

Work at IMMS for the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) on a nanometre-precision planar drive system for a large travel range and use in vacuum. Photograph: IMMS.

Objectives and overview

If no way of measuring on atomic scale, no future for high technology

Our daily lives are both accompanied and influenced by microelectronics. They are hidden in smartphones, in all automated and networked forms of production and in the IoT, the Internet Of Things. As they shrink in size, they also acquire more smart functions, and thus an ever greater number of structures on a single chip. As a result, semiconductor manufacturing has to cope with ever narrower structures – currently, breadths of ten nanometres. If there are to be structures of this size and, in future, yet smaller, on a chip, modern production and inspection plant will have to be able to carry out measurement and positioning in the sub-nanometre range. There will be a need for linear scales or two-dimensional grid structures used in this manufacture to be correctly calibrated. With this in mind, the PTB (the German National Metrology Institute) in Braunschweig (also known in English as Brunswick), which is the highest technical arm of the German Ministry for Education and Research, the authority on all questions of correct and reliable measurement, is at work on the problem. The PTB is constantly developing measurement procedures and instruments of increas-

ing accuracy so that they can be used as the reference systems for measurement calibration standards in the above applications and countless others.

> *fast realtime*

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> *in-ovo*

> *Contents*

* *Funding*

Laser interferometers measuring long distances in vacuum require high-precision drives

Of crucial importance is the role played by accurate measurement of distance with laser interferometers, as they are a means of achieving measurement uncertainty down to the nanometre for even relatively long stretches exceeding 100 mm. As a result, one of the PTB's major research aims is to investigate and optimise laser interferometer properties, particularly focussing on sources of error.¹ In atmospheric conditions, the changes in the refractive index of air due to temperature, pressure and humidity changes are the biggest error factor, masking many others. Investigations are, therefore, increasingly carried out in vacuum.

For this demanding research, the PTB needed a planar stage with a large processing area capable of use in a vacuum as a system to help bring into position the individual components of the interferometer being examined with nanometre accuracy, so that predefined, precise and reproducible measurement conditions could be ensured. The stage would have to move with total regularity and absence of vibration through an area 150 mm x 2 mm, while having minimum influence on the measuring space. What is more, particular importance is laid on an absolute fit with the complex measuring equipment found inside the vacuum chamber, where there will also be a 3D positioning unit to raise the z position and the pitch axis very slightly.

IMMS planar drive system works in vacuum

To meet these needs, IMMS has developed an air-guided planar drive with an optical incremental measuring system, see Fig. 1. This motor uses closed-loop control for the slider's position in the x,y (Cartesian) plane and for the rotation around the vertical axis (φ_z). The remaining degrees of freedom for the slider, i.e. the vertical (z) movements and inclination around the horizontal axes (φ_x , φ_y) are defined by a planar aerostatic slider guide with three flat air-bearing pads. The 3D stage is carried by the planar stage and offers the possibility of positioning the object to be measured by raising it across a small range within these degrees of freedom.

IMMS worked not only on developing and creating the stage as hardware but also on the control algorithms, which it then integrated into an operational control system with its own 3D closed-loop control. The control software was implemented in hardware capable of real-time open-loop control which is in communication with

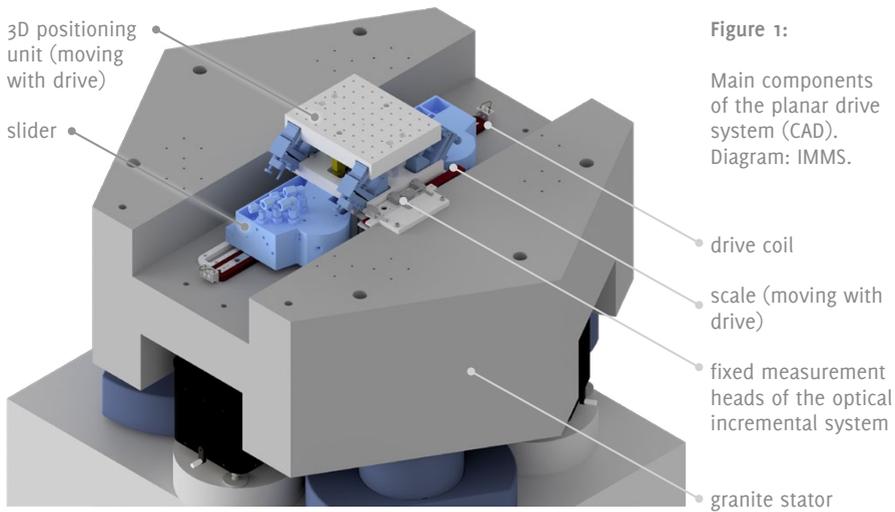


Figure 1:

Main components of the planar drive system (CAD).
Diagram: IMMS.

- > fast realtime
- > ANCONA
- > INSPECT
- > ADMONT
- > PTB
- > in-ovo
- > Contents
- * Funding

the upstream controls of the overall experiment as client, so that the planar drive system was integrated into the full experimental setup as an independent sub-system. The new drive system has as its core function the precise positioning of the object to be measured but also enables the slider to be locked down temporarily with ensuing deactivation of all the systems: for that period, outside influences on the measurement environment are further reduced. The drive has been in use at the PTB since mid-2017 for the investigations described.

More on open- and closed-loop controls at www.imms.de.

More on actuator systems at www.imms.de.

The IMMS solution in detail

Drive

The principle on which the new system rests is that of an integrated multi-coordinate drive.² As is shown in Fig. 2, a planar drive has been created in which several linear actuators affect a single object simultaneously. The interaction of the actuators can generate horizontal slide in any direction so that the x or y coordinate can be modified as desired. At the same time, the actuators generate torque around the vertical axis and thus control the yaw, i.e. the rotation φ_z of the slider. Each of the actuators is made up of flat coils fixed to the drive and its associated electromagnetic circuits on the underside of the slider. As the range of movement, 2 mm, is tiny, single-phase drive units were employed for the y direction. For the x direction, which extends for 150 mm, a two-phase system was used. The coil currents are commutated to reflect the slider position so that there is an exclusively horizontal slide exerted at every position on the magnetic bridges or, as appropriate, the slider.

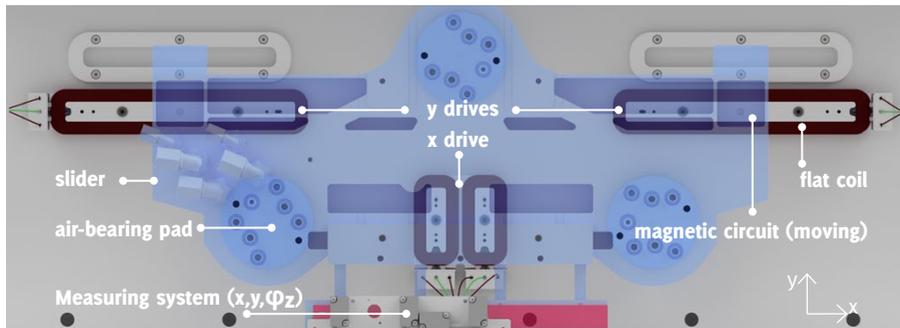


Figure 2: Basic structure of the planar drive (the slider is shown as transparent). Diagram: IMMS.

Guide mechanism

To guide the slider, three special flat air-bearing pads which consume a minimum of air and have a minimum of leaks are used. The compressed air supplied to them enables the pads to create a bearing gap of approx. $5 \mu\text{m}$, i.e. the slider and pads float approx. $5 \mu\text{m}$ above the extremely flat granite stator. It is thus possible for the slider to move in the horizontal level to all effects without friction or vibration or stick-slip. The air from air pads is conducted away through surrounding grooves so that there is no leakage into the vacuum environment.

Measuring system

So that the planar stage can be controlled by closed loop during operation, the movement of the slider in the relevant directions (x , y , φ_z) is measured without contact and with very high accuracy. For this purpose, an optical measuring system made by Heidenhain is used that has as its physical scale a Zerodur-glass-ceramic 1-D-plus scale. This special "ruler" has a linear encoder for both the x and the y direction. Together with three fixed measuring heads, it ensures high-resolution, accurate measurement of movement in all three directions, x , y , φ_z . A fourth measuring head is also present which is used to initialise the rotational position when the motor is started up but is switched off for the duration of the actual measurement operations. This is in order to keep any warming of the system as low as possible.

For the same purpose, a lock-down function was integrated into the drive system. If the measuring task demands it, the slider can be locked down at any position within its travelling range. The air-bearing pads are inactivated appropriately to enable the slider to be "set down" on its stator in a controlled manner. After the air pads, the position control and measuring system are deactivated, so that, for the duration,

the stage is a purely passive system within the measuring space. After any desired period, the system can be reactivated using the stored position measurement data and the slider can again be raised at its lock-down position for operation. This is the lift-up function.

> *fast realtime*

> *ANCONA*

> *INSPECT*

> *ADMONT*

> *PTB*

> *in-ovo*

> *Contents*

* *Funding*

EDP control system

The whole drive system contains not only the drive, its guide and its measuring system but also the control system supporting electronic data processing together with corresponding control algorithms. Separate axis controllers on a PID basis (proportional integral differential) were created for the three degrees of freedom and optimised by means of control path identification. Central state control of the process organises the interaction among all the electronic components: for instance, stopping points, closure valves, pressure monitors and measurement signal monitors. The user can thus operate the system using commands and status queries about positioning that are script-based.

Results and positioning performance

The drive system created has parameter and positioning features as summarised in the following table:

150 mm x 2 mm	Area travelled
max. 10 mm/s	Travel speed in x, y
300 mm/s²	Acceleration of positioning in x, y
2,5 nm	Resolution of measurement in x, y
0,042 μrad	Resolution of measurement φ_z (2,5 nm @ 60 mm sensor offset)
5 kHz	Sampling frequency of control electronics
ca. 25 kg	Mass moved

In Fig. 3, there is a photograph of the drive system on completion, taken at IMMS during commissioning. This took place initially in atmospheric conditions. At this stage a crucial step was the design and implementation of an initialisation procedure that would enable not only the two reference markings on the scale for x and y to be logged as reference but also the degree of rotation of the slider around the vertical axis (φ_z).

Following this, the real-time programs for open- and closed-loop control which had been prepared were transferred into the control electronics and launched. It was now possible to determine the actual features of the movement, such as eigenfre-

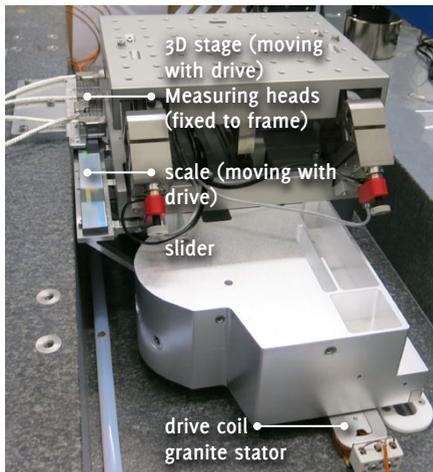


Figure 3: The planar drive system during commissioning at IMMS. Photograph: IMMS.

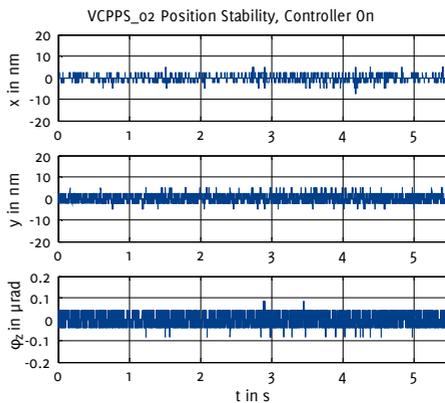


Figure 4: Signals over time from x , y and φ_z positions while under control for setting $(x,y)=(0,0)$. Diagrams: IMMS.

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Contents

* Funding

quency, disturbance and environmental vibration, optimising the closed-loop structure and parameters on the basis of these figures and thus fulfilling the demanding specifications for the positioning features.

Fig. 4 shows the time signals for the x , y and φ_z measurements during operation at lock-down in a defined position and clearly shows how stable the nanometre positioning of the planar drive is. The RMS is below three nanometres. In Fig. 5 there is an example of the position and speeds during movement along the x axis at an intended speed (v) of 1 mm/s. The principle of a direct drive, the minimal disturbance and the optimisation of the control structure and the control parameters all work together to ensure high constancy of speed and extremely low lateral deviation from track, again within the nanometre range.

The main positioning characteristics achieved are listed in the table below:

Scenario	Parameter	Value
Closed-loop control on, lock-down at defined position	RMS in 2D	< 3 nm
Closed-loop control on, travel $v=1$ mm/s	RMS for speed	< 0,5 %
Closed-loop control on, travel $v=1$ mm/s	RMS for deviation from track	< 10 nm
Lock-down of slider at defined position	Deviation of lock-down position	< 0,5 μ m

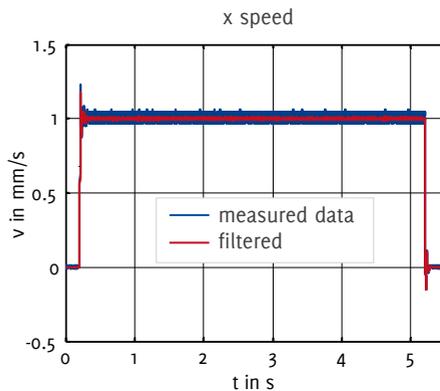
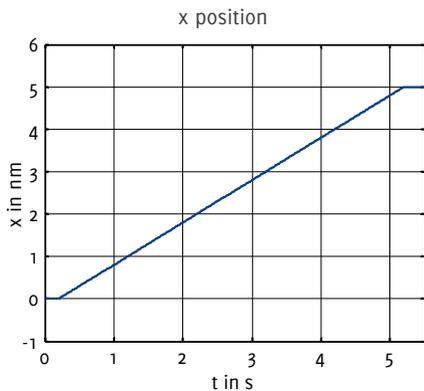


Figure 5: Time signals and speeds during movement on x axis (travel from $x = 0$ mm to $x = 5$ mm, $v_{\text{sol}} = 1$ mm/s, RMS deviation in speed: $4.2 \mu\text{m/s}^*$) $4.2 \mu\text{m/s}^*$ *Filter used for determining speed: bandpass filter with pass up to 200 Hz, stop after 300 Hz. Diagrams: IMMS.

Future prospects

The highly accurate positioning system here presented was commissioned following integration into the complex interferometer testing apparatus as a sub-component in mid-2017 on site at Braunschweig and in intensive collaboration with the Dimensional Nanometrology Department of the PTB. As a result, the PTB now has what is basically necessary for sophisticated systematic investigation of sources of error in laser interferometers. The system has already proved itself very useful in initial experiments and has assisted in identifying sources of error at the sub-nanometre level. The planar drive developed at IMMS is thus making a valuable contribution to the establishment of the calibration standards which will be applied to manufacturing and inspection machinery for the micro-electronics of the coming generation.

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

- 1 C. Weichert, P. Köchert, S. Quabis, J. Flügge: A displacement interferometer for the calibration of the silicon lattice parameter. Proc of 17th EUSPEN, 2017.
- 2 S. Hesse, C. Schäffel, H.-U. Mohr, M. Katzschmann, H.-J. Büchner: Design and performance evaluation of an interferometric controlled planar nanopositioning system. In: Meas. Sci. Technol. 23 074011, doi:10.1088/0957-0233/23/7/074011, 2012.
- 3 C. Weichert, S. Quabis, J. Flügge: A new vacuum setup for fundamental investigations on interferometric length measurements, accepted for 18th EUSPEN, 2018.

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Contents

* Funding

More on actuator systems at www.imms.de.

More on open- and closed-loop controls at www.imms.de.

Projects in the field of high-precision drives: www.imms.de.



PTB –

Hochpräzises Positioniersystem für Maßstäbe der nächsten Mikroelektronik-Generation

Arbeiten am IMMS für die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) für ein nanometergenaues planares Antriebssystem für einen großen Verfahrbereich und den Einsatz im Vakuum. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Ohne Messlatte für Atome kein Hightech der Zukunft

Mikroelektronik begleitet und verändert unseren Alltag. Sie steckt in Smartphones, in der automatisierten und vernetzten Produktion und im Internet der Dinge. Sie wird nicht nur kleiner, sondern enthält immer mehr intelligente Funktionen und damit Strukturen auf einem Chip. In der Halbleiterfertigung müssen daher immer geringere Strukturbreiten beherrscht werden – derzeit sind das zehn Nanometer.

Um Leiterbahnen dieser und künftig geringerer Breite auf einem Chip zu realisieren, müssen moderne Produktions- und Inspektionsanlagen bis in den Subnanometerbereich messen und positionieren können. Längenmaßstäbe oder zweidimensionale Gitterstrukturen dieser Anlagen müssen dafür entsprechend kalibriert werden.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig als technische Oberbehörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und oberste Instanz bei allen Fragen des richtigen und zuverlässigen Messens immer genauere Messverfahren und -einrichtungen als Referenzsysteme zur Vermessung von Kalibrierstandards für solche und unzählige andere Anwendungen.

Antrieb

Für Messeinrichtungen und Kalibrierstandards spielen hochgenaue Wegmessungen per Laserinterferometer eine herausragende Rolle, da sich mit diesen Systemen Messunsicherheiten im Nanometerbereich auch bei vergleichsweise großen Messlängen von mehreren 100 mm erzielen lassen. Die Untersuchung und Optimierung der Eigenschaften von Laserinterferometern, insbesondere der Fehlereinflüsse, sind deshalb ein zentraler Forschungsgegenstand der PTB¹. Dabei stellt unter atmosphärischen Bedingungen die Brechzahländerung der Luft aufgrund von Temperatur, Druck und Feuchte den dominierenden Fehlereinfluss dar, welcher viele andere überdeckt. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen zunehmend im Vakuum durchgeführt.

Für diese anspruchsvollen Forschungsarbeiten wurde seitens der PTB ein hochgenauer planarer Verschiebetisch für einen großen Verfahrbereich und den Einsatz in Vakuumumgebung benötigt. Mit Hilfe dieses Positioniersystems sollen einzelne Komponenten des zu untersuchenden Interferometers nanometergenau positioniert und so definierte, präzise reproduzierbare Messbedingungen geschaffen werden. Hierfür soll der Verschiebetisch eine gleichförmige vibrationsfreie Bewegung über einen Verfahrbereich von 150 mm x 2 mm realisieren und gleichzeitig den Messraum so wenig wie möglich beeinflussen. Besonderes Augenmerk liegt zusätzlich auf der passgenauen Integration in den komplexen Messaufbau innerhalb der Vakuumkammer, der auch eine mitbewegte 3D Positioniereinheit für eine Kurzhubverstellung der z-Position und der horizontalen Kippachsen vorsieht.

Hochpräzises Planarantriebssystem des IMMS arbeitet im Vakuum

Das IMMS hat für diese Aufgabenstellung einen Planarmotor mit optisch inkrementellem Messsystem und aerostatischer Läuferführung entwickelt, siehe Bild 1. Der Antrieb regelt die Läuferposition in der xy-Ebene sowie die Verdrehung um die Hochachse (φ_z) in einem geschlossenen Regelkreis. Die verbleibenden Freiheitsgrade des Läufers, d.h. vertikale (z) sowie Kippbewegungen um die horizontalen Achsen (φ_x , φ_y) werden durch eine planare aerostatische Läuferführung mit drei flachen Luftlagerpads definiert. Der mitbewegte 3D-Verschiebetisch bietet zudem die Möglichkeit, das Messobjekt in diesen Freiheitsgraden in einem kleinen Bewegungsbereich zu positionieren.

Neben der Entwicklung und Realisierung der Hardware des Verschiebetisches erarbeitete das IMMS auch die Regelungsalgorithmen und führte diese mit einer Ablaufsteuerung zu einem in sich geschlossenen 3D-Regelungssystem zusammen. Die

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Inhalt

* Förderung

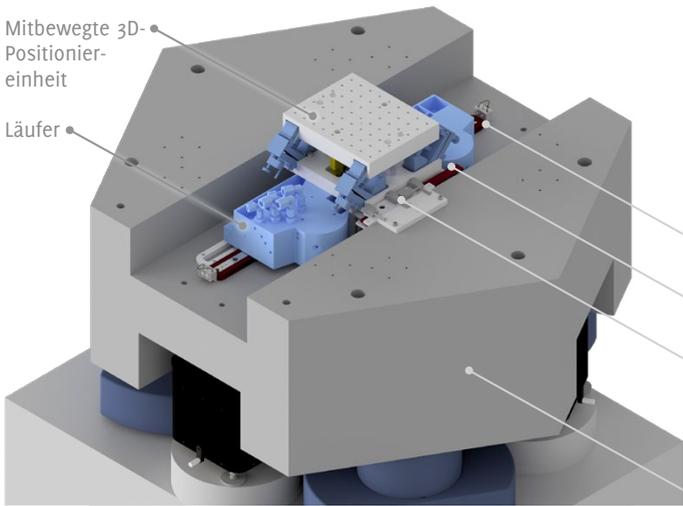


Bild 1:

Hauptkomponenten des planaren Antriebssystems (CAD-Entwurf).
 Grafik: IMMS.

- Antriebsspule
- Maßstab (mitbewegt)
- Gestellfeste Messköpfe des optisch-inkrementellen Messsystems
- Granitstator

- > fast realtime
- > ANCONA
- > INSPECT
- > ADMONT
- > PTB
- > in-ovo
- > Inhalt
- * Förderung

Regelungssoftware wurde auf eine echtzeitfähige Steuerungshardware implementiert, welche als Client mit der übergeordneten Steuerung des Gesamtexperiments kommuniziert. Auf diese Weise wurde das Planarantriebssystem als eigenständiges Subsystem in den Gesamtaufbau integriert. Zusätzlich zur Kernfunktion, das Messobjekt präzise zu positionieren, ermöglicht das neue Antriebssystem auch ein zwischenzeitiges Absetzen des Läufers (Lock-Down) mit anschließender Deaktivierung sämtlicher Systeme, so dass die Beeinflussung der Messumgebung während dieser Zeit noch weiter reduziert wird.

Der Antrieb wird von der PTB seit Mitte 2017 für die beschriebenen Untersuchungen eingesetzt.

Mehr zu Steuerungen und Regelungen auf www.imms.de.

Mehr zur Entwicklung von Aktorsystemen: www.imms.de.

Die Lösung im Detail

Antrieb

Der entwickelten Lösung liegt das Prinzip eines integrierten Mehrkoordinatenantriebes zu Grunde². Hierbei wird, wie in Bild 2 dargestellt, eine planare Antriebsfunktion erzielt, indem mehrere flächig angeordnete lineare Aktoren simultan auf ein und dasselbe bewegte Objekt einwirken. Durch dieses Zusammenspiel der Aktoren kann eine resultierende horizontale Antriebskraft in beliebiger Richtung erzeugt werden, womit sich die x- bzw. y-Position gezielt verändern lässt. Gleichzeitig wird mit den Aktoren ein Drehmoment um die Hochachse erzeugt und so die Gierbewegung kontrolliert, d.h. die Rotation φ_z des Läufers. Jeder Aktor besteht dabei aus gestellfesten Flachspulen und zugehörigen mitbewegten Magnetkreisen an der Unterseite des Läufers. Aufgrund des geringen Verfahrbereiches von 2 mm wurden für die y-Rich-

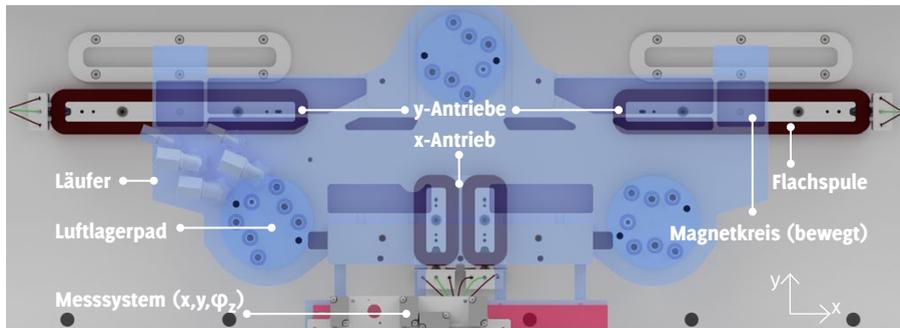


Bild 2: Grundstruktur des planaren Antriebssystems (Läufer transparent dargestellt). Grafik: IMMS.

tion einphasige Antriebseinheiten realisiert. In x-Richtung kommt für die 150 mm Verfahrbereich ein zweiphasiges System zum Einsatz. Auf Basis der Läuferposition werden die Spulenströme hier so kommutiert, dass an jeder Position eine ausschließlich horizontal ausgerichtete Kraft auf die Magnetbrücken bzw. den Läufer wirkt.

Führung

Zur Führung des Läufers werden drei spezielle flache Luftlagerpads mit geringem Luftverbrauch und minimierter Leckage eingesetzt. Mit der zugeführten Druckluft realisieren die Lagerpads einen Tragspalt von ca. 5 μm , d.h. der Läufer mit den Pads schwebt ca. 5 μm über dem hochebenen Stator aus Granit. Er kann sich somit in der horizontalen Ebene praktisch reibungs- und vibrationsfrei und ohne Stick-Slip bewegen. Bei den Lagerpads wird mit Hilfe umgebender Nuten die dem Lager zugeführte Luft wieder abgeführt, so dass sie nicht in die Vakuumumgebung entweicht.

Messsystem

Um den planaren Verschiebetisch im geschlossenen Regelkreis zu betreiben, wird die Bewegung des Läufers in den betreffenden Richtungen x , y , φ_z berührungsfrei und hochgenau gemessen. Zu diesem Zweck ist ein optisch inkrementelles Messsystem von Heidenhain implementiert, dessen Maßverkörperung eine 1D-Plus-Skala aus Zerodur-Glaskeramik darstellt. Dieser spezielle Maßstab verfügt über je ein Linienmuster für die x - und die y -Richtung. Zusammen mit drei gestellfesten Messköpfen wird auf diese Weise die hochauflösende und genaue Messung der x -, y -, φ_z -Bewegung möglich. Weiterhin ist ein vierter Messkopf integriert, der zur Initialisierung der Verdrehposition bei der Inbetriebnahme des Motors zum Einsatz kommt, während des eigentlichen Messbetriebs aber abgeschaltet wird, um den Wärmeeintrag ins System so gering wie möglich zu halten.

Mit dem gleichen Ziel wurde eine Absetzfunktion für den Läufer integriert (Lock-Down). Sofern die Messaufgabe dies erfordert, kann der Läufer an beliebiger Position innerhalb des Verfahrbereiches abgesetzt werden. Hierzu werden die Luftlagerpads definiert außer Funktion genommen, so dass der Läufer kontrolliert auf dem Stator „abgestellt“ wird. Anschließend werden auch die Positionsregelung und das Messsystem deaktiviert. Der Verschiebetisch verbleibt somit als rein passives System im Messraum. Mit Hilfe der zwischengespeicherten Werte der Stellgrößen und Messsysteme kann nach beliebiger Zeit das System wieder reaktiviert und der Läufer an Ort und Stelle wieder angehoben und in Betrieb gesetzt werden (Lift-Up).

> *fast realtime*> *ANCONA*> *INSPECT*> *ADMONT*> *PTB*> *in-ovo*> *Inhalt** *Förderung*

EDV-Steuerungssystem

Neben Antrieb, Führung und Messsystem vervollständigen das Steuerungssystem zur elektronischen Datenverarbeitung und die zugehörigen Regelalgorithmen das Antriebssystem. Für die drei Freiheitsgrade wurden separate Achsregler mit einer Proportional-Integral-Differential-Charakteristik (PID) entworfen und anhand einer Streckenidentifikation optimiert. Eine zentrale Ablaufsteuerung organisiert das Zusammenspiel der Elektronik-Komponenten, wie z.B. der Endstufen, Schaltventile, Druckwächter und der Messsignalüberwachung und ermöglicht dem Nutzer eine skriptbasierte Bedienung über Positionierbefehle und Statusabfragen.

Ergebnisse und Positionierperformance

Die Parameter und Positioniereigenschaften des realisierten Antriebssystems zeigt die folgende Tabelle im Überblick:

150 mm x 2 mm	Verfahrbereich
max. 10 mm/s	Verfahrgeschwindigkeit in x, y
300 mm/s²	Beschleunigung in x, y
2,5 nm	Messauflösung in x, y
0,042 µrad	Messauflösung φ_z (2,5 nm @ 60 mm Basisabstand)
5 kHz	Samplefrequenz der Steuerelektronik
ca. 25 kg	bewegte Masse

Bild 3 zeigt das realisierte Antriebssystem bei der Erstinbetriebnahme am IMMS, die zunächst unter atmosphärischen Bedingungen erfolgte. Ein wesentlicher Schritt hierbei war die Erarbeitung und Implementierung einer Initialisierungsprozedur, die es ermöglicht, mit den zwei auf dem Maßstab vorhandenen Referenzmarken nicht nur die x- und y- Richtung, sondern auch die Verdrehung des Läufers um die Hochachse (φ_z) zu referenzieren.

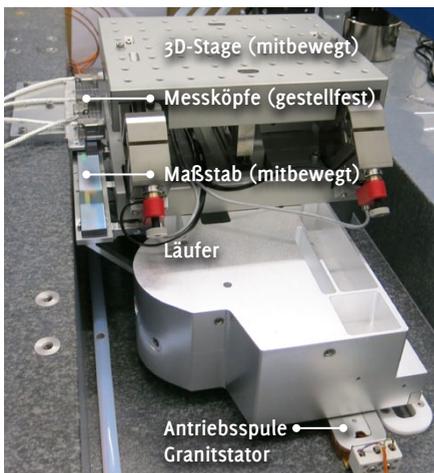


Bild 3: Das entwickelte Planarantriebssystem bei der Inbetriebnahme am IMMS. Foto: IMMS.

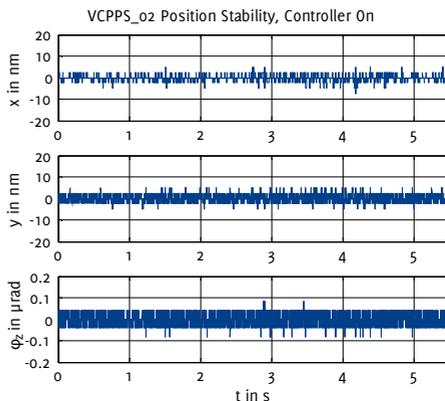


Bild 4: Zeitsignale der x -, y - bzw. φ_2 -Position im geregelten Zustand bei Sollposition $(x,y)=(0,0)$. Grafiken: IMMS.

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Inhalt

* Förderung

Im Anschluss wurden die vorbereiteten Echtzeit-Programme zur Ablaufsteuerung und Regelung auf die Steuerelektronik übertragen und in Betrieb genommen. Nun war es möglich, die realen Streckeneigenschaften, wie z.B. Eigenfrequenzen, Störkräfte und Umgebungsvibrationen, zu ermitteln, auf dieser Basis die Reglerstruktur und die Regelparameter zu optimieren und so die hohen Anforderungen bezüglich der Positioniereigenschaften zu erfüllen.

Bild 4 zeigt die Zeitsignale der x -, y - und φ_2 -Messung im Betrieb beim Stillstand an einer vorgegebenen Position und verdeutlicht die Nanometer-Positionsstabilität des planaren Antriebssystems. Der quadratische Mittelwert der Regelabweichung (RMS) ist hierbei kleiner als 3 Nanometer. Demgegenüber zeigt Bild 5 exemplarisch den Positions- und Geschwindigkeitsverlauf während der Bewegung in x -Richtung mit einer Soll-Geschwindigkeit (v) von 1 mm/s. Das Direktantriebsprinzip, die geringen Störkräfte und die Optimierung von Reglerstruktur und Regelparametern ermöglichen eine sehr gute Geschwindigkeitskonstanz sowie sehr geringe seitliche Bahnabweichungen, die ebenfalls im Nanometerbereich liegen. Die folgende Tabelle fasst die erzielten Positioniereigenschaften zusammen:

Szenario	Parameter	Wert
Regler Ein, Stillstand bei Vorgabeposition	2D-RMS-Regelabweichung	< 3 nm
Regler Ein, Fahrt mit $v=1$ mm/s	RMS-Geschwindigkeitsabweichung	< 0,5 %
Regler Ein, Fahrt mit $v=1$ mm/s	RMS-Bahnabweichung	< 10 nm
Absetzen des Läufers bei Vorgabeposition	Lock-Down Positionsabweichung	< 0,5 μ m

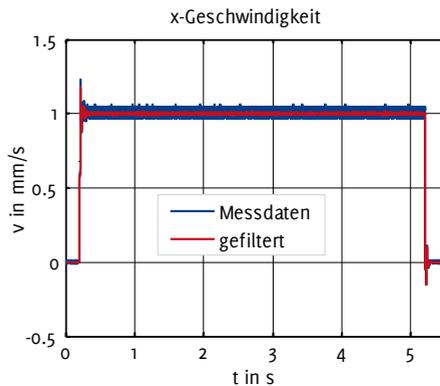
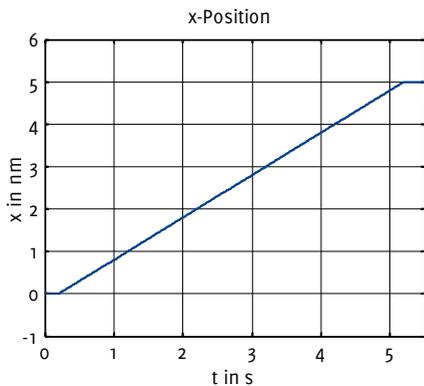


Bild 5: Zeitsignale und Geschwindigkeitsverlauf während der Bewegung in x-Richtung (Fahrt von $x=0$ mm nach $x=5$ mm mit $v_{\text{Soll}}=1$ mm/s, RMS-Geschwindigkeitsabweichung: $4,2 \mu\text{m/s}^*$) *Filter zur Geschwindigkeitsermittlung: Bandpass: Passband bis 200 Hz, Stoppband ab 300 Hz. Grafik: IMMS.

Ausblick

Das hier vorgestellte hochgenaue Positioniersystem wurde am IMMS in enger Zusammenarbeit mit dem Fachbereich „Dimensionelle Nanometrologie“ der PTB entwickelt und Mitte 2017 vor Ort in Braunschweig als Teilkomponente in den komplexen Interferometertestaufbau integriert und in Betrieb genommen. Dies bietet der PTB nun eine leistungsfähige Basis für zukünftige systematische Untersuchungen zu den Fehlereinflüssen bei Laserinterferometern. In ersten Experimenten hierzu hat sich das Antriebssystem bereits sehr gut bewährt und die Identifikation von Fehlereinflüssen auf Subnanometer-Level ermöglicht³. So leistet der am IMMS entwickelte Planarantrieb einen wertvollen Beitrag, um Kalibrierstandards für die Produktions- und Inspektionsanlagen für die Mikroelektronik der nächsten Generation bereitstellen zu können.

Kontakt: Dipl.-Ing. Steffen Hesse, steffen.hesse@imms.de

- 1 C. Weichert, P. Köchert, S. Quabis, J. Flügge: A displacement interferometer for the calibration of the silicon lattice parameter. Proc of 17th EUSPEN, 2017.
- 2 S. Hesse, C. Schäffel, H.-U. Mohr, M. Katzschmann, H.-J. Büchner: Design and performance evaluation of an interferometric controlled planar nanopositioning system. In: Meas. Sci. Technol. 23 074011, doi:10.1088/0957-0233/23/7/074011, 2012.
- 3 C. Weichert, S. Quabis, J. Flügge: A new vacuum setup for fundamental investigations on interferometric length measurements, 18th EUSPEN, 2018.

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Inhalt

* Förderung

Mehr zur Entwicklung von Aktorsystemen: www.imms.de.

Mehr zu Steuerungen und Regelungen auf www.imms.de.

Projekte zu Hochpräzisionsantrieben auf www.imms.de.