

Zielstellung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 622 werden an der IMMS gGmbH Forschungsarbeiten zur Realisierung von Nanopositioniersystemen für große Bewegungsbereiche durchgeführt. Derartige Antriebssysteme sollen die dreidimensionale Positionierung von Objekten mit Positionierungsunsicherheiten von wenigen Nanometern und Verfahrbereichen von einigen 100 mm in x- und y-Richtung sowie einigen 10 mm in z-Richtung ermöglichen. Die Forschungsarbeiten haben die Realisierung eines Positioniersystems mit folgenden Parametern zum Ziel:

- Verfahrbereich: $350 \times 350 \times 50 \text{ mm}^3$
- Messauflösung: 0,1 nm
- Positionierungsunsicherheit: 3 nm
- Verfahrsgeschwindigkeit in x, y: 10 mm/s
- Umgebung: Klimakammer, Vakuum

Aus dieser Zielstellung leiten sich die wissenschaftlichen Arbeitsziele ab:

- Reduzierung der Positionierungsunsicherheit planarer Direktantriebe bis in den Bereich weniger Nanometer
- Untersuchung der Einflussfaktoren und Hauptansatzpunkte für die Erzielung geringster Positionierungsunsicherheiten bei Verfahrbereichen von einigen 100 mm
- Entwicklung von Konzepten für vakuumtaugliche Antriebssysteme mit großen Verfahrbereichen ($350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$)

Forschungsverlauf- und -stand

Aufgrund ihrer äußerst einfachen Struktur mit dem aerostatisch geführten Läufer als einzige bewegte Komponente, einem optischen Aufrichtmesssystem und der Integration mehrerer elektrodynamischer Aktoren zu einem mehrachsigen Antrieb ermöglichen integrierte Mehrkoordinatenantriebe (MKA) eine hochpräzise und dynamische Positionierung in großen Verfahrbereichen. Für die Realisierung von Nanopositioniersystemen sind derartige MKA, vor allem hinsichtlich der Positions- und Winkelmessung weiter zu entwickeln. Der Schlüssel zu Mess- bzw. Positionierungsunsicherheiten im Bereich weniger Nanometer liegt im Einsatz von Laserinterferometern als Messsystem in einer Anordnung, die Fehler erster Ordnung („Abbe-Fehler“) vermeidet. Dabei wird nur der Reflektor, eine thermisch stabile Spiegelecke aus Zerodur™ Glaskeramik bewegt und in allen sechs Achsen positioniert. Für zukünftige Nanopositioniermaschinen mit Verfahrbereichen von mehreren 100 mm ist der Einsatz integrierter MKA für die hochgenaue laterale Positionierung der Spiegelecke angestrebt. Dabei stellen sich aufgrund der großen geometrischen Dimensionen in Verbindung mit der Forderung nach höchster Genauigkeit neue Herausforderungen für die Gestaltung des Antriebssystems als mechatronisches System. Dies betrifft insbesondere dessen Grundstruktur, sowie die Auswahl, Gestaltung und Integration

Objective

Within the collaborative research centre SFB 622 the IMMS has been carrying out research work for the realisation of nanopositioning systems for large movement ranges. Such drive systems are intended to allow the three-dimensional positioning of objects with positioning uncertainties of only a few nanometers and positioning ranges of a few 100 mm in x- and y-direction as well as some 10 mm in z-direction. The research work aims at the realisation of a positioning system with the following parameters:

- Positioning range: $350 \times 350 \times 50 \text{ mm}^3$
- Measuring resolution: 0,1 nm
- Positioning uncertainty: 3 nm
- Velocity in x, y: 10 mm/s
- Environment: climatic chamber, vacuum

From this the following aims of scientific work are derived:

- Reduction of the positioning uncertainty of planar direct drives to the range of only a few nanometers
- Investigation of the influencing factors for the achievement of lowest positioning uncertainties at positioning ranges of only a few 100 mm
- Development of concepts for vacuum compatible drive systems with large positioning ranges ($350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$)

Course and state of research work

Owing to its very simple structure with the aerostatically guided slider as the only moving component, an optical incident light measuring system and the integration of several electrodynamic actuators to a multiaxial drive, integrated multicoordinate drives (MCD) allow highly precise and dynamic positioning in large positioning ranges. For the realisation of nanopositioning systems such MCD, especially with regard to position and angular measurement, must be further developed. The key to measuring or positioning uncertainties in the range of only a few nanometers is the use of laser interferometers as measuring system in an arrangement avoiding errors of first order (“Abbe-errors“). Here only the reflector, a thermally

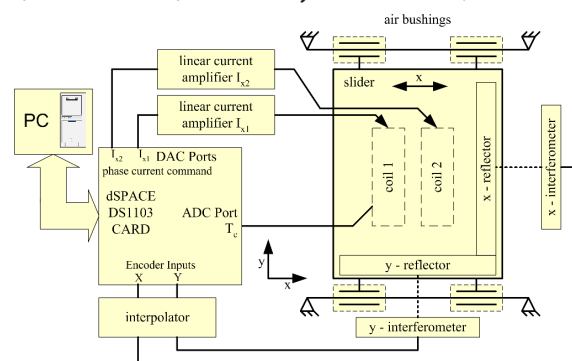


Abb. 1: LMS200 Funktionsschema

Fig. 1: LMS200 functional diagram

von Messsystem, Antrieb und Führung als entscheidende Funktionsgruppen innerhalb des Antriebssystems.

Ein Zwischenergebnis der bisherigen Arbeiten zur Gestaltung derartiger Positioniersysteme ist der LMS200, ein lineares Positioniersystem für einen Verfahrbereich von 200 mm. Er verfügt über einen linearen elektrodynamischen Direktantrieb, wobei die gestellfesten Flachspulen über einen Wasserkreislauf temperiert werden. Der Läufer wird mit Hilfe aero-statischer Buchsen linear geführt und trägt die Zerodur™ - Spiegelecke, die als Reflektor für die Laserinterferometer dient. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, sind Antrieb, Läufer und Spiegelecke bereits in den Dimensionen für ein zweiachsiges System mit 200 mm x 200 mm Verfahrbereich ausgeführt. Ein dSpace™ DSP-System übernimmt die Informations- und Datenverarbeitung, während die Modellierung von System und Regelung mit Matlab Simulink™ erfolgte (s. Abb. 1).

Der LMS200 dient als Demonstrator zum Test einzelner Funktionsgruppen, wie auch zur Erprobung des Systems als Ganzheit und zur gezielten Untersuchung der Einflussfaktoren für eine Reduzierung der Positionierungsunsicherheit. In der Basiskonfiguration (s. Abb. 2) besitzt der Demonstrator folgende Eigenschaften:

- Verfahrbereich: 200 mm
- Messauflösung: 1,6 nm (0,8 nm)
- Geschwindigkeit: 10 mm/s (5 mm/s)
- bewegte Masse: 14 kg
- maximale Antriebskraft: 20 N

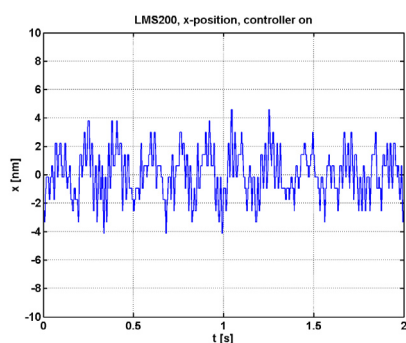


Abb. 3: x- Messsignal im geregelten Zustand LMS200 Basiskonfiguration

Fig. 3: x- measuring signal in controlled state LMS200 basic configuration

Im Betrieb ermöglicht dieses Antriebssystem eine Positionierung des Läufers innerhalb eines Verfahrbereiches von 200 mm, wobei in der Basiskonfiguration im geregelten Zustand eine Positionierungsunsicherheit von $u_x = 4.8 \text{ nm}$ (3σ) erzielt wird (s. Abb. 3). An dieser Stelle bietet der LMS200 als Experimentalaufbau die Möglichkeit, Störquellen innerhalb und außerhalb des Systems zu identifizieren, deren Einfluss auf die Wegmessung bzw. auf das Positionierverhalten zu untersuchen und so schrittweise die Performance des Positioniersystems zu steigern. So konnten durch gezielte Analyse der einzelnen Funktionsgruppen und eine Reihe

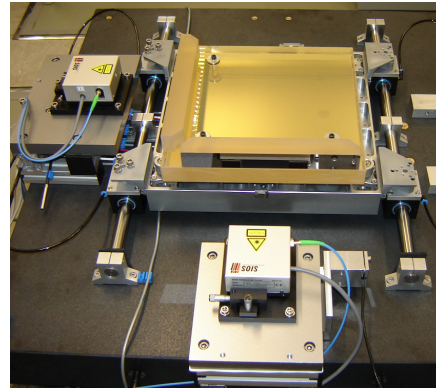


Abb. 2: LMS200 Lineardemonstrator für 200 mm

Fig. 2: LMS200 linear demonstrator for 200 mm

stable corner cube of Zerodur™ glass ceramics is moved and positioned in all six axes. For future nanopositioning machines with positioning ranges of several 100 mm the use of integrated MCD for highly precise lateral positioning of the reflector is strived for. Owing to the large geometric dimensions in connection with the demand for highest accuracy we are here faced with new challenges for the design of a drive system as a mechatronic system. This in particular applies to its basic structure, as well as to the selection, design and integration of measuring system, drive and guidance as decisive functional groups in the measuring systems. An intermediate result of the current work for the design of such positioning systems is the LMS200, a linear positioning system for a positioning range of 200 mm. It has a linear electrodynamic direct drive and the temperature of the frame-mounted flat coils is kept constant by means of a water cycle. The slider is guided in linear direction and carries the Zerodur™ - corner cube, which serves as a reflector for the laser interferometers. In order to achieve results as meaningful as possible, the drive, slider and reflector have already been designed in the dimensions for a biaxial system with 200 mm x 200 mm positioning range. A dSpace™ DSP-System takes on information and data processing, while modeling and control of the system took place with Matlab Simulink™ (Fig. 1).

The LMS200 serves as demonstrator for testing individual functional groups, as also for testing the system as a whole and for the specific investigation of influencing factors for a reduction of the positioning uncertainty. In the basis configuration (Fig. 2) the demonstrator shows the following properties:

- Positioning range: 200 mm
- Measuring resolution: 1,6 nm (0,8 nm)
- Velocity: 10 mm/s (5 mm/s)
- Moving mass: 14 kg
- Maximal driving force: 20 N.

In operation this drive system allows the positioning of the slider within a positioning range of 200 mm and in basic configuration, in a controlled state, a positioning uncertainty of $u_x = 4.8 \text{ nm}$ (3σ) is achieved. (Fig. 3). The

von Messungen zum dynamischen Verhalten des Systems zielführende Maßnahmen abgeleitet werden:

- Verbesserung der Aufstellungsbedingungen und der Schwingungsisolation
- Verbesserung der thermischen und akustischen Abschirmung
- Erhöhung der Steifigkeit zwischen Kraftangriffspunkt und Laserreflektor
- Vereinfachung der mechanischen Struktur
- Erhöhung der Messauflösung (auf 0,2 nm)

Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen werden die dynamischen Eigenschaften und damit auch die Positioniereigenschaften des LMS200 deutlich verbessert. Messungen zur Streckenidentifikation für diese neue Konfiguration bestätigen dies und liefern gleichzeitig die Basis für eine Optimierung der Reglerparameter und eine Berücksichtigung der Streckeneigenschaften bei der Auslegung des Zustandsreglers. Im Ergebnis führt dies, verglichen mit der Basiskonfiguration zu einer deutlich verringerten Positionierungsunsicherheit im geregelten Zustand. Diese beträgt nunmehr $u_x = 0,35 \text{ nm}$ (3σ) (s. Abb. 4). Auch Schritte mit Schrittweiten von $\Delta x = 1 \text{ nm}$ und darunter sind nun mit dem LMS200 möglich (s. Abb. 5).

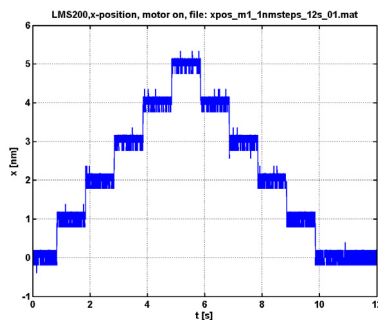


Abb. 5: Positionierung in Schritten mit $\Delta x = 1 \text{ nm}$ mit dem LMS200 (Primärwerte)
Fig. 5: Positioning in steps with $\Delta x = 1 \text{ nm}$ with the LMS200 (primary values)

Ausblick

Zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet zielen darauf ab, Schwankungen des Streckenübertragungsverhaltens z.B. an den Rändern des Verfahrbereiches zu erfassen und zu kompensieren. Auch hierfür stellt der LMS200 als Demonstrator eine gut geeignete Plattform dar. Darüber hinaus finden die am LMS200 und in den Voruntersuchungen gesammelten Erkenntnisse Eingang in die Konzeptentwicklung für einen mehrachsigen Demonstrator (x,y) mit 250 mm x 250 mm Verfahrbereich. Langfristig besteht das Ziel in der Realisierung eines vakuumtauglichen Präzisionspositioniersystems mit einem Verfahrbereich von 350 mm x 350 mm und magnetischen bzw. vakuumtauglichen aerostatischen Führungen.

Ansprechpartner / Contact:
Dipl.-Ing. Steffen Hesse
Tel.: +49 (3677) 69-5567
E-Mail: steffen.hesse@imms.de

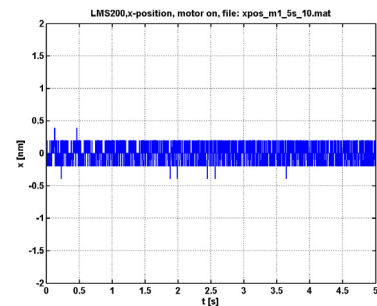


Abb. 4: x-Messsignal des LMS200 im geregelten Zustand (Primärwerte)
Fig. 4: x-measuring signal of the LMS200 in controlled state (primary values)

LMS200, as an experimental set-up, here offers the possibility to identify the interference sources inside and outside of the system, to investigate the influence of which on distance measuring or positioning behaviour and that way a step-by-step increase in the performance of the positioning system. As a result goal oriented measures could be derived by specific analysis of the individual functional groups and several measurements on the dynamic behaviour of the system:

- Improvement of the installation conditions and vibration insulation
- Improvement of thermal screening and acoustic cushioning
- Increase in the stiffness between force application point and laser reflector
- Simplification of the mechanical structure
- Increase in the measuring resolution (to 0.2 nm)

By the realisation of these measures, the dynamic properties and with that also the positioning properties of the LMS200 are definitely improved. Measurements on the path identification for this new configuration have confirmed this and at the same time delivered the basis for an optimisation of the controller parameters and the consideration of path parameters in the design of the state controller. The result, compared to the basic configuration, is a clearly reduced positioning uncertainty in controlled state. This is now only $u_x = 0,35 \text{ nm}$ (3σ) (Fig. 4). Also steps with step width of $\Delta x = 1 \text{ nm}$ and below are now possible with the LMS200. (Fig. 5).

Prospect

Future work aims at recording and compensating variations in the path transmission behaviour e.g. at the edges of the positioning range. Here too the LMS200 as a demonstrator represents a well suitable platform. Moreover the knowledge gained the pre-investigations has been used in concept development for a multiaxial demonstrator (x,y) with 250 mm x 250 mm positioning range. In the long term the work aims at the realisation of a vacuum compatible precision positioning system with a positioning range of 350 mm x 350 mm and magnetic or vacuum compatible aerostatic guidings.