

SFB 622 – on the track of the nanometre



To look at even the cell-phones and USB sticks of yesterday and of today is to see how fast technology has developed over recent years. In an ever smaller volume is to be found ever higher computing capacity and/or ever more memory. It is the continuous reduction in the size of the structural elements of electronic chips that makes all this possible. To take one example, the computing core of the current iPhone 5s contains components which at their smallest have dimensions of 28 nanometres. And not only here, in the field of semi-conductors, but also in other high-tech fields such as nano-electronics or materials research, the dimensions of the working parts have come down to the nanometre scale. Likewise, the disciplines of optics, opto-electronics and metrology are now making use of components with permitted tolerances of only a few nanometres for their surface characteristics or general dimensions.

For this development, the trail has been blazed and the necessary preconditions provided by the machinery and instruments in the upstream processes, without which there is no access to the world of the nanometrically possible. Which is why nanopositioning and nanomeasuring machines (NPMs) have been the subject and goal of scientific research. With NPMs, it is possible to position, to measure and even to manipulate a component from the macro-world with the precision and stability that is associated with the nano-world. With Ilmenau University of Technology's Department of Mechatronics among

Figure 1: Of all its knowledge, IMMS has particularly contributed in the SFB 622 its know-how on multi-coordinate drives integrated into nanopositioning systems, as for the PMS100 (illustrated). Photograph: IMMS.

many other of the TU departments, all cooperating in the research project "Nanopositioning and Nanomeasuring Machines" (SFB 622) funded by the German Research Council (DFG), IMMS has helped to push forward nanomeasuring and nanopositioning technology to the physical and technical limits.¹

The work of IMMS on nanopositioning systems acting over long distances of travel has contributed a vital component to the NPMs of the next generation. The Institute's specific and ever-deepening contribution to the research is precision-drive know-how and, above all, expertise in the field of integrated multi-coordinate drives.

To move any component at all with an accuracy at sub-nanometre level is already a most delicate task. To get it to move with the same accuracy over distances of several hundred millimetres is another thing altogether. It was this that presented the particular challenge in this project, for the inevitably expanding dimensions of the drive system, the increased mass to be moved, and, most of all, the reduction in stiffness of the mechanical components all stood in the way of any in the nanometre-scale positioning. Here, integrated multi-coordinate drives offered crucial advantages over the features of conventionally structured systems relying on stacked single axes. The state of the art when the project began was track-

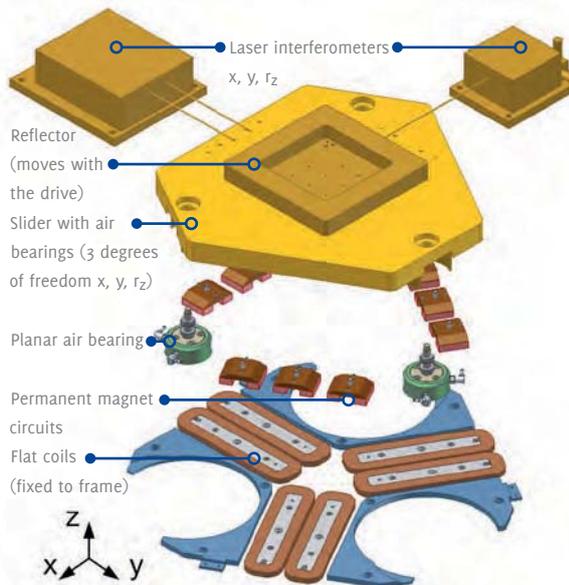


Figure 2: The basic planar drive principle, with the laser measurement system. Diagram: IMMS.

ing error down to $0.2 \mu\text{m}$ using the relevant multi-coordinate drives, accuracy primarily limited by the measuring system used. IMMS managed to develop a method which involved an air-driven planar motor, relying entirely and for the very first time on laser interferometers to measure distance and rotation. The Institute had created the conditions which would enable drive systems of this kind to be installed into a NPMM. The drive's basic principles and vital function groups are shown in Fig. 2.

Precision positioning systems are mostly operated in a closed control loop. The criterion on which the features of positioning system will be judged is the difference between the intended and actual position of the subject of measurement (known as the servo error). For this reason, research concentrated on one central question: how to lay out the individual elements of the direct drive system and combine them into a single whole system so that the servo error will be less than nanometres.

IMMS worked out methods and strategies to answer this question, prototyping one system after another and then checking and improving them by using them in experiments. An outstanding actor in this drama was the PMS100 planar motor which is

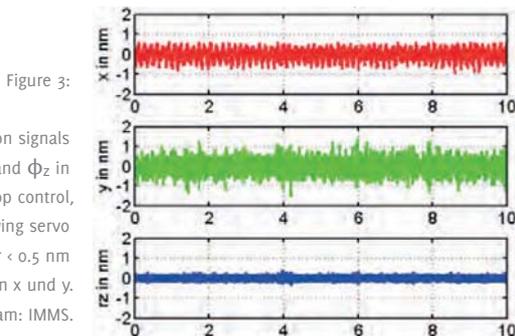


Figure 3: Position signals for x , y and ϕ_z in closed loop control, showing servo error $< 0.5 \text{ nm}$ in x und y . Diagram: IMMS.

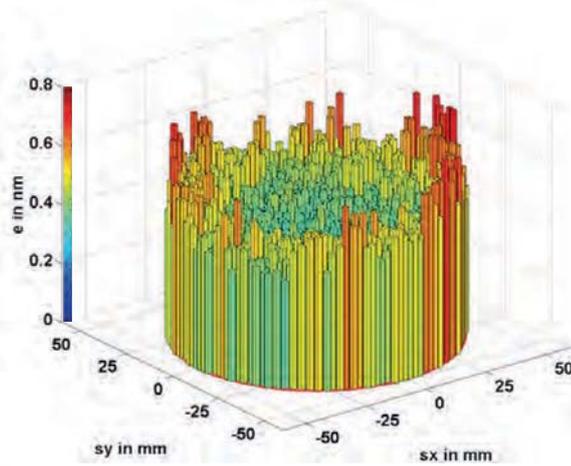


Fig 4: 2D servo error $e_{xy} < 0.7 \text{ nm}$ in the entire area of travel. Graph: IMMS.

pictured in Fig. 1. The set up demonstrates the combination into a nano-positioning system of a multi-coordinate drive (x, y, ϕ_z), an aerostatic guide and laser interferometers for the high-accuracy measurement of distance and angles. The Institute put into practice the knowledge gained, gradually and steadily improving the positioning features until the following values were achieved:

- Area of travel: $\varnothing 100 \text{ mm}$
- Resolution of translatory measurement (x, y): 0.02 nm
- Resolution of rotatory measurement (ϕ_z): 0.1 nrad
- Resolution of positioning in x, y : 0.5 nm
- Positioning velocity: 30 mm/s
- Acceleration: 150 mm/s^2
- Mass moved: 9.6 kg

All the components of a drive system can cause disturbances and they can also be crucial in how well the system can cope with disturbances. It is thus essential to eliminate, or at least to minimise, any sources of error for a NPMM. For each prototype, the contribution of any error (internal or external) to the remaining servo error and the transmission of the errors through the mechanical drive system were analysed. By this means, a weighting was given to the error factors, and those with the greatest influence were targeted for reduction. Typical sources of potential failure include friction, vibrations, noises, temperature (of the environment or of internal components), currents of air (from the air bearing or the air conditioning), converter noise and signal quantification. At this point, it becomes clear that the aerostatic guiding of the slider is crucial to the minimisation of errors because it means that friction and the phenomena associated with it (such as stick-slip, vibrations, and alterations in forces when the direction of travel is changed) are largely avoided. However, in a system which has an aerostatic guiding, the vibration from the air bearings is a major cause of error. IMMS therefore investigated the vibrations from air bearings by means of a prototype. It was shown that



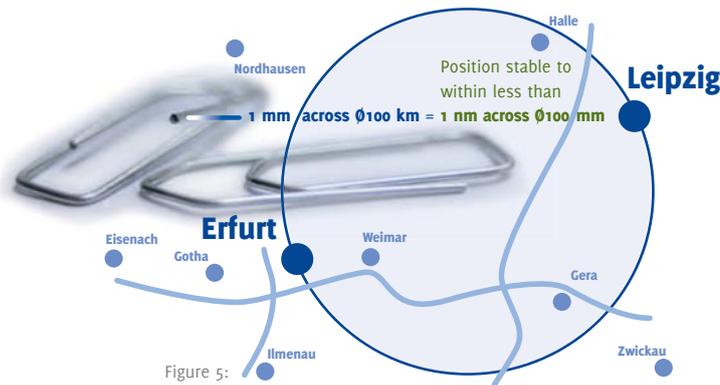


Figure 5: This scale comparison illustrates the stability of position maintained by the system: < 1 nm in an area of 100 mm. Photograph & diagram: IMMS.

the porous air bearing components employed cause vibration only in the sub-nanometre range.²

The other vital step, beside the error analysis, was the optimisation of the transmission with a view to reducing the servo error, firstly to single figures of nanometres and finally to below one nanometre. Fig. 3 shows the positioning signals for the (x, y) position and the rotation around the (z) axis ϕ_z . The servo error (root mean square deviation, RMSD) is: $e_x = 0.22$ nm, $e_y = 0.34$ nm und $e_\phi = 0.10$ nm! Looking at the 2D position in the (x, y) plane, the servo error in 2D is:

$$e_{xy} = \sqrt{(e_x^2 + e_y^2)} = 0,40 \text{ nm.}$$

The great achievement of this drive system is that the excellent positioning stability, down to sub-nanometres, is found across the entire area of travel ($\varnothing 100$ mm), as shown in Fig. 4. Translated into macroscopic terms, the accuracy achieved is as if an object were positioned to an accuracy less than the diameter of a paper-clip in an area of land between Erfurt and Leipzig which has a diameter of 100 km (Fig. 5). That this is possible is due on the one hand to the extremely simple basic structure but even more to the investigation of the effects which are dependent on location within the system and to the fact that these are taken into consideration.

The most important positioning task (beyond reaching and maintaining the destination position) is the scanning, i.e. the exact following of a track. That

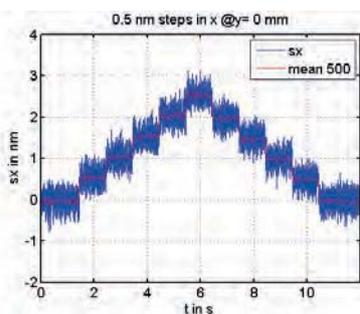


Figure 6: Steps in the x dimension, 5nm wide (blue – raw data, red – filtered). Diagram: IMMS.

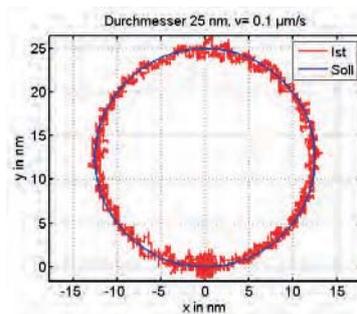


Figure 7: Circuit with diameter of 25 nm (RMSD for tracking error $e_p = 0.5$ nm) Diagram: IMMS.

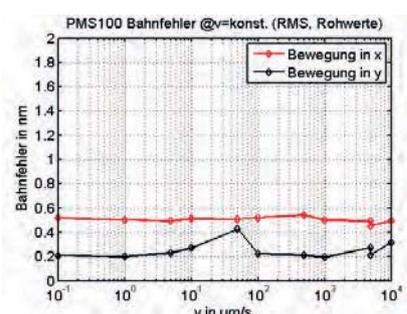


Figure 8: Tracking error during scan at variable velocity (red: movement in the x-, black: movement in the y direction) Diagram: IMMS.

a precision of nanometres, not only at rest, has been achieved is already revealed in the version shown in Fig. 6 with its tiny 0.5-nanometre steps, or the exact circular motion shown in Fig. 7. Finally, Fig. 8 is proof of the extremely small deviation from the track during the scans, at various velocities between 100 nm/s and 10 mm/s. There are two things that can be recognised: firstly, that the RMSD for the track deviation is likewise in the sub-nanometre range. Secondly, this deviation is almost unchanged even when the track velocity is higher, which represents a clear advantage over roller-guided positioning systems in particular.³

The eleven years of research carried out by IMMS have produced the basic drive technology for the nano-positioning and nano-measuring machines of the next generation. The research project on “Nano-positioning and Nanomeasuring Machines” (DFG SFB 622), funded by the German Research Council, was brought to a successful conclusion at Ilmenau University of Technology in June 2013. The results obtained by IMMS were used in the “NPM200 – development and creation of a nano-positioning- and nano-measuring machine with a measured volume of 200 x 200 x 25 mm³” and in the MAG6D (magnetic 6D direct drive) among other projects. The results will also serve as the foundation of further research on the part of IMMS into nano-positioning in future years.

Person to Contact:

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

Bibliography

- 1 G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastlyo, N. Dorozhovets, N. Hoffmann: Nanomeasuring and nanopositioning engineering. In: Proc. SPIE 6280 628001, 2006
- 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 S. Zschäck, S. Hesse, A. Amthor, M. Katzschmann, C. Schäffel, C. Ament: Vergleich der Scan-Performance bei Nanopositioniersystemen mit großem Bewegungsbereich, In: tm – Technisches Messen, Fachartikel angenommen, 2014.

SFB 622 Dem Nanometer auf der Spur



Ein Blick auf Mobiltelefone und USB-Sticks von gestern und heute macht die rasante technologische Entwicklung der letzten Jahre deutlich. Immer mehr Rechenleistung bzw. mehr Speicherkapazität wird in einem immer kleineren Volumen realisiert. Möglich wird dies durch stetig kleiner werdende elementare Strukturen der Elektronikchips. Beim Rechenkern des aktuellen iPhone 5s beispielweise liegen die Abmessungen der kleinsten Bauteile heute bei 28 Nanometern. Jedoch nicht nur in der Halbleiterindustrie, auch in anderen HighTech-Bereichen wie der Nanoelektronik oder der Werkstoffforschung haben die Funktionselemente nur noch Abmessungen im Nanometerbereich. Ebenso werden in der Optik, Optoelektronik und der Metrologie Bauteile mit zulässigen Maß- und Oberflächentoleranzen von wenigen Nanometern eingesetzt.

Wegbereiter und Voraussetzung für diese Entwicklung sind die Maschinen und die technologische Ausstattung, die in vorgelagerten Prozessen zum Einsatz kommen und erst den Zugang zur Welt der Nanometer ermöglichen. Aus diesem Grund erforschten Wissenschaftler im Sonderforschungsbereich (SFB) 622 die wissenschaftlichen Grundlagen für die Realisierung von „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ (NPMs). Solche Maschinen sind in der Lage, ein Bauteil aus der Makrowelt mit einer Präzision und Stabilität von Nanometern zu positionieren, zu vermessen und auch zu manipulieren. In dem von der DFG geförderten Forschungsprojekt arbeitete das

Bild 1: Das IMMS hat in den SFB 622 v.a. sein Know-how zu integrierten Mehrkoordinatenantrieben in die Entwicklung von Nanopositioniersystemen eingebracht, wie für das abgebildete PMS100. Foto: IMMS.

IMMS gemeinsam mit dem Fachgebiet Mechatronik und einer Vielzahl anderer Fachgebiete der TU Ilmenau daran, die Nanomess- und Nanopositioniertechnik bis in die physikalisch-technischen Grenzbereiche voranzutreiben.¹

Das IMMS lieferte mit seinen im Folgenden beschriebenen Arbeiten zu Nanopositioniersystemen für große Bewegungsbereiche einen wichtigen Baustein für die NPMs der nächsten Generation. Dabei konnte das IMMS sein Know-how in der Präzisionsantriebstechnik und vor allem die Expertise auf dem Gebiet der integrierten Mehrkoordinatenantriebe in die Forschungsarbeiten einbringen und vertiefen.

Ein Bauteil subnanometergenau zu bewegen, ist bereits eine anspruchsvolle Aufgabe. Dies jedoch in großen Verfahrbereichen von einigen hundert Millimetern zu ermöglichen, stellt eine völlig neue Qualität dar. Darin lag die besondere Herausforderung bei diesem Projekt, denn die zwangsweise anwachsenden Abmessungen des Antriebssystems, die höhere bewegte Masse und vor allem auch die verringerte Steifigkeit der mechanischen Komponenten standen zunächst einer Positionierung im Nanometerbereich entgegen. An dieser Stelle boten integrierte Mehrkoordinatenantriebe entscheidende Vorteile gegenüber konventionell strukturierten Systemen mit gestapelten Einzelachsen. Zu Projektbeginn erreichten dem

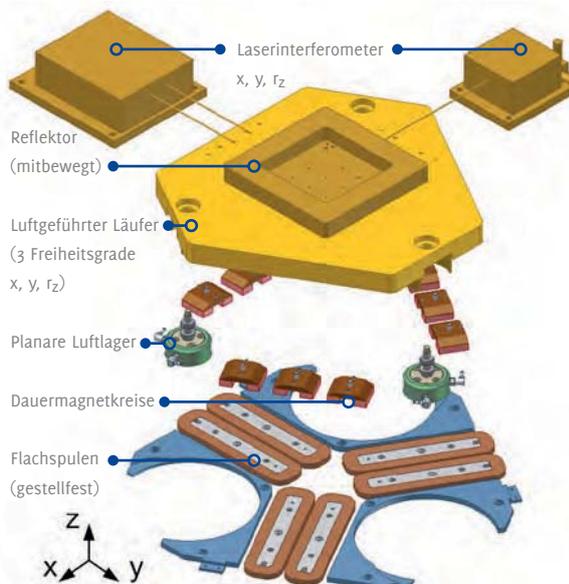


Bild 2: Grundprinzip Planarmotor mit Lasermesssystem. Grafik: IMMS.

Stand der Technik entsprechende Mehrkoordinatenantriebe Bahngenaugigkeiten von bis zu $0,2 \mu\text{m}$, die hauptsächlich durch das eingesetzte Messsystem begrenzt wurden. Das IMMS hat eine Lösung entwickelt, mit der ein luftgeführter Planarmotor erstmals ausschließlich mit Laserinterferometern als Weg- und Winkelmesssystem betrieben wird. Das Institut hat damit die Voraussetzungen geschaffen, um solche Antriebssysteme in einer NPMM einsetzen zu können. Das Grundprinzip des Antriebs und die entscheidenden Funktionsgruppen hierzu sind in Bild 2 dargestellt.

Präzisionspositioniersysteme arbeiten meist in einem geschlossenen Regelkreis. Der Unterschied zwischen der Soll- und Istposition des Messobjektes, die sogenannte Regelabweichung, ist das entscheidende Kriterium, mit dem die Eigenschaften des Positioniersystems beurteilt werden. Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich daher auf die zentrale Frage, wie die einzelnen Komponenten des Direktantriebssystems gestaltet und zu einem Gesamtsystem verbunden werden müssen, um die Regelabweichung bis in den Subnanometerbereich zu reduzieren.

Das IMMS hat als Antwort auf diese Fragestellung Methoden und Strategien erarbeitet und diese immer wieder durch den Aufbau von Demonstratoren praktisch umgesetzt sowie durch deren experimentelle

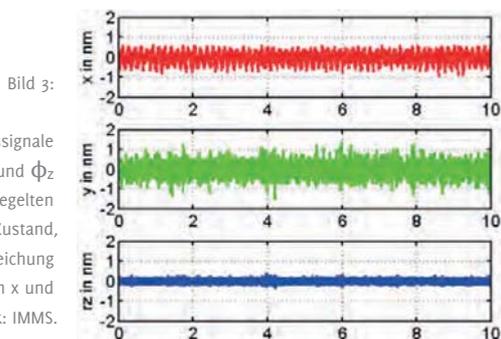


Bild 3: Positionssignale für x , y und ϕ_z im geregelten Zustand, Regelabweichung $< 0,5 \text{ nm}$ in x und y . Grafik: IMMS.

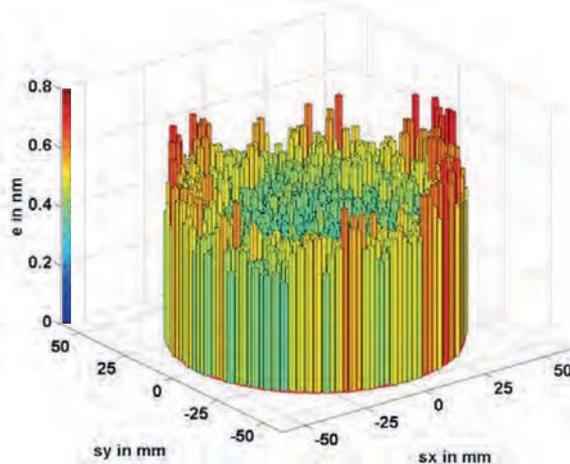


Bild 4: 2D-Regelabweichung $e_{xy} < 0,7 \text{ nm}$ im gesamten Verfahrensbereich. Grafik: IMMS.

Untersuchung überprüft und verbessert. Eine herausragende Rolle nimmt dabei der Planarmotordemonstrator PMS100 ein, der in Bild 1 dargestellt ist. Dieser Aufbau demonstriert die Kombination von Mehrkoordinatendirektantrieb (x, y, ϕ_z), aerostatischer Läuferführung und hochgenauer Weg- und Winkelmessung mittels Laserinterferometer zu einem Nanopositioniersystem. Die gewonnenen Erkenntnisse hat das Institut umgesetzt und die Positioniereigenschaften schrittweise immer weiter auf die folgenden Werte verbessert:

- Bewegungsbereich: $\emptyset 100 \text{ mm}$
- Messauflösung für die Translation (x, y): $0,02 \text{ nm}$
- Messauflösung für die Rotation (ϕ_z): $0,1 \text{ nrad}$
- Positionierauflösung in x, y : $0,5 \text{ nm}$
- Verfahrensgeschwindigkeit: 30 mm/s
- Beschleunigung: 150 mm/s^2
- Bewegte Masse: $9,6 \text{ kg}$.

Sämtliche Komponenten eines Antriebssystems können Störungen verursachen bzw. entscheidend dafür sein, wie gut das System Störungen ausregeln kann. Für eine NPMM ist es daher essentiell, Störquellen zu eliminieren oder zu minimieren. Durch eine genaue Analyse der externen und internen Störungen sowie ihrer Übertragung innerhalb des mechatronischen Antriebssystems wurde der Beitrag der jeweiligen Störung zur verbleibenden Regelabweichung ermittelt. Auf diese Weise konnten die Störungen gewichtet und gezielt diejenigen mit dem größten Einfluss reduziert werden. Als typische Störquellen sind u.a. Reibung, Vibrationen, Schall, Temperatur von Umgebung bzw. internen Komponenten, Luftströmung aus Luftlagern und Klimatisierung, Wandlerrauschen und die Signalquantisierung zu nennen. An dieser Stelle zeigt sich, dass die aerostatische Läuferführung bereits eine entscheidende Maßnahme zur Störungsminimierung darstellt, weil dadurch Reibung und damit verbundene Phänomene, wie Stick-Slip, Vibrationen, Kraftänderungen bei Bewegungsumkehr etc., weitgehend vermieden werden. Jedoch sind in einem aerostatisch geführten System die Vibrationen der Luftlager eine



Bild 5: Der Größenvergleich illustriert die Positionsstabilität des Systems von < 1 nm für Verfahrbereiche von $\varnothing 100$ mm. Foto und Grafik: IMMS.

Hauptursache von Störungen. Die Luftlagerschwingungen hat das IMMS daher anhand des Demonstrators untersucht. Es konnte nachweisen, dass die eingesetzten porösen Luftlagerelemente lediglich Vibrationen im Subnanometerbereich verursachen.²

Neben der Analyse von Störungen bildete die Optimierung des Übertragungsverhaltens den entscheidenden Schritt, um die Regelabweichung zunächst in den einstelligen Nanometerbereich und schließlich bis unterhalb von einem Nanometer zu senken. Bild 3 zeigt die Positionssignale für die x-, y-Position und die Rotation um die z-Achse ϕ_z . Die Regelabweichung (RMS) beträgt: $e_x = 0,22$ nm, $e_y = 0,34$ nm und $e_\phi = 0,10$ nm! Betrachtet man die 2D-Position in der x-y-Ebene, so beträgt die 2D-Regelabweichung:

$$e_{xy} = \sqrt{(e_x^2 + e_y^2)} = 0,40 \text{ nm.}$$

Die besondere Leistung des Antriebssystems liegt darin, dass diese exzellente Positionsstabilität im Subnanometerbereich innerhalb des gesamten Verfahrbereichs von $\varnothing 100$ mm realisiert wird, siehe Bild 4. In makroskopische Dimensionen übertragen, könnte man mit einem derart genauen System ein Objekt an jedem beliebigen Ort innerhalb eines 100 km großen Durchmessers zwischen Erfurt und Leipzig positionieren und würde dabei weniger als den Durchmesser einer Büroklammer vom Ziel abweichen (Bild 5). Möglich wird das einerseits durch die vorteilhafte äußerst einfache Grundstruktur, aber vor allem auch durch die Untersuchung und Berücksichtigung der ortsabhängigen Effekte innerhalb des Systems.

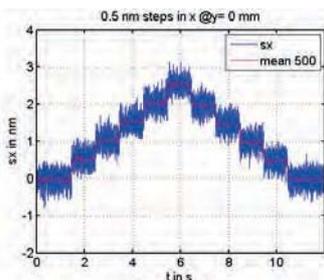


Bild 6: Schritte mit 0,5 nm Schrittweite in x (blau: Rohdaten, rot: gefiltert). Grafik: IMMS.

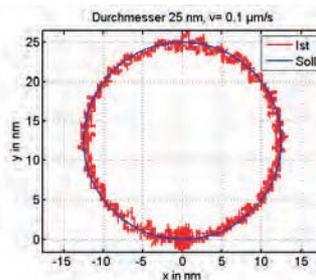


Bild 7: Kreisfahrt mit 25 nm Durchmesser (RMS Bahnabweichung $e_p = 0,5$ nm). Grafik: IMMS.

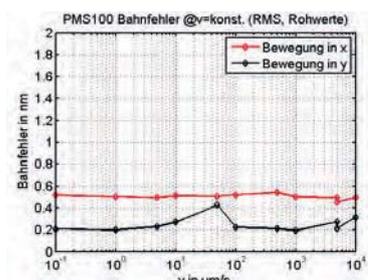


Bild 8: Bahnfehler beim Scan mit variabler Geschwindigkeit (rot: Bewegung in x-, schwarz: Bewegung in y-Richtung). Grafik: IMMS.

Neben dem Einnehmen und Halten der Zielposition ist das „Scannen“, also das exakte Abfahren einer Bahn, die wichtigste Positionieraufgabe. Dass nicht nur im Stillstand Nanometerpräzision erzielt wird, verdeutlicht bereits die in Bild 6 gezeigte Ausführung von 0,5 nm kleinen Schritten oder die in Bild 7 dargestellte exakte Kreisfahrt mit $\varnothing 25$ Nanometer. Bild 8 schließlich belegt die äußerst geringe Bahnabweichung bei Scans mit verschiedenen Geschwindigkeiten von 100 nm/s bis zu 10 mm/s. Zwei Dinge sind erkennbar: Zum einen liegt die Bahnabweichung (RMS-Wert) ebenfalls im Subnanometerbereich. Zum anderen ist sie auch für höhere Bahngeschwindigkeiten nahezu unverändert, was insbesondere gegenüber wälzgeführten Positioniersystemen einen Vorteil darstellt.³

In elfjähriger Forschungsarbeit lieferte das IMMS die antriebstechnische Basis für Nanopositionier- und Nanomessmaschinen der nächsten Generation. Der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Sonderforschungsbereich SFB 622 wurde an der TU Ilmenau im Juni 2013 erfolgreich abgeschlossen. Die Erkenntnisse des IMMS flossen unter anderem in die Projekte „NPMM200 Entwicklung und Realisierung einer Nanopositionier- und Nanomessmaschine mit 200 x 200 x 25 mm³ Messvolumen“ und „Magnetischer 6D-Direktantrieb MAG6D“ ein. Sie bilden zudem die Grundlage für die vertiefende Forschung des IMMS auf dem Gebiet der Nanopositionierung in den kommenden Jahren.

Kontakt:

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

Literatur

- 1 G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastlylo, N. Dorozhovets, N. Hoffmann: Nanomeasuring and nanopositioning engineering. In: Proc. SPIE 6280 628001, 2006
- 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 S. Zschäck, S. Hesse, A. Amthor, M. Katzschmann, C. Schäffel, C. Ament: Vergleich der Scan-Performance bei Nanopositioniersystemen mit großem Bewegungsbereich, In: tm – Technisches Messen, Fachartikel angenommen, 2014.