat, mit speziell entwickelten Hubmodulen (LAUs) auszustatten. Im Ergebnis entsteht ein 6D-System, das nicht nur die Positionierung in der horizontalen xy-Ebene, sondern auch die Verschiebung in z-Richtung, z. B. über 10 mm, mit einer Auflösung im Sub-Nanometerbereich ermöglicht.

Ein erster Schritt bei diesen Untersuchungen war der Entwurf und die Optimierung eines maßgeschneiderten Regelkreises für die einzelnen LAU. Dieser wesentliche Schritt in der Forschung für eine hochgenaue vertikale Positionierung auf atomarem Level wird in diesem Artikel beschrieben. Durch systematische experimentelle Untersuchungen wurde die Leistungsfähigkeit der Hubmodule untersucht und die Effektivität der entwickelten Regelung bestätigt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für den schrittweisen weiteren Ausbau der Funktionalität bis hin zur vollständigen Implementierung des 6D-Systems.

Konzept des 6D-Antriebsystems

Das 6D-Antriebsystem entsteht aus der Kombination des Planarantriebs NPPS100 (mit Bewegung in x , y und φ_z) mit drei identischen LAUs für die vertikale Verschiebung in z -Richtung mit den zugehörigen Kippungen φ_x und φ_y . Mit Hilfe von vier Laserinterferometern (LIFs), einem Autokollimator und ebenen Spiegeln, die am Läufer montiert sind, ist es möglich, die Position und Orientierung im euklidischen Raum hochgenau zu bestimmen. Auf diese Weise ermöglicht die vertikale Bewegung die Messung und Manipulation dreidimensionaler Objekte mit einem minimalen Abbe-Fehler. Abbildung 3 zeigt die Explosionszeichnung des zugrundeliegenden Planarsystems, das drei Hubmodule integriert.

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

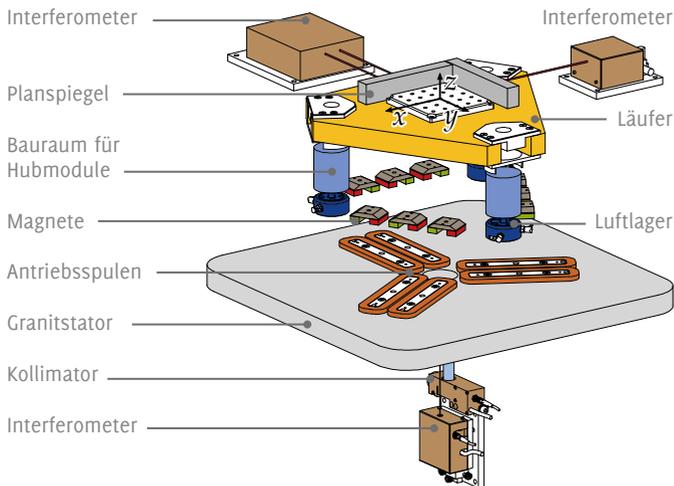


Abbildung 3:

Explosionszeichnung
des NPPS100-6D.

Grafik: IMMS.

Zweck der am IMMS entwickelten Hubmodule (LAUs) ist das Heben einer Gesamtmasse mit gleichzeitig präziser Positionierung im Nanometerbereich. Dabei müssen die LAU in Bezug auf Präzision und Dynamik eine Positionierperformance wie der Planarantrieb NPPS100 (siehe Abbildung 2) erreichen, d. h. RMS-Positionsfehler unter 1 nm und maximale Beschleunigungen von bis zu 250 mm/s^2 . Die Hauptaufgabe des 3D-Vertikaltriebs (z, φ_x, φ_y) besteht darin, den Läufer und weitere Komponenten, d.h. insgesamt ca. 12 kg, über einen vertikalen Hub von 10 mm zu bewegen. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus des dreieckigen Läufers werden an dessen Ecken drei identische LAUs montiert, so dass sich ein vollständiges 6D-System ergibt ($x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$), siehe Abbildung 3.

Gestaltung des Hubmoduls

Das kompakte Design der Hubmodule vereint einen pneumatischen Aktuator zur Gewichtskraftkompensation (GKK), einen elektromagnetischen Antrieb für Präzisionsbewegungen und eine aerostatische Vertikalführung für reibungslose und stick-slipfreie Bewegungen in einem Bauraum von nur 50 mm Durchmesser und 60 mm Höhe. Zur Initialisierung der LIFs ist zusätzlich ein optischer Linearencoder integriert. Die größten Herausforderungen bei vertikalen Präzisionsantrieben sind die Wärmeabgabe und die damit verbundenen Störungen im Messraum. Dies wird im vorliegenden Entwurf durch den Einsatz einer thermisch passiven GKK adressiert, die der statischen Gewichtskraft entgegenwirkt. Infolgedessen erzeugt der elektromagnetische Aktor nur die Präzisionsbewegungskraft, wodurch die Wärmeabgabe

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

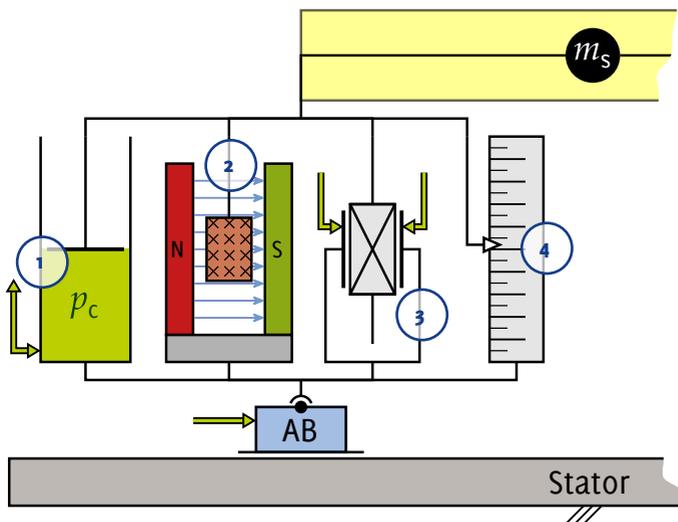


Abbildung 4:

Funktionskomponenten eines einzelnen LAU:

- (1) pneumatische Gewichtskraftkompensation GKK,
- (2) Präzisions-Aktor/VoiceCoil-Antrieb,
- (3) vertikale Führung,
- (4) integrierter Encoder.

Grafik: IMMS.

auf ein praktisch vernachlässigbares Niveau reduziert wird, das die Einhaltung der Wärmeabgabebedingung gewährleistet. In Echtzeit-Experimenten wurde bestätigt, dass sich ein pneumatischer Aktor als GKK und ein Lorentz-Antrieb als Präzisionsaktor sehr gut ergänzen. Darüber hinaus kann der integrierte Encoder als Sicherungssystem genutzt werden, falls ein Laserstrahl unterbrochen wird. Abbildung 4 zeigt die Funktionskomponenten eines einzelnen LAU.

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

Prüfstand mit einem Freiheitsgrad

Als Zwischenschritt zu einem vollständigen 6D-System wird ein einzelner LAU individuell auf einem Prüfstand installiert, der ein vertikales Antriebssystem mit einem Freiheitsgrad (DOF) darstellt, in das zwei Aktuatoren integriert sind. Abbildung 1 zeigt den Testaufbau. Das Antriebssystem ist auf einem passiven, schwingungsisolierenden Granitstator platziert. Das Hubmodul, siehe auch Abbildung 5, ist an einer Ecke eines dreieckigen Aluminium-Läufers montiert, während die anderen Ecken durch eine passive sekundäre Halterung unterstützt werden. Mit Hilfe eines mittig auf dem Läufer platzierten Reflektors und eines hochpräzisen LIF wird die vertikale Verschiebung mit einer Auflösung von 20 pm gemessen. Damit austretender und reflektierter Laserstrahl übereinstimmen, muss der Spiegel mit einer Winkeltoleranz von ca. 145 µrad genau senkrecht zum Strahl des LIF justiert werden. Diese physikalische Einschränkung begrenzt die maximale vertikale Verschiebung auf 80 µm. Für die Datenerfassung und das Rapid Prototyping der Steuerung wird ein dSpace-Echtzeitsystem in Kombination mit Matlab Simulink verwendet.



Abbildung 5:

Hubmodul, das in den 1-DOF-Testaufbau integriert wurde.

Foto: IMMS.

Modellbasierte Steuerung und Regelung

Standardregler nicht geeignet

Der Entwurf einer geeigneten Regelungsstruktur ist ein Schlüsselement für nanometergenaue Positionierung und Bahnverfolgung. Folglich ist die Auswahl der Steuerungs- und Regelungsstrategie sowie deren Feinabstimmung von wesentlicher Bedeutung, um die gewünschte Performanz und Robustheit zu erreichen. In vielen industriellen Anwendungen kommt der übliche Proportional-Integral-Derivativ-Regler (PID-Regler) zum Einsatz und kann mit heuristischen Methoden leicht eingestellt werden. Aufgrund der komplexen Dynamik der LAU erreichen Standard-PID-Ansätze jedoch weder die gewünschte Genauigkeit mit z-Positionsfehlern unter 1 nm, noch minimieren sie erfolgreich die Wärmeabgabe durch kleinstmöglichen Strom im elektromagnetischen Aktuator. Darüber hinaus fehlt ihnen auch die Robustheit gegenüber parametrischen Unsicherheiten und externen Störungen. Modellbasierte Regelungsstrategien ermöglichen an dieser Stelle ein effektives Vorgehen beim Reglerentwurf, das einen iterativen Ablauf der Entwurfsschritte beinhaltet, sobald das dynamische Streckenmodell aktualisiert wird. Dies schließlich ermöglicht eine effiziente Implementierung am realen System.

Integration der Vertikalkräfte in eine einzige Steuerkraft als Reglerausgang

Der Ausgangspunkt für den Entwurf des Kontrollsystems ist die Ableitung eines detaillierten Modells. Es sollte die überaktuierte Natur des Systems beschreiben, d. h. eines Systems, das mehr Aktoren als Freiheitsgrade (DOF) hat. In diesem Fall umfasste das Modell die komplexe überaktuierte Dynamik des LAU sowie weitere Komponenten des 1-DOF-Prüfstandes, d.h. Läufer, Luftführungen und sekundäres Stützsystem. Dazu werden die von der pneumatischen Gewichtskraftkompensation

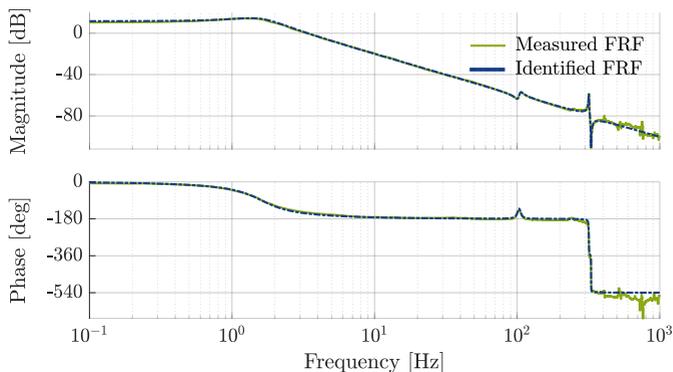


Abbildung 6:

Frequenzgangfunktion.
Eingang: Kraft F [N],
Ausgang: Verschie-
bung q_z [mm].

Quelle: IMMS.

und dem elektromagnetischen Antrieb erzeugten Kräfte in eine einzige Steuerungs-
kraft integriert, indem eine Methode zur Stellgrößenzuteilung angewandt wird, siehe
Abbildung 7.

Durch die Stellgrößenzuteilung wird das Modell zu einem Single-Input- und
Single-Output-System reduziert. Angesichts der überwiegend linearen Dynamik des
1-DOF-Bewegungssystems wird der Frequenzgang gemessen, um einen genaueren
Einblick in die Dynamik der Anlage zu erhalten, siehe Abbildung 5. Durch die Anwen-
dung von Werkzeugen zur Systemidentifikation im Frequenzbereich wird ein sehr
zuverlässiges Modell identifiziert, das die meisten der relevanten Dynamiken, d. h.
weitere Resonanzmoden, des vertikalen 1-DOF-Bewegungssystems erfasst.

Das Steuerungs- und Regelungssystem wird auf der Grundlage des ermittelten
dynamischen Modells entworfen. Abbildung 7 zeigt das Funktionsschema des ge-
schlossenen Regelkreises. Die Regelungsarchitektur umfasst eine Vorsteuerung für
die Bahnverfolgung und eine Rückkopplungsstufe für die Stabilisierung und die Un-
terdrückung komplexer Störungen. Der Kern der Regelung ist ein optimaler linear-
quadratischer (LQ) Basisregler mit einer adaptiven Erweiterung. Der LQ-Regler er-
reicht die erwartete Regelgüte durch hohe Bandbreite und Robustheit. Die adaptive

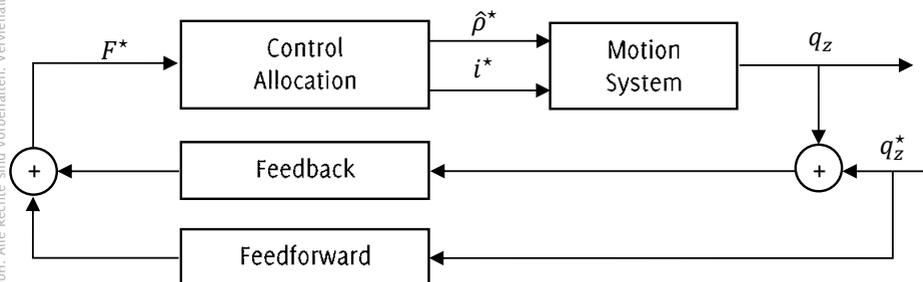


Abbildung 7: Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises. Grafik: IMMS.

Komponente spielt eine zentrale Rolle für die Regelperformance besonders auch unter externen Störungen und bei parametrischen Unsicherheiten. Hierfür wird für die Echtzeitimplementierung die vollständige Zustandsinformation durch einen integrierten erweiterten Zustandsschätzer rekonstruiert.

Ergebnisse ebnen den Weg zu einer 3D-Vertikalbewegung

Die Reglerentwicklung wurde abgeschlossen, indem die Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Regleransatzes anhand der Echtzeitdaten bewertet wurde, die für potenzielle industrielle Anwendungen interessant sind. Abbildung 8 zeigt die endgültigen Messergebnisse des 1-DOF-Versuchsaufbaus. Zu Beginn der Versuche wurde das Hubmodul abgesetzt und ruhte auf dem massiven Granitstator. Die Grafik oben links zeigt das verbleibende Rauschen im Positionssignal (in blau) mit einer Standardabweichung von 0,21 nm. Im geregelten Betrieb hat der Positionsfehler (in grün) eine Standardabweichung von 0,22 nm. Der Aktorstrom im elektromagnetischen Antrieb hat einen quadratischen Mittelwert (RMS) von nur 0,26 mA, siehe obere rechte Grafik, und der Gleichgewichtsdruck für eine Masse von ca. 4 kg ist auf etwa 1,18 bar begrenzt, siehe untere linke Grafik. Weitere Experimente im geregelten Betrieb wurden auch über den gesamten vertikalen Hubbereich von 10 mm durchgeführt. Wie die untere rechte Grafik zeigt, bleiben der RMS-Positionierfehler und der RMS-Steuerstrom dabei unter 0,25 nm bzw. 0,3 mA. Angesichts des sehr geringen Stroms wird die Wärmeabgabe minimiert, indem nur wenige Nanowatt (ca. 54 nW) vom Aktor in den Messraum abgegeben werden.

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

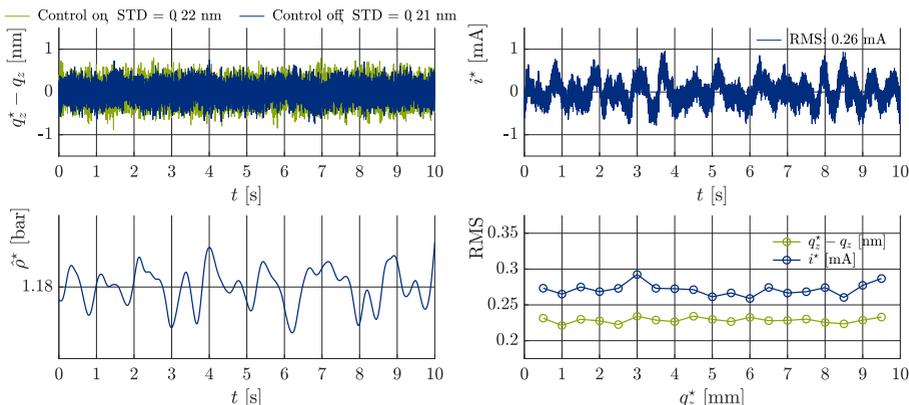


Abbildung 8: Zeitreihen des Positionsfehlers im geschlossenen Regelkreis (in nm), des Steuerstroms (in mA), des pneumatischen Drucks (in bar) sowie RMS-Wert der Regelabweichung und des Aktorstromes in Abhängigkeit der Vertikalposition. Quelle: IMMS.

Somit wurden die sehr anspruchsvollen Anforderungen einer Vertikalpositionierung auf atomarem Level und ohne Wärmeeintrag mit dem gewählten Ansatz auf ein-drucksvolle Weise erfüllt und die Ergebnisse sind ein wichtiger Baustein für die künftige Forschung auf dem Weg zu einem vollständigen 6D-System. Sie bestätigen darüber hinaus den Ansatz und die Gestaltung der Hubmodule zur Vertikalverstellung mit Nanometerpräzision und minimiertem Wärmeeintrag. Weitere Forschungsarbeiten werden sich mit einem vertikalen 3D-Bewegungssystem befassen, das drei LAUs umfasst, und neben der Bewegung in z-Richtung auch die Regelung der Kippwinkel φ_x und φ_y einbezieht.

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

Kontakt: Alex S. Huaman, M.Sc., alex.huaman@imms.de

Gefördert durch



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

Mehr zu NanoFab auf www.imms.de.