

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

M. Lotz / T. Frank / T. Hackel / G. Höhne / R. Theska

Konstruktionsprinzipien zum Entwurf von Nanopositioniermaschinen

Abstract

Ultra precise multi-axis positioning and measuring machines are being demanded with an increasingly large spatial travel while reaching accuracy in the nanometer range. High flexibility for various applications in micro-mechanics, nanotechnology, genetic engineering and metrology is feasible.

Closed loop controls used in these machines show their limits. It is not possible to control environmental influences and machine behaviour successfully without a systematic machine design. The paper discusses the importance of design principles and virtual prototyping techniques for introducing a new generation of machines for highest precision applications.

1 Einführung

Hoch präzise mehrachsige Positionier- und Messmaschinen werden mit immer größeren Bewegungsbereichen benötigt (Abbildung 1). Dabei steigen gleichzeitig die Anforderungen an die Genauigkeit bis in den Nanometerbereich. Für den Einsatz in unterschiedlichsten Anwendungsfeldern wie zum Beispiel Mikromechanik, Nanotechnologie, Gentechnik oder der Metrologie müssen diese zudem möglichst hoch flexibel sein.

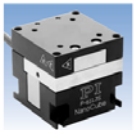
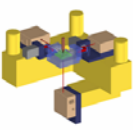
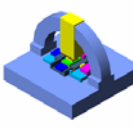
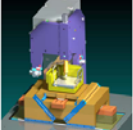
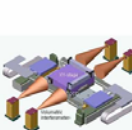

	Kleiner Bewegungsbereich		Mittlerer Bewegungsbereich (10 mm < x < 1000 mm)				Großer Bewegungsbereich		
Name	PI NanoCube	...	NMM 1	Nano-CMM	Ultra Precision CMM	Ultra Precision CMM	...	Leitz PMM-C	...
Aufbau		...					...		...
Bewegungsbereich	100 x 100 x 100 μm ³	...	25 x 25 x 5 mm ³	25 x 25 x 10 mm ³	100 x 100 x 40 mm ³	300 x 300 x 300 mm ³	...	1,2 x 1,0 x 0,7 m ³	...
Aufbauprinzip	Seriell	...	Seriell	Seriell	Semi-Parallel	Seriell	...	Seriell	...

Abbildung 1 – Hoch präzise Positionier- und Messmaschinen [1, 2, 3, 4, 5, 6]

Die in den Maschinen verwendeten Regelungen zeigen ihre Grenzen. So ist es nicht möglich mit ausreichender Genauigkeit Umwelteinflüsse zu kompensieren und das Maschinenverhalten zu

regeln ohne eine ausgereifte und systematische Konstruktion der Maschine.

2 Methoden

Hochpräzise Anwendungen benötigen Maschinen mit hervorragenden Leistungen, dies bedeutet beispielsweise sehr gutes dynamisches Verhalten kombiniert mit hoher Präzision. Um diese Anforderungen erfüllen zu können sind ein systematischer Entwurf und der konsequente Einsatz von Konstruktionsmethoden, -richtlinien und -prinzipien notwendig. Für den systematischen Entwurf sind der konstruktive Entwicklungsprozess (KEP) bzw. die VDI-Richtlinie 2221 einzuhalten [7, 8].

Durch den Einsatz von Regelungen werden Wichtigkeit und Vorteile von angewandten Konstruktionsprinzipien im Entwurf von Positionier- und Messmaschinen oft unterschätzt und vernachlässigt. Mit ihnen ist es jedoch möglich:

- systematische Fehler zu verringern und zufällige Fehler zu vermeiden ,
- Störeffekte von Umwelteinflüssen (Temperatur, Schwingungen, usw.) zu verringern,
- ein reproduzierbares Maschinenverhalten und
- eine einfache Maschinenregelung zu realisieren.

Die kritischste Phase im Entwicklungsprozess einer Maschine ist der Entwurf des Technischen Prinzips. Er ermöglicht durch Abstraktion die wichtigsten Fehlerquellen zu finden und zu eliminieren (mechanische als auch optische oder metrologische). In dieser Phase können ebenfalls Fehlerrechnungen und Justierstrategien entwickelt werden. Aus den genannten Gründen ist es notwendig, bereits in dieser Phase die Konstruktionsprinzipien anzuwenden um ihr Potential voll ausschöpfen zu können. Methoden des Virtual Prototyping können im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses genutzt werden um die angewendeten Prinzipien zu kontrollieren und die Gesamtkonstruktion zu optimieren.

3 Konstruktionsprinzipien

Konstruktionsprinzipien sind keine „neuen“ Methoden. Sie wurden bereits in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts formuliert um dem Konstrukteur ein effektives Werkzeug bereits in den frühen Entwicklungsphasen zu geben. Ihre Definition variiert je nach Autor [8, 9, 10, 11], beinhaltet jedoch im Wesentlichen das Gleiche. Eine Definition von Schilling [12] lautet: „Konstruktionsprinzipien sind grundsätzliche Möglichkeiten für die Struktur des technischen Gebildes und ihre Bestandteile mit dem Ziel die Struktur eines technischen Gebildes mit optimaler Erfüllung der Funktion

aufzufinden, anzupassen und zu verbessern durch Berücksichtigen der in der Struktur selbst vorhandenen Zusammenhänge.“ Im Laufe der Jahre wurden die Konstruktionsprinzipien weiterentwickelt und ergänzt. Sie lassen sich in folgende wesentliche Gruppen unterteilen:

- Prinzipien der Funktionen,
- Prinzipien der Strukturen,
- Prinzipien des Werkstoffs,
- Prinzipien der Paarungen / Koppelstellen,
- Prinzipien der fehlerarmen Anordnungen,
- Prinzipien der Selbstunterstützung,
- Prinzipien der Kraftleitung,
- Prinzipien der Stabilität und Bistabilität.

Die für Positionier- und Messmaschinen wesentlichen Prinzipien sollen im Folgenden näher erläutert werden.

3.1 Prinzipien der Paarungen / Koppelstellen

Die gesamte Positionier- und Messmaschine kann als eine kinematische Kette bestehend aus starren Körpern und Gelenken verstanden werden. Sowohl mechanische Koppelstellen als auch Elastizitäten in Körpern können als Gelenke fungieren.

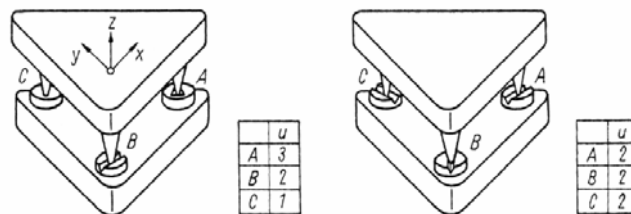


Abbildung 2 – Kinematisch bestimmte Kopplungsmöglichkeiten [8]

Kommt es in diesen kinematischen Ketten zu Überbestimmtheiten, das heißt es werden mehr Freiheiten gesperrt als zur Verfügung stehen, so müssen verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Diese können beispielsweise in höheren geometrischen Toleranzen oder Justierstellen bestehen. Dadurch erhöhen sich u.a. der Fertigungsaufwand und die Komplexität der Konstruktion. Die kinematische Kette ist jedoch immer noch anfällig gegenüber störenden Einflüssen (z.B. Temperaturdehnung), was zu nicht reproduzierbarem Systemverhalten führen kann. Dies ist kritisch für hochpräzise Maschinen weshalb das Prinzip „Vermeiden von Überbestimmtheiten“ angewendet werden sollte (Abbildung 2).

3.2 Prinzipien der fehlerarmen Anordnung

Systematische als auch zufällige Fehler sollten so gut wie möglich bereits durch die Konstruktion vermieden werden. Dies ist beispielsweise möglich indem man Fehler erster Ordnung vermeidet wenn z.B. Objekt und Messsystem fluchtend angeordnet sind. Es handelt sich dabei um eine fehlerarme (innozente) Anordnung welche bereits von Abbe sehr früh beschrieben wurde. Weitere Möglichkeiten sind sogenannte fehlerfreie (invariante) Anordnungen. Durch eine geschickte Wahl von Abmessung und Anordnung der eingesetzten Bauelemente können systematische Fehler vermieden werden (Abbildung 3). Dieser Ansatz ist jedoch meist von der Herstellbarkeit der Bauteile abhängig und im Allgemeinen nur im μm -Bereich fehlerfrei.

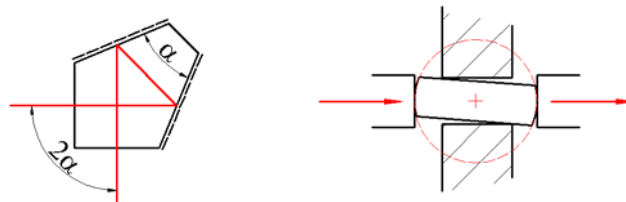


Abbildung 3 – Invariante Anordnungen (links: optisch, rechts: mechanisch) [12]

3.3 Prinzipien der Kraftleitung

Ein wesentliches Konstruktionsprinzip ist das der „kurzen und direkten Kraftleitung“. Das Ziel ist es auftretende Deformationen zu minimieren und die Material- als auch Bauteileigenschaften optimal zu nutzen. Dabei sind Biege- und Torsionsspannung durch Momente zu vermeiden.

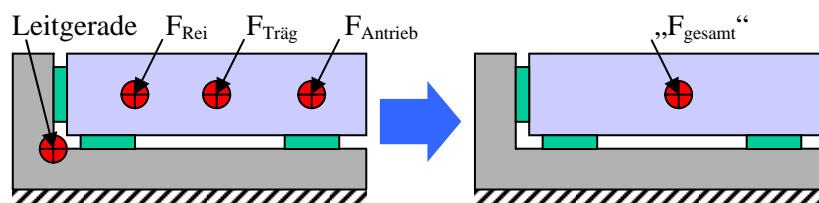


Abbildung 4 – „Abbe-Prinzip der Mechanik“

Ein weiterer Ansatz ist es, die auftretenden Kräfte an einem bewegten und geführten Teil so zu vereinigen, dass diese bzw. ihre resultierenden Wirkungslinien zusammen mit dem Schwerpunkt fallen. Dieses sogenannte „Abbe-Prinzip der Mechanik“ ermöglicht es, die dynamischen Eigenschaften deutlich zu verbessern (Abbildung 4).

Können die genannten Ansätze nicht umgesetzt werden, müssen andere Maßnahmen ergriffen werden. Beispielsweise sollte die Antriebskraft nur so wirken, dass eine gegensinnige Bewegung des Messsystems durch Trägheit ausgeschlossen ist (Abbildung 5).

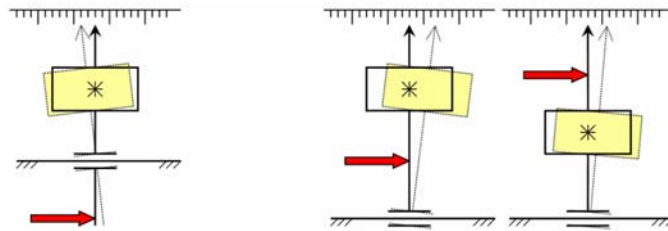


Abbildung 5 – Reaktion eines geführten Teils und dessen Messsystems auf eine Antriebskraft

4 Konstruktion einer Nanopositioniermaschine

Die Herausforderung beim Entwurf hoch präziser Positioniermaschinen liegt in der konsequenten Anwendung der beschriebenen Konstruktionsprinzipien. Bei der Entwicklung einer Nanopositioniermaschine mit einem Bewegungsbereich von $200 \times 200 \times 5 \text{ mm}^3$ wurde dies näher untersucht.

Nach der Aufgabenpräzisierung entstanden verschiedene Technische Prinzipie für den Gesamtaufbau der Maschine. Der favorisierte Entwurf (Abbildung 6) setzt besonders konsequent verschiedene Konstruktionsprinzipie um.

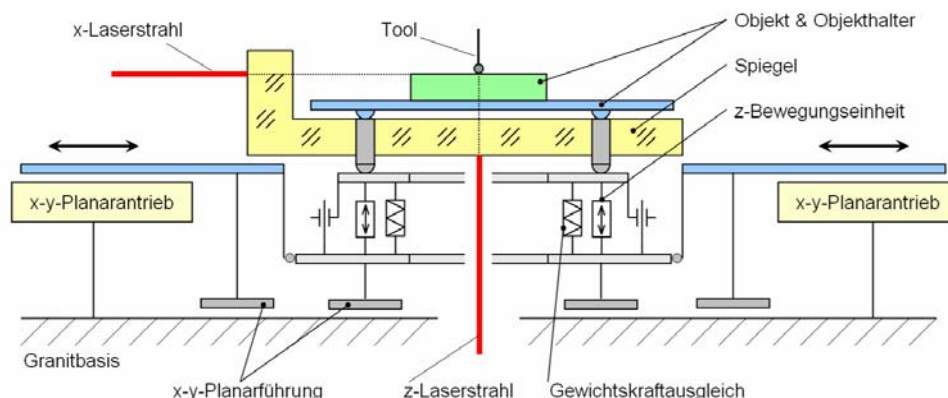


Abbildung 6 – Technisches Prinzip einer Nanopositioniermaschine

So wird das Abbe-Komparatorprinzip durch die Anordnung der ortsfesten Interferometer in allen drei Messachsen erfüllt. Dadurch können Messfehler erster Ordnung vermieden werden.

Besonderes Augenmerk wurde auf einen kraftflussgerechten Entwurf gelegt. Der schwere Messspiegel und das Objekt stützen sich direkt auf der vertikalen z-Führungs- und Antriebseinheit ab. Diese leitet wiederum die Kraft direkt über Planarführungen auf ein sehr steifes Grundgestell. Durch diese Anordnung werden die einzelnen Bauelemente nur auf Druck belastet. Der Planarantrieb greift in Höhe des Gesamtschwerpunkts an. Zudem ist er gegenüber der vertikalen z-Bewegungseinheit so entkoppelt, dass er nur Zug- und Druckkräfte und Momente um die vertikale z-Achse übertragen kann. Insgesamt ist der Entwurf symmetrisch gestaltet. Dies verbessert sowohl die statischen als auch die dynamischen Eigenschaften und reduziert den negativen Einfluss der

Wärmequellen durch große Temperaturgradienten in der Maschine.

Der Messspiegel hat besonders großen Einfluss auf die Messgenauigkeit und damit auf die Gesamtgenauigkeit der Maschine. Als Werkstoffe werden für diesen Gläser oder Glaskeramiken mit niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (z.B. Zerodur) eingesetzt. Neben der thermischen Stabilität spielt auch die mechanische Steifigkeit eine entscheidende Rolle. Der Messspiegel darf sich während der Bewegung oder bei Änderung der Messobjekts nur minimal verformen (Abbildung 7, links). Aus diesem Grund wird eine statisch bestimmte Drei-Punkt-Auflage bestehend aus drei Kugel-V-Nut-Paarungen verwendet. Das Fassungselement ist so gestaltet, dass der Spiegel durch Kraftschluss gehalten wird und ein darauf befestigtes Objekt den Spiegel nicht zusätzlich verformen kann (Abbildung 7, rechts).

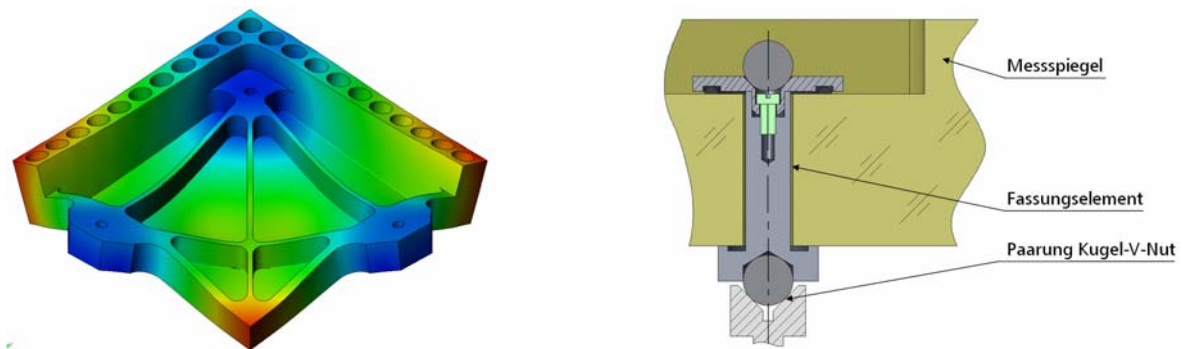


Abbildung 7 – Links: FEM Simulation eines Leichtbaumessspiegels (Deformation unter Schwerkraft), rechts: Fassungselement und Koppelstelle

Die Masse des Messspiegels bestimmt die erreichbare Dynamik der Maschine und ist deshalb zu minimieren. Mit Hilfe von Virtual Prototyping Methoden wie FEM wurden verschiedene Ansätze untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch Anwendung des Prinzipes der kurzen und direkten Kraftleitung und gleichzeitiger Massereduzierung die besten Ergebnisse hinsichtlich geringer Verformung und geringer Masse erzielt werden können.

5 Zusammenfassung

Unter konsequenter Anwendung von Konstruktionsprinzipien entstand ein Gesamtentwurf für eine neue Generation einer Nanopositioniermaschine (Abbildung 8). Anhand von Simulationen mittels Verfahren des Virtual Prototyping konnte nachgewiesen werden, dass dieser Entwurf deutliche Vorteile gegenüber der vorhergehenden Generation besitzt. Damit konnte gezeigt werden, inwieweit Konstruktionsprinzipien anwendbar und welche Verbesserungen zu erwarten sind.

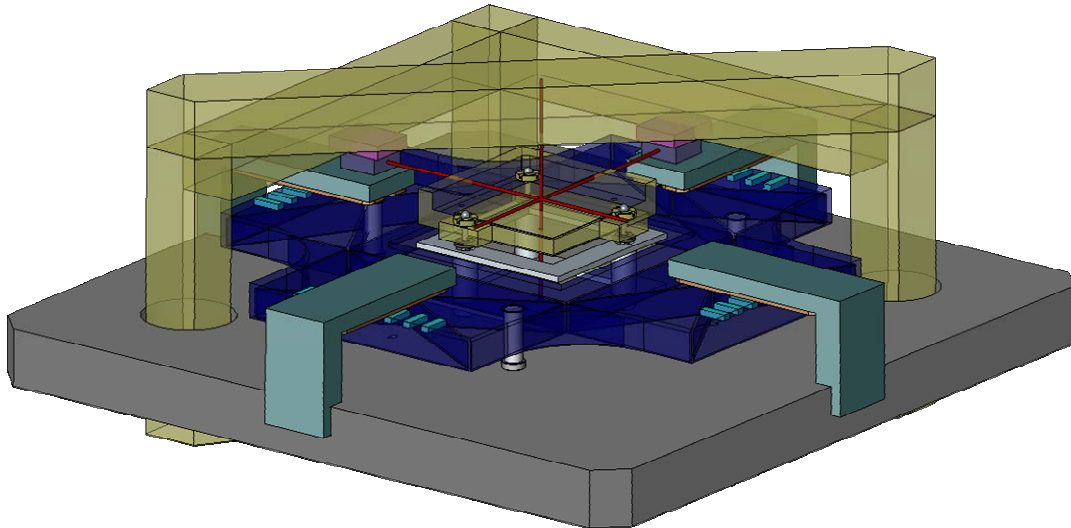


Abbildung 8 – Gesamtkonzept der Nanopositioniermaschine als 3D-Entwurf

Der Entwurf ist nun in Form einer Maschine zu realisieren. An dieser stehen Untersuchungen der statischen, dynamischen als auch thermischen Eigenschaften an um die Simulationsergebnisse und Annahmen der Gestaltungsphasen verifizieren zu können. Es ist davon auszugehen, dass dadurch neue Ansätze für die Anwendung von Konstruktionsprinzipien entstehen und diese erweitert werden können.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] PI 2004; „PI P-611.3S“ Datenblatt Physik Instrumente GmbH
- [2] Jäger, G. et al.; (2002) “Operation and Analysis of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine”, ASPE Annual Meeting
- [3] Kramar, J.; (2001) “Molecular measuring machine research and development”, NIST Manufacturing Engineering Laboratory
- [4] Ruijl, T.; (2002) “Ultra Precision CMM: Design, Calibration and Error Compensation”, Ponsen & Looijen
- [5] KAIST; BUPE: “Annual Report 2003”, <http://pem.kaist.ac.kr/bupe> (2003-11-05)
- [6] Leitz 2004; „Leitz PMM-C“ Datenblatt Leitz Messtechnik GmbH
- [7] VDI-Richtlinie 2221;(1985) „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“, VDI-Verlag
- [8] Krause, W.; (2000) „Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik“, Carl Hanser Verlag
- [9] Pahl; Beitz; (1993) „Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen“, 3. Auflage, Springer
- [10] Koller; (1994) „Konstruktionslehre für den Maschinenbau“, 3. Auflage, Springer
- [11] Nakazawa, H.; (1994) „Principles of Precision Engineering“, Oxford University Press
- [12] Schilling, M.; (1982) „Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik“, doctoral thesis B (Dr. sc. techn.), TU Ilmenau

Autorenangabe(n):

Dipl.-Ing Markus Lotz *
 Dipl.-Ing. Thomas Frank **
 Dipl.-Ing. Tobias Hackel **
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Höhne *
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska **
 Technische Universität Ilmenau
 Fakultät Maschinenbau
 Fachgebiet Konstruktionstechnik *
 Fachgebiet Feinwerktechnik **
 Postfach 10 05 65
 98684 Ilmenau
 Tel.: 03677 / 69 5077
 Fax: 03677 / 69 5052
 E-mail: markus.lotz@tu-ilmenau.de