



IMMS

INSTITUT FÜR MIKROELEKTRONIK- UND
MECHATRONIK-SYSTEME GEMEINNÜTZIGE GMBH

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Entwicklung kraftgekoppelter Hochpräzisions-Vertikalantriebe

Dr.-Ing. Ludwig Herzog

- Institutsvorstellung und Motivation
- Systemüberblick planare Nanopositionierer
- Anforderungen und Herausforderungen bei Vertikal-Aktoren
- Lösungsansätze und -Diskussion
- Performance-Überblick



Wir bringen Forschungsergebnisse in die Anwendung: IMMS als F&E- und Transferpartner





ILMENAU

Institutszentrale

in der unmittelbaren Nähe der
Technischen Universität Ilmenau:

**Mechatronik, System Design, Industrielle
Elektronik und Messtechnik**



ERFURT

Institutsteil

in **Erfurt-Südost** – dem Zentrum der Mikroelektronik
Thüringens: **Mikroelektronik**



Integrierte Sensorsysteme

- CMOS-basierte Biosensoren
- ULP-Sensorsysteme
- KI-basierte Entwurfs- und Testautomatisierung



Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

- Analyse von verteilten IoT-Systemen
- Eingebettete KI
- Echtzeit-Datenverarbeitung und -kommunikation
- Modulare und mobile Testsysteme



Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

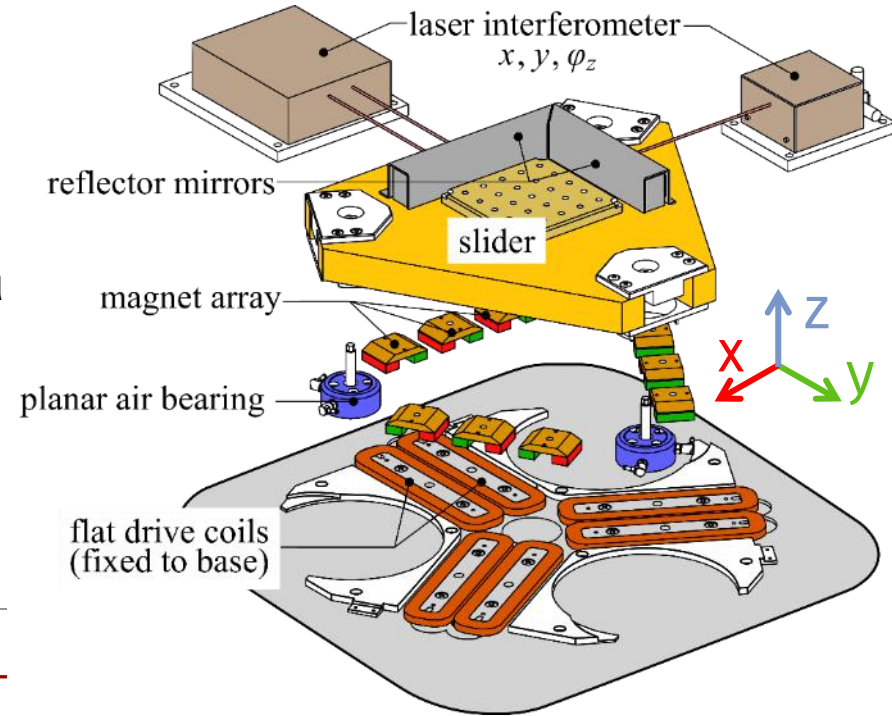
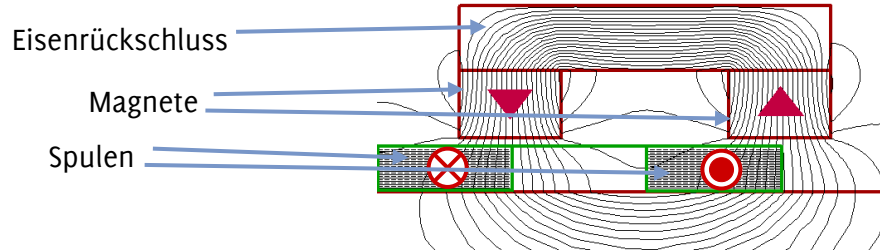
- Sensor-Aktor-Konzepte
- Regelung
- Temperierung, Vakuumeinsatz
- streufeldarmes Design

Prinzip Elektrodynamische Planare Direktantriebe

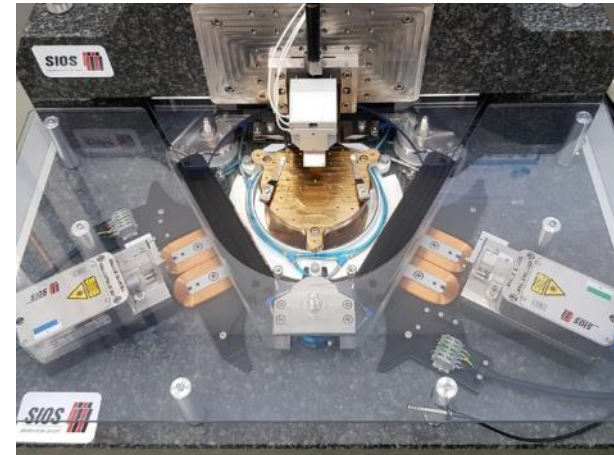
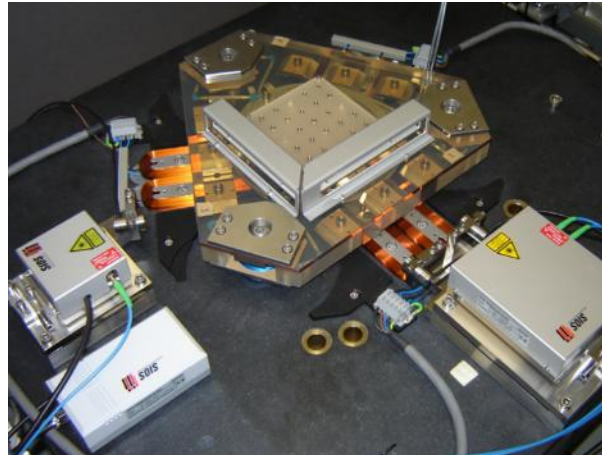
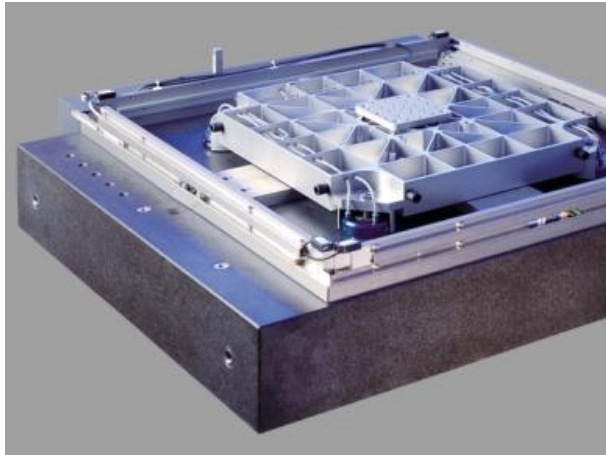
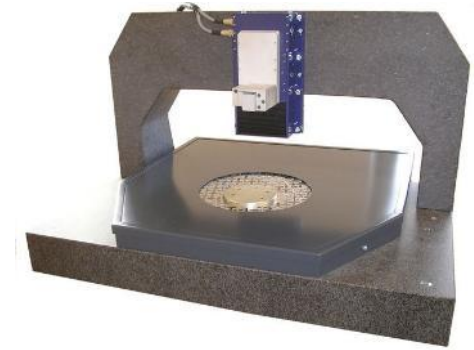
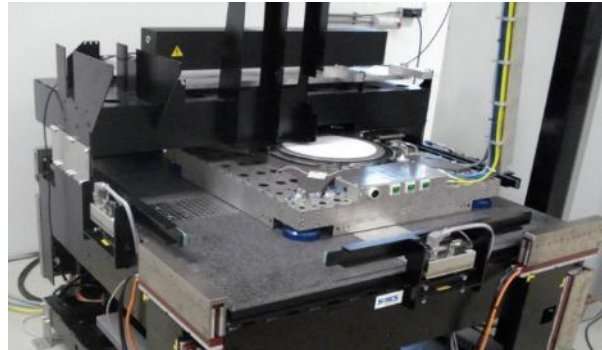
Kernkomponenten:

- Elektrodynamische Direktantriebe (3 x 2 Phasen)
- Planare aerostatische Luftlager
- x, y, rz – Messung mittels Laserinterferometern
- Monolithischer Läufer mit fest verbundenen Reflektoren

- Mechanisch einfacher Aufbau
- Hohe Steifigkeit durch Vermeidung jeglicher Übertragungsmittel
- Antriebsangriff und Messsystem nah am Abbe-Prinzip
- Kombination aus hoher Dynamik und hoher Präzision



Anwendungsbeispiele 3D-Planarsysteme



Wozu vertikale Präzisionsantriebe?

- Fabrikation: Werkzeugzustellung, Höhenausgleich
- Analyse: Fokussierung, Höhenausgleich, Messbereichs-Nachführung
- Freiheitsgrade: mehrere Vertikal-Aktoren verkoppelt erlauben Rotation um horizontale Achsen

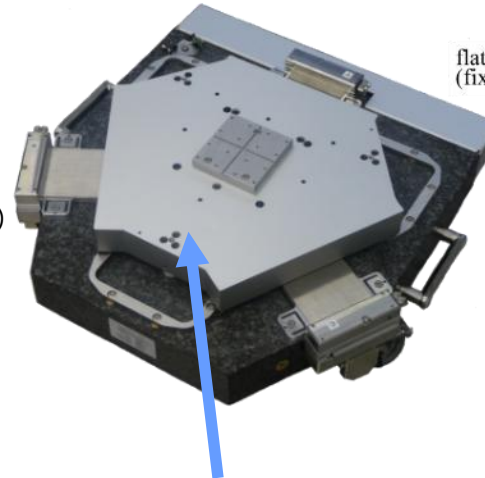
Anforderungen und Herausforderungen

Anforderungen:

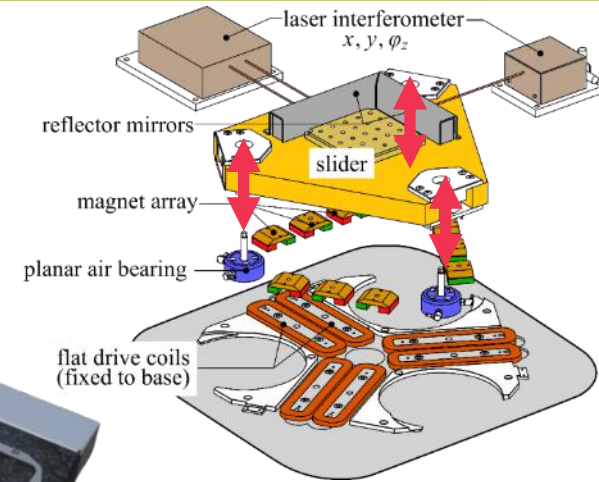
- Rein kraftgekoppeltes (berührungsloses) System
- Beibehaltung der Vorteile des planaren Ansatzes
- Erreichen makroskopischer Bewegungsbereiche bei gleichzeitig (sub-)Nanometer-Positioniergenauigkeit

Herausforderungen:

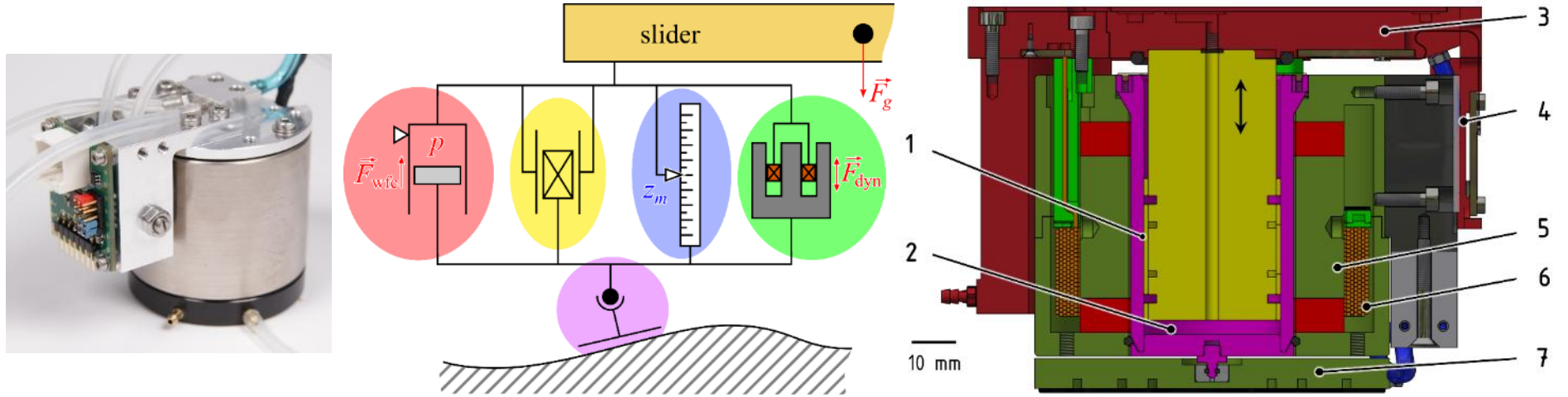
- Energieeffizienz (fordert Gewichtskraftkompensation)
- Integrierbarkeit (Package)
- Erhalten der planaren Positionierperformance
- Fail-Safe-Funktionen
- Fernhalten und Vermeiden Aktor-induzierter Störungen



(Teil-)Lösung Mag6D



Funktionsbestandteile Lifting Actuation Unit (LAU)



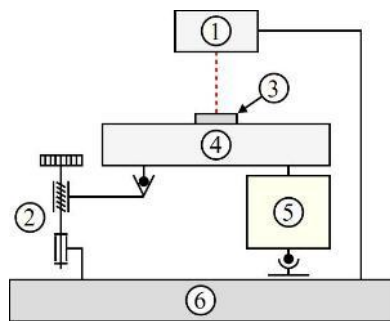
Herausforderungen:

- **Energieeffizienz** (fordert Gewichtskraftkompensation)
- **Integrierbarkeit** (Package)
- Erhalten der planaren Positionierperformance
- Fail-Safe-Funktionen
- **Fernhalten und Vermeiden Aktor-induzierter Störungen**

- | | |
|--|-------------------------|
| 1) Luftlager als Vertikalführung | 4) Absolut-Encoder |
| 2) Druckkammer des Pneumatik-Aktors | 5) Voice-Coil-Eisenkern |
| 3) Bewegtes Teil / Anbindung an den Läufer | 6) Voice-Coil-Wicklung |
| | 7) Planares Luftlager |

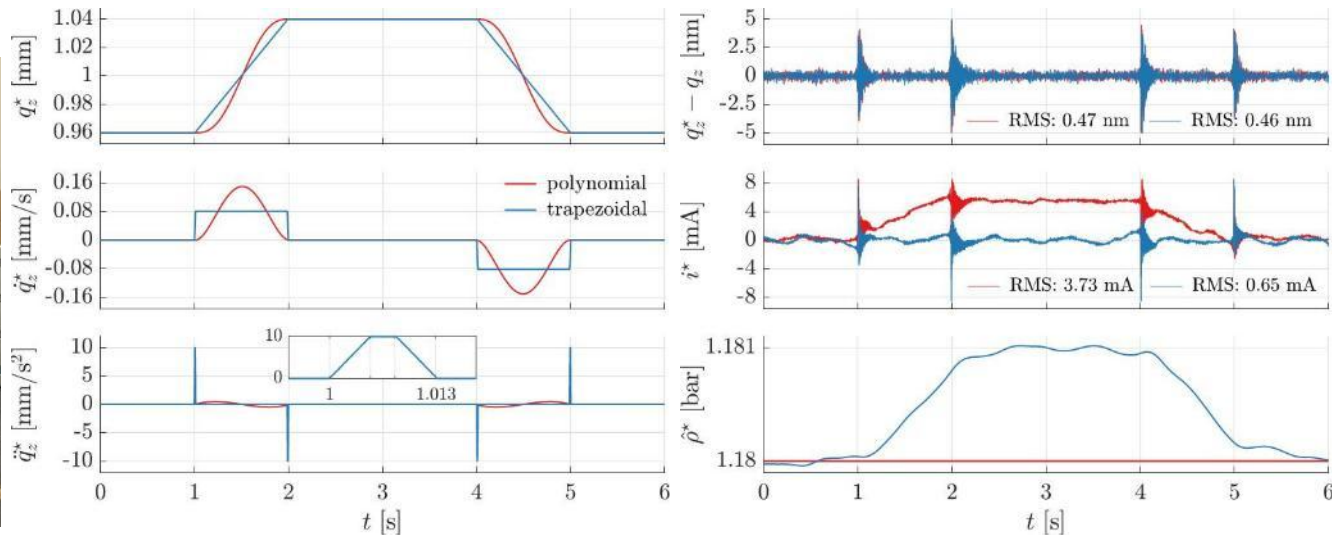
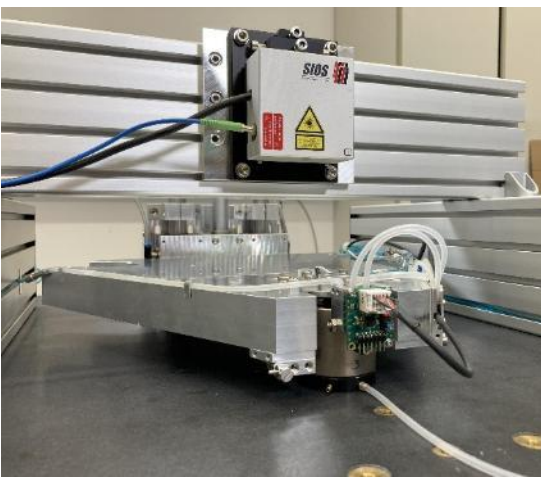
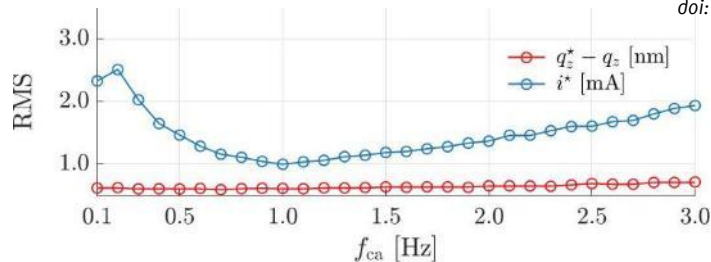
doi: 10.3390/app14166972

- 1) Interferometer
- 2) Passiver Support
- 3) Spiegel
- 4) Läufer
- 5) LAU10
- 6) Stator



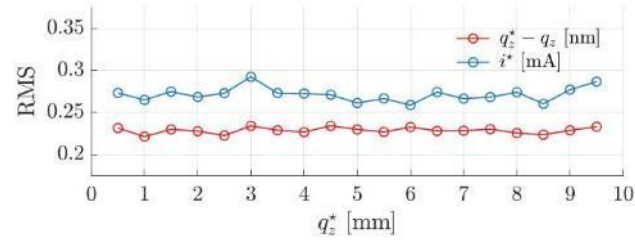
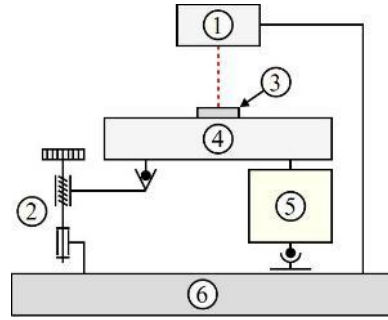
doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9966103

doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9965993



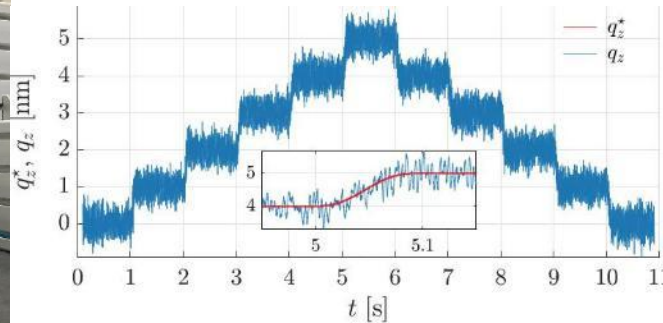
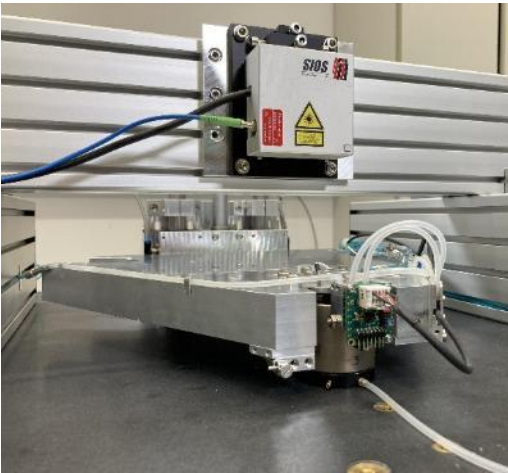
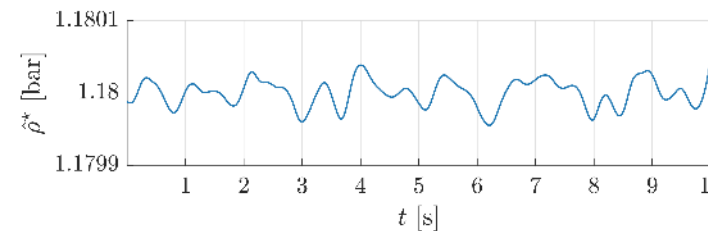
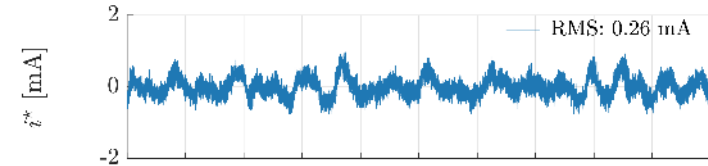
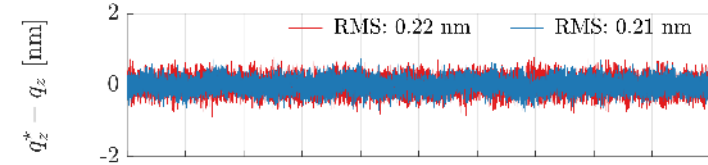
Performance LAU10

- 1) Interferometer
- 2) Passiver Support
- 3) Spiegel
- 4) Läufer
- 5) LAU10
- 6) Stator

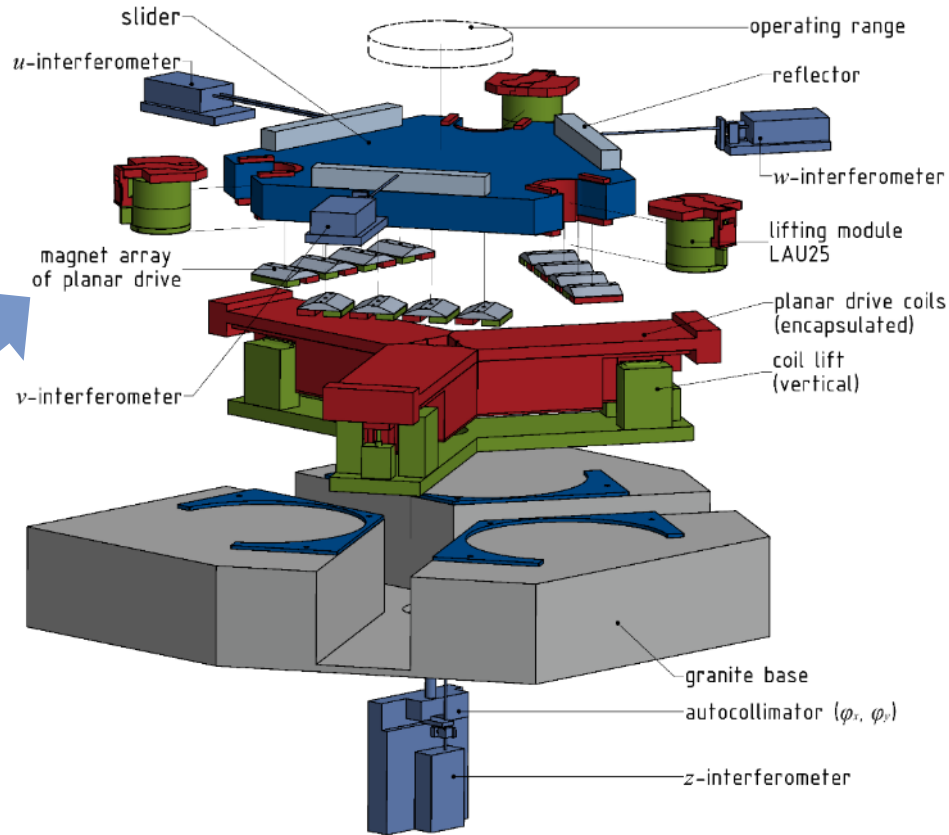


doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9966103

doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9965993



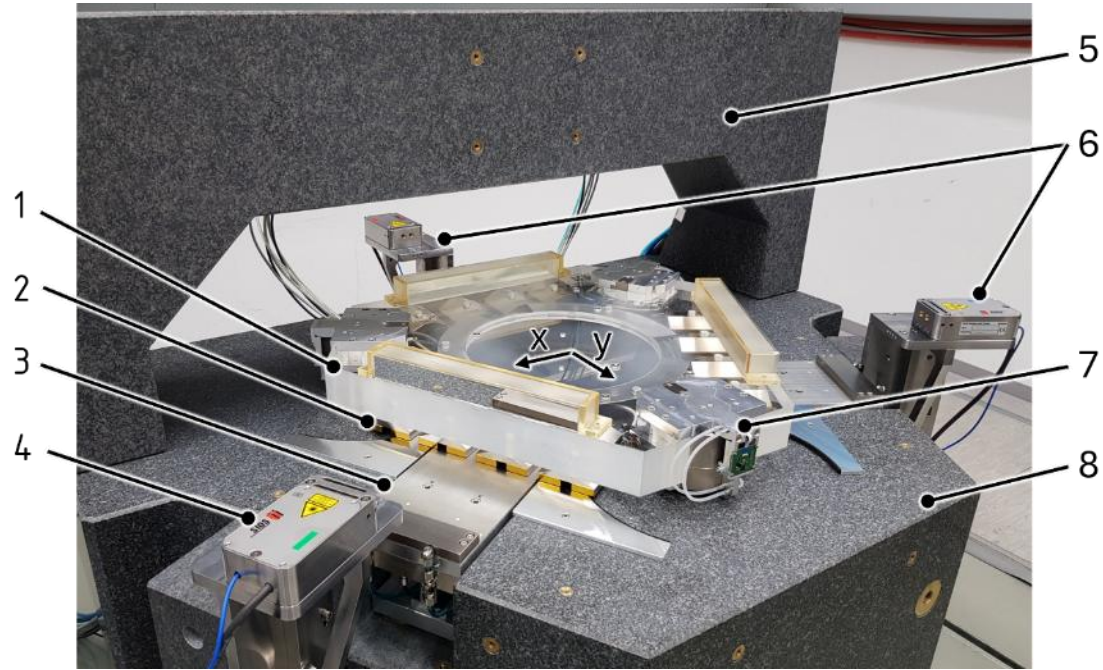
Transfer LAU10 → LAU25 → NPS6D200



doi: 10.3390/app14166972

NPS6D200 – Nano-Positionier-System mit 6DoF und 200 mm planarem Bewegungsbereich

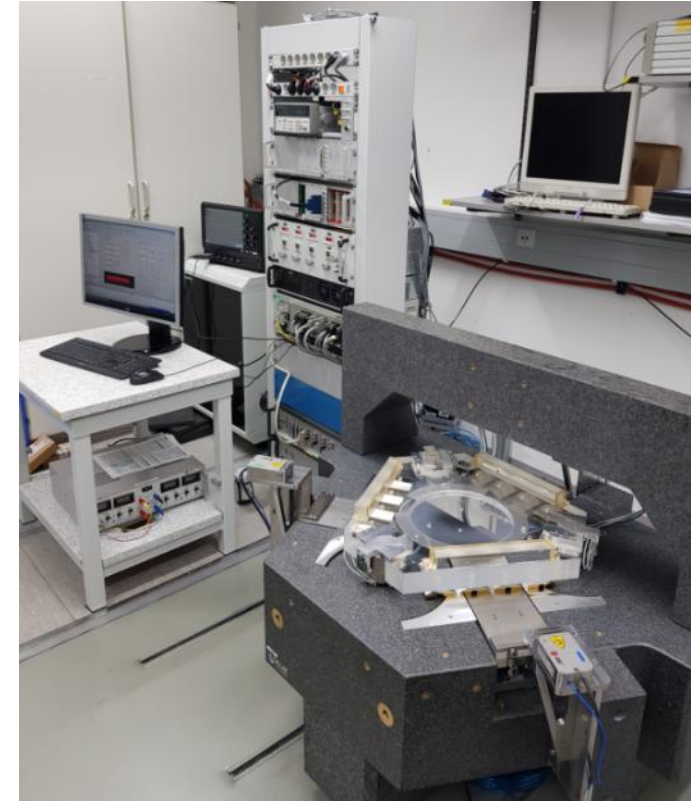
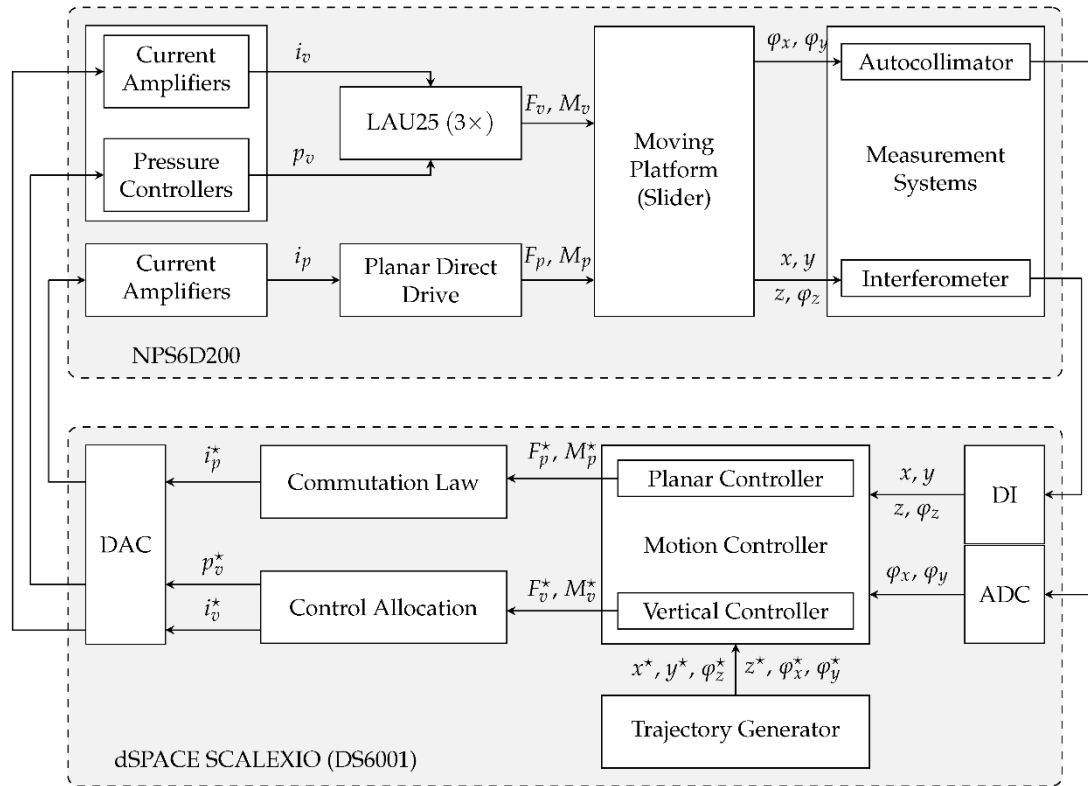
- 1) Läufer mit Spiegeln
- 2) Magnete des Planarantriebs
- 3) Spulen des Planarantriebs, vertikal nachführbar
- 4) Laserinterferometer
- 5) Hartstein-Portal mit Aufnahme für Antastsysteme
- 6) Laserinterferometer
- 7) Hubmodul LAU25
- 8) Hartstein-Basis



doi: 10.3390/app14166972

<https://www.youtube.com/watch?v=r3PK082sfvs>

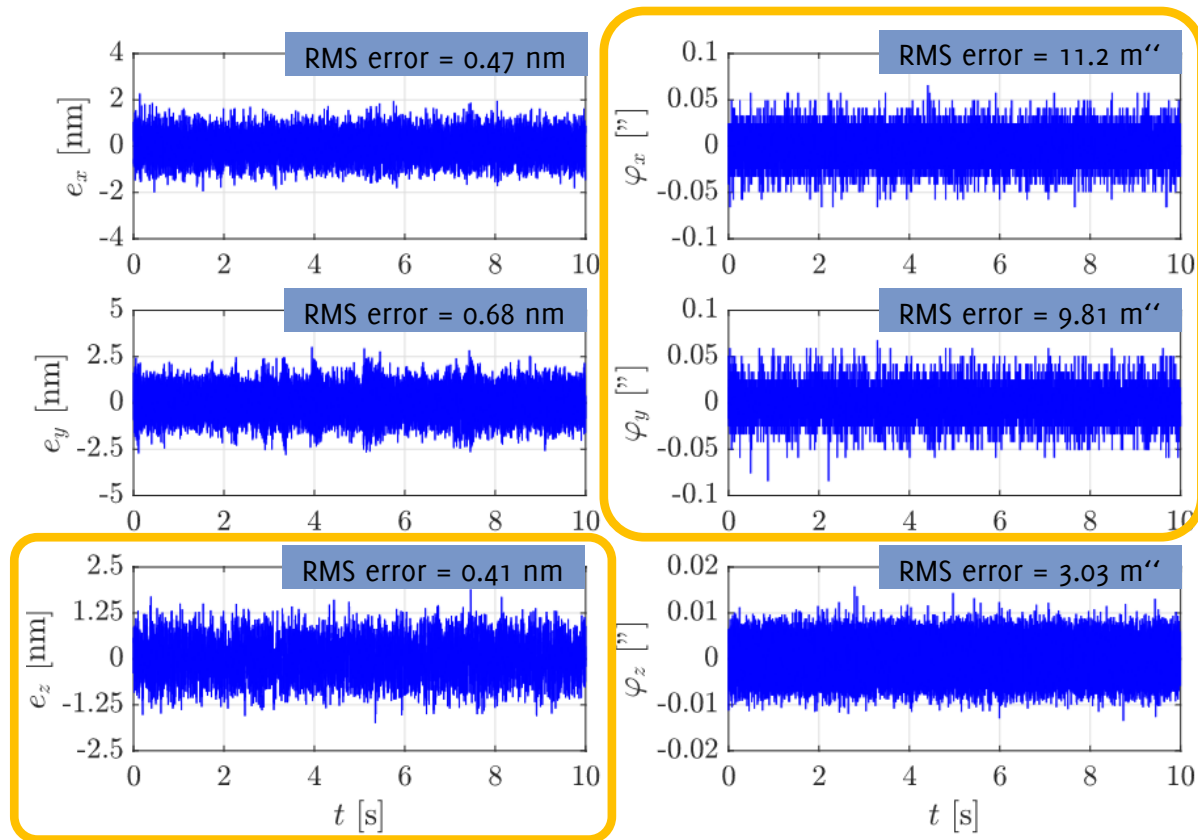
NPS6D200 – Regler-Struktur und -Hardware



doi: 10.3390/app14166972

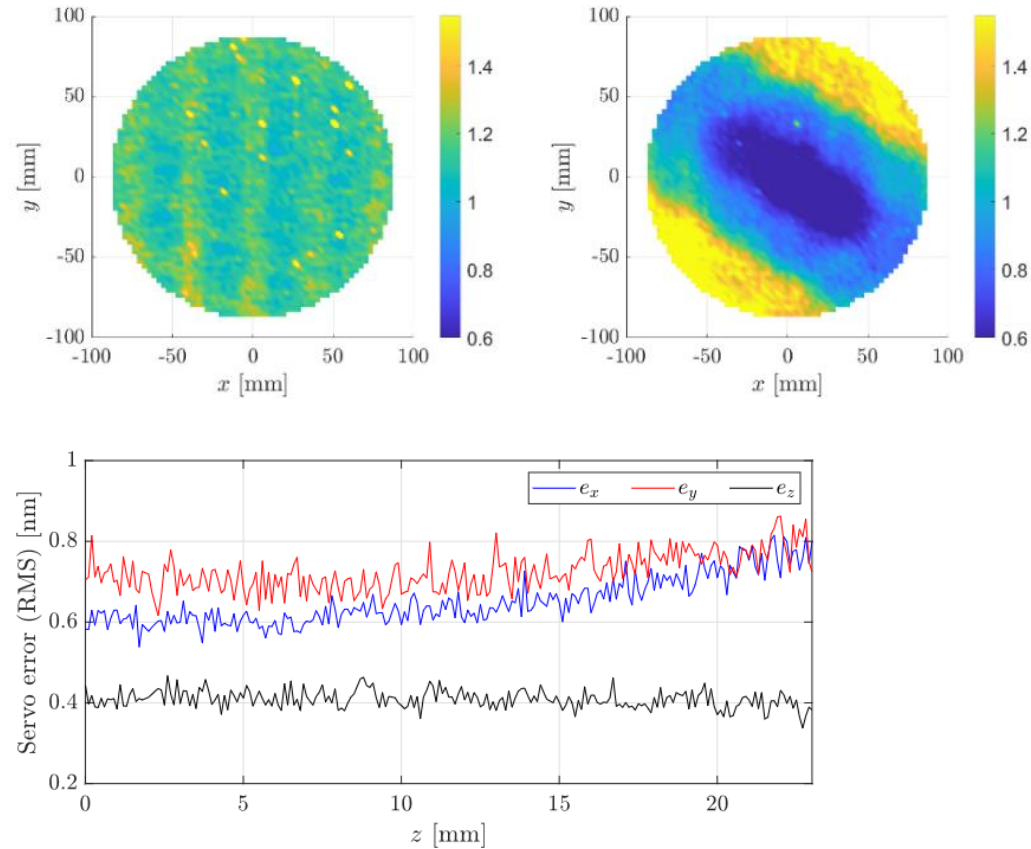
NPS6D200 – allgemeine Daten und steady-state closed-loop Regelperformance

- $\emptyset$ 200 mm planarer Bewegungsbereich
- 25 mm vertikaler Bewegungsbereich
- ~ 30 Bogensekunden / $150 \mu\text{rad}$ $r_x r_y r_z$
Winkelaktuierung möglich
- 50 mm/s planare Geschwindigkeit
- 2 mm/s vertikale Geschwindigkeit
- 250 mm/s^2 Beschleunigung
- 36 kg bewegte Masse, Nutzlast 5 kg
- RMS servo error (alle DOFs, gesamter Bewegungsbereich) $< 1.5 \text{ nm}$



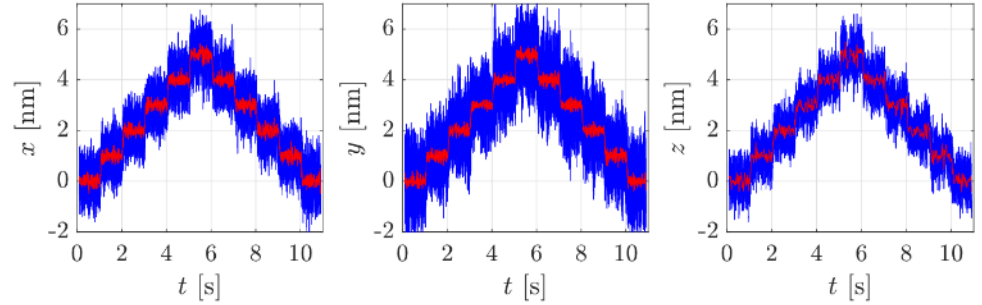
NPS6D200 – allgemeine Daten und and steady-state closed-loop Regelpformance

- $\emptyset$ 200 mm planarer Bewegungsbereich
- 25 mm vertikaler Bewegungsbereich
- ~ 30 Bogensekunden / $150 \mu\text{rad}$ rx ry rz
Winkelaktuierung möglich
- 50 mm/s planare Geschwindigkeit
- 2 mm/s vertikale Geschwindigkeit
- 250 mm/s^2 Beschleunigung
- 36 kg bewegte Masse, Nutzlast 5 kg
- RMS servo error (alle DOFs, gesamter Bewegungsbereich) $< 1.5 \text{ nm}$

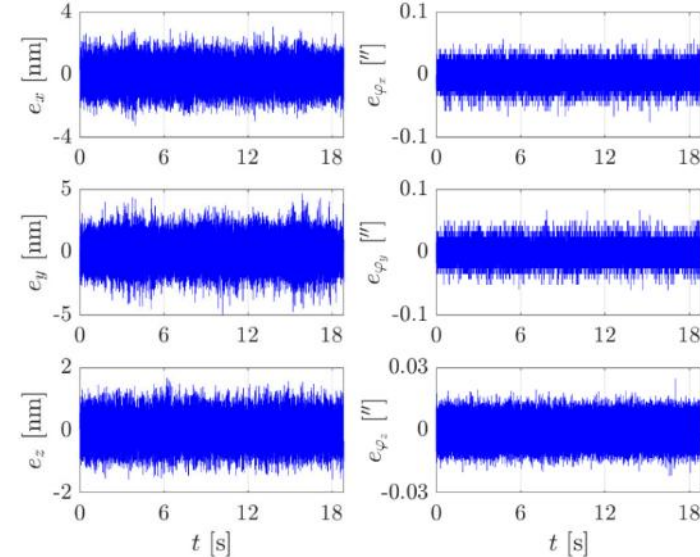
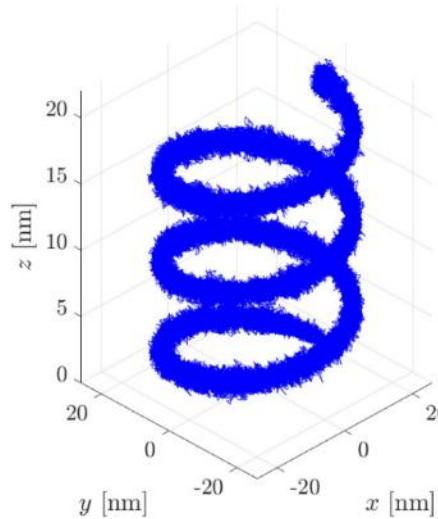


NPS6D200 – Closed-loop RegelPerformance bei Trajektorienverfolgung

- Treppen-Exercises mit 1-nm-Stufen
- Helix-Exercises mit $\varnothing$ 40 nm und 7 nm/s bis $\varnothing$ 40 mm und 7 mm/s

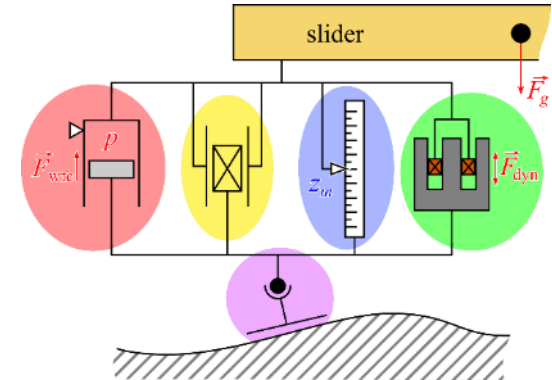
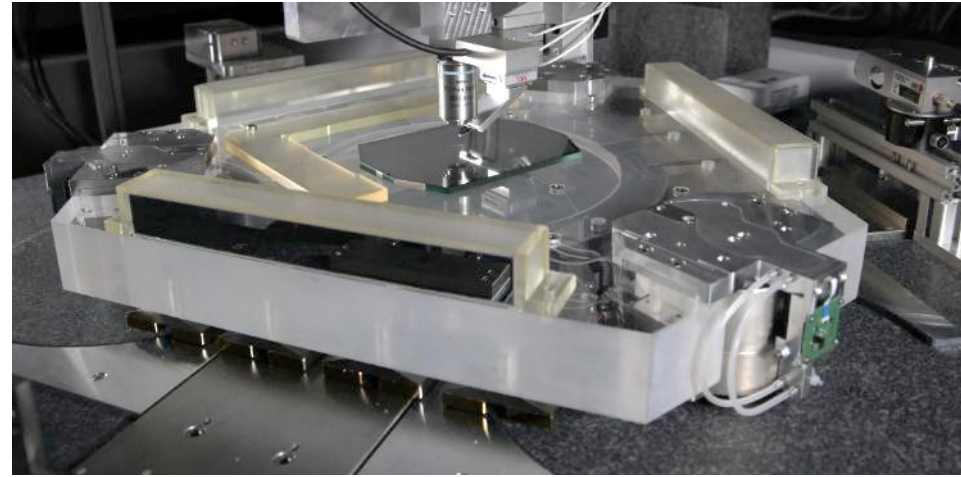


Commanded helix path	RMS servo errors
$\varnothing 40 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ $v = 7 \text{ nm s}^{-1}$	$e_x = 0.71 \text{ nm}$ $e_y = 0.88 \text{ nm}$ $e_z = 0.39 \text{ nm}$
$\varnothing 40 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ $v = 7 \mu\text{m s}^{-1}$	$e_x = 2.36 \text{ nm}$ $e_y = 2.66 \text{ nm}$ $e_z = 0.49 \text{ nm}$
$\varnothing 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ $v = 7 \text{ mm s}^{-1}$	$e_x = 0.93 \text{ nm}$ $e_y = 1.66 \text{ nm}$ $e_z = 0.67 \text{ nm}$



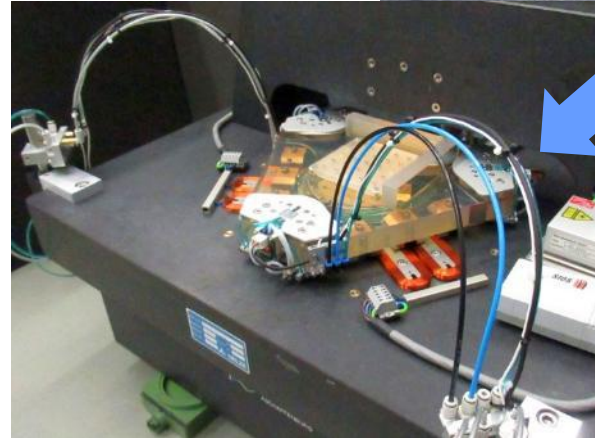
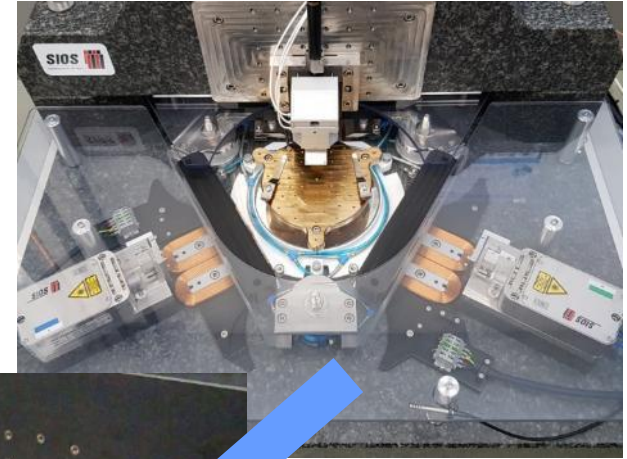
Fail-Safe-Problematik rein kraftgeführter Positioniersysteme

- Ziel: Schutz vor Beschädigung von Stage, Mess-/Fertigungstechnik und Probe/Werkstück im Fehlerfall
- Problem: System ist im Havariefall ggf. vollständig kraftfrei
- Szenarien:
 - Kollision der Magnetbrücken mit den Spulenbaugruppen
 - Kollision von Werkstück und Mess-/Fertigungstechnik
- Umgesetzte Lösungsansätze:
 - Rückfall auf Absolut-Encoder bei Messsystemausfall
 - Verzögerter Druckabfall durch passive Bauteile im Pneumatikpfad (Reduzierung der wirkenden Vertikalbeschleunigung auf ca. 0,15 g)
 - Integration von passiven Klemmvorrichtungen



Zusammenfassung

- Vertikalaktoren in Nanopositioniersystemen erweitern den Funktionsumfang sowie die Anwendbarkeit teils massiv
- Rein kraftgeführte Positioniersysteme sind regelungstechnisch „freundlich“ und ermöglichen damit Positioniergenauigkeiten im sub-nm-Bereich
- Rein kraftgeführte Vertikalaktoren bringen typische Herausforderungen mit sich (bspw. bezüglich Energieeffizienz, Regelung, Fail-Safe-Verhalten)
- Mit dem IMMS kann man prima hochgenaue Vertikalaktoren entwickeln und integrieren





Teile der präsentierten Arbeiten entstanden in der internen Forschungsgruppe Next-GenPos und dem Graduiertenkolleg NanoFab. Die interne Forschungsgruppe „Next Generation Positioning“ (NextGenPos) wurde 2024 durch den Freistaat Thüringen gefördert. Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ (NanoFab) wurde 2024 unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

An den nächsten Ideen für die Zukunft möchten wir gern gemeinsam mit Ihnen arbeiten!



IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH)

Ehrenbergstr. 27, 98693 Ilmenau, Germany, Tel: +49 3677-8 74 93 00, Fax: +49 3677-8 74 93 15, www.imms.de

Dr.-Ing. Ludwig Herzog, ludwig.herzog@imms.de, Tel: +49 3677 - 8 74 93 360