

Felix Gerhard Balzer

**Entwicklung und Untersuchungen zur
3-D-Nanopositioniertechnik in großen
Bewegungsbereichen**

Entwicklung und Untersuchungen zur 3-D-Nanopositioniertechnik in großen Bewegungsbereichen

Felix Gerhard Balzer



Universitätsverlag Ilmenau
2015

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 17. Dezember 2013

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte
(Universität Erlangen-Nürnberg)
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
(Technische Universität Braunschweig)

Tag der Verteidigung: 19. Juni 2014

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-109-6 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000373

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. mult. Gerd Jäger und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich, die es als Institutsleiter mir ermöglichten, diese Arbeit anzufertigen und sie förderten. Für die verschiedensten Anregungen und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit möchte ich Herrn Prof. Jäger herzlich danken. Außerdem möchte ich mich besonders bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske bedanken, die diese Arbeit von theoretischer und praktischer Seite betreuten und Hilfestellungen bei auftretenden Problemen gaben, und somit entscheidend zum erfolgreichen Abschluss beitrugen.

Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei Herrn Dipl.-Inf. Johannes Klöckner bedanken, der durch die Programmierung der Firmware und die stets zuverlässige und zeitnahe Umsetzung meiner Wünsche und Anregungen entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Allen Arbeitskollegen des Instituts für Prozessmess- und Sensortechnik schulde ich großen Dank für ihre gute Zusammenarbeit sowie stete Hilfsbereitschaft und kritischen Diskussionen.

Den Kollegen der SIOS Meßtechnik GmbH, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Walter Schott, Herrn Dr.-Ing. Denis Dontsov, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Pöschel und Herrn Dipl.-Ing. Enrico Langlotz, danke ich für die stets angenehme und konstruktive Zusammenarbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner Frau Christiane bedanken, die mir während aller Phasen der Promotion viel Geduld und Unterstützung entgegengebracht und viele Umstände ertragen hat, die mit der Erstellung dieser Arbeit verbunden waren.

Kurzfassung

Der zunehmende industrielle Einsatz mikro- und nanotechnologischer Produkte führt dazu, dass die 3-D-Nanopositionier- und Nanomesstechnik immer mehr an Bedeutung für die Fertigungs- und Qualitätskontrolle gewinnen. Demzufolge wachsen auch die Komplexität und die Anforderungen an die Nanometrologie und adäquate Messgeräte sowie Messmethoden. Nanopositionier- und Nanomessmaschinen können die gerätetechnische Lücke zwischen Rastersondenmikroskopen mit sehr hohen Messauflösungen bei kleinem Messbereich und Koordinatenmessgeräten mit großem Messvolumen und Messunsicherheiten im Mikrometerbereich schließen.

Weltweit wird in zahlreichen Forschungsprojekten an der Entwicklung von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen geforscht. Die Analyse des aktuellen Entwicklungsstandes zeigt, dass derzeit kein Messgerät mit großem Messvolumen bei gleichzeitiger Messauflösung im subatomaren Bereich sowie einer 3-D-Messunsicherheit von weniger als 50 nm existiert, welches den Herausforderungen der Präzisionstechnologien in den nächsten Jahren gerecht wird.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zahlreiche Beiträge zur Entwicklung und Untersuchung einer neuen Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM-200 geleistet, die sich mit einem Messvolumen von $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 25\text{ mm}$, einer angestrebten 3-D-Messunsicherheit kleiner 30 nm und der Möglichkeit zur Messung im Grobvakuum vom derzeitigen Stand der Technik abhebt. Die Zielstellung dieser Dissertation ist die Analyse der Leistungsfähigkeit und der Grenzen der Positioniereigenschaften dieses Messgeräts sowie ein metrologischer Nachweis anhand einer ausgewählten Messaufgabe.

Da zur Entwicklung der NPMM-200 zahlreiche Kooperationspartner beigetragen haben, wird zunächst das realisierte Gesamtsystem betrachtet. In der Entwicklungsphase des Messgeräts wurde im Rahmen dieser Arbeit wesentlich an dem Entwurf und der Konstruktion dieses Gesamtsystems, der Realisierung des Positioniersystems und dem Aufbau neuartiger fasergekoppelter

monochromatischer Nullpunktsensoren mitgewirkt. Diese Komponenten werden im Detail vorgestellt.

Nach der gelungenen Inbetriebnahme erfolgte die Untersuchung der 3-D-Positioniereigenschaften, insbesondere des Positionsrauschens, der Positionierauflösung und der Regelungseigenschaften. Aufbauend auf den Ergebnissen wurde dann der metrologische Nachweis mit Hilfe ausgewählter Stufenhöhennormale erbracht. Darüber hinaus werden exemplarisch zwei neuartige Anwendungsfelder für die NPMM-200 vorgestellt.

Abstract

The ongoing industrial application of micro- and nanotechnology products leads to an increasing demand for 3D-nanopositioning and nanomeasuring technology in the field of production and quality control. Thus the complexity and the requirements regarding nanometrology and appropriate measuring machines as well as measuring strategies are also on the rise. Currently there is a metrology gap between scanning probe microscopy yielding high resolution but small measurement range and conventional coordinate measuring machines having a large measurement volume but possessing a resolution in the micrometre range. Nanopositioning and nanomeasuring machines are intended to close this gap.

Several current research projects all over the world deal with developing nanopositioning and nanomeasuring machines. The overview shows that there is no machine with large measuring volume, a measurement resolution in the sub-atomic region and a 3D-measurement uncertainty below 50 nm currently, which is capable of facing the requirements of the next-generation high-precision technologies for the next few years.

This thesis contributes to the development and investigation of a new nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200, which has a measurement volume of $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ and aims at a 3D-measurement uncertainty below 30 nm. Furthermore this machine is intended to be used in vacuum. The main goals of the thesis are the analysis of the performance and the limits of the positioning characteristics as well as a metrological confirmation using an example of a measurement of a step height standard.

First of all the complete system of the NPMM-200 is described since it is a complex mechatronic system and several project partners contributed to the development. In the context of this thesis it was contributed to the design of the complete system and namely the positioning system as well as the realization of novel fibre-coupled monochromatic zero-point sensors during the development phase. These components are described in detail in the following chapters.

After the successful initial operation of the NPMM-200 the 3D-positioning characteristics have been investigated, namely positioning noise, resolution and control characteristics. Based on these results the metrological confirmation was provided using several step height standards. Furthermore two novel applications for the NPMM-200 are presented using exemplary measurement results.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	xv
1 Einleitung und Überblick	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Nanopositionier- und Nanomessmaschinen	5
2.1.1 NPMM mit bewegtem Messobjekt	7
2.1.2 NPMM mit kombinierter Bewegung von Messobjekt und Antastsystem	10
2.1.3 NPMM mit bewegtem Antastsystem	15
2.2 Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1	17
2.3 Entwicklungsziele	19
3 NPMM-200	21
3.1 Metrologisches Konzept	21
3.2 Mechanischer und optischer Grundaufbau	24
3.2.1 Gerätebasis und metrologischer Rahmen	25
3.2.2 Spiegelplatte	26
3.3 Längenmesssysteme	31
3.3.1 Überblick zu den Längenmesssystemen	31
3.3.2 x- und y-Interferometer	33
3.3.3 z-Interferometer	36
3.4 Winkelmesssysteme	38
3.4.1 Autokollimatoren	38
3.4.2 Interferometrische Winkelmessung	43
3.5 Informations- und Signalverarbeitung	44
3.6 Regelungssystem	49
3.7 Steuerungs- und Bedienerkonzept	53
3.8 Messumgebung	55
3.8.1 Vakuumkammer, Temperierung und Schallisolation	55

3.8.2	Schwingungsisolation	60
3.8.3	Beobachtungskamerasystem	66
3.9	Kapitelzusammenfassung	66
4	Positioniersystem	67
4.1	Kinematikkonzepte	69
4.2	Führungssystem	71
4.2.1	Überblick zu Führungen	71
4.2.1.1	Gleitführungen	71
4.2.1.2	Wälzführungen	73
4.2.1.3	Federgelenkführungen	74
4.2.1.4	Magnetische Führungen	75
4.2.2	Realisierung in der NPMM-200	76
4.2.2.1	Laterale Bewegungsachsen	77
4.2.2.2	Vertikale Bewegungsachse	82
4.3	Antriebssystem	82
4.3.1	Konzepte für Antriebssysteme in der Nanopositioniertechnik	83
4.3.2	Überblick zu Linearantrieben	84
4.3.2.1	Elektromagnetische Aktoren, basierend auf Lorentzkraft	84
4.3.2.2	Elektromagnetische Aktoren, basierend auf Reluktanzkraft	86
4.3.2.3	Piezoelektrische Aktoren	86
4.3.3	Realisierung in der NPMM-200	87
4.3.3.1	Antriebe für die laterale Bewegung	87
4.3.3.2	Antriebe für die vertikale Bewegung	93
4.3.4	Untersuchung der Temperierung	94
4.4	Gewichtskraftkompensation	97
4.5	Endlagenschalter	105
4.5.1	Schaltende Taster	105
4.5.2	Berührungslose Sensoren	106
4.5.3	Realisierung in der NPMM-200	108
4.6	Kapitelzusammenfassung	111
5	Nullpunktsensoren	113

5.1	Übersicht zu möglichen Sensorprinzipien	114
5.1.1	Lichtschrankenprinzip	114
5.1.2	Ultraschall	116
5.1.3	Fokusverfahren	117
5.1.4	Konfokales Messprinzip	118
5.2	Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften	121
5.3	Kapitelzusammenfassung	126
6	Analyse der Positioniereigenschaften	127
6.1	Positions- und Winkelrauschen	127
6.1.1	Statischer Zustand	128
6.1.2	Dynamischer Zustand	130
6.2	Positionsauflösung	134
6.3	Positionierreproduzierbarkeit	136
6.4	Positionier- und Messdynamik	138
6.4.1	Schnelle Großstellbewegungen	139
6.4.2	Langsame Bewegungen	144
6.4.3	Kreisbewegung	147
6.5	Reproduzierbarkeit der Zentrierposition	152
6.6	Kapitelzusammenfassung	154
7	Antast- und Bearbeitungssysteme	155
7.1	Fokussensor	155
7.2	Tastschnittsensor	157
7.3	Mikrogreifer	159
7.4	Kapitelzusammenfassung	160
8	Metrologischer Nachweis	161
8.1	Reproduzierbarkeit bei Punktantastung	161
8.2	Stufenhöhenmessungen im Mikrometerbereich	165
8.3	Stufenhöhenmessungen im Millimeterbereich	168
8.4	Drift im metrologischen Kreis	169
8.5	Kapitelzusammenfassung	171
9	Anwendungsbeispiele der NPMM-200	173
9.1	Oberflächenmessung ebener Spiegel	173
9.2	Oberflächenmessung konkaver Spiegel	175

9.3 Kapitelzusammenfassung	177
10 Zusammenfassung und Ausblick	179
A Elektronikschrank der NPMM-200	187
B Elektrische Schnittstellenkonfiguration des DAS	189
C Thermische Ausdehnungsketten	191
D Messdaten der Spiegelplatte	195
Literaturverzeichnis	197

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog/Digital
ADC	Analog-Digital-Umsetzer, von engl. <i>analog-to-digital-converter</i>
AFM	Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>atomic force microscope</i>
AKF	Autokollimationsfernrohr
CCD	von engl. <i>charge-coupled device</i>
CS	<i>Control System</i> der NPMM-200
DAC	Digital-Analog-Umsetzer, von engl. <i>digital-to-analog-converter</i>
DAS	Messdatenerfassungssystem der NPMM-200, von engl. <i>Data Aquisition System</i>
DFF	relatives Autofokusverfahren, von engl. <i>depth from focus</i>
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLL	dynamische Bibliothek, von engl. <i>dynamic link library</i>
DOF	Freiheitsgrad, von engl. <i>degree of freedom</i>
EAZ	Ernst-Abbe-Zentrum, TU Ilmenau
EUVL	von engl. <i>extreme ultra violet lithography</i>
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFC	Flachbandkabel, von engl. <i>flat flex cable</i>
FPGA	im Feld programmierbare Gatter-Anordnung, von engl. <i>field programmable gate array</i>
GKK	Gewichtskraftkompensation
HE	Höheneinheit
He-Ne	Helium-Neon
I	Anteil der Übertragungsfunktion eines PID-Reglers, von engl. <i>integral</i>

IMMS	Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gGmbH, Ilmenau
IPMS	Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau
ITRS	von engl. <i>International Technology Roadmap for Semiconductors</i>
LED	Leuchtdiode, von engl. <i>light emitting diode</i>
LUT	Nachschlagetabelle, von engl. <i>look-up table</i>
LWL	Lichtwellenleiter
MEMS	Mikroelektromechanisches System, von engl. <i>Micro-Electro-Mechanical System</i>
METAS	Eidgenössisches Amt für Messwesen, Schweiz
NAMUR	Normenarbeitsgemeinschaft für Mess- und Regeltechnik in der Chemischen Industrie
NEMS	Nanoelektromechanisches System, von engl. <i>Nano-Electro-Mechanical System</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology, USA</i>
NMM	Nanomessmaschine, engl.: <i>nano measuring machine</i>
NPL	<i>National Physical Laboratory, England</i>
NPMM	Nanopositionier- und -messmaschine, engl.: <i>nano positioning and measuring machine</i>
OPV	Operationsverstärker
P	Anteil der Übertragungsfunktion eines PID-Reglers, von engl. <i>proportional</i>
PAU	Verstärkereinheit des Antriebssystems der NPMM-200, von engl. <i>power amplifying unit</i>
PC	Einzelplatzrechner, von engl. <i>personal computer</i>
PID	Anteil der Übertragungsfunktion eines Reglers, von engl. <i>proportional integral derivative</i>
Pt	Platin
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTFE	Polytetrafluorethylen
PXI	von engl. <i>PCI eXtensions for Instrumentation</i>

RMSE	Mittlerer quadratischer Fehler, von engl. <i>root mean square error</i>
SCS	System zur Messablaufsteuerung der NPMM-200, von engl. <i>Sequence Control System</i>
SDPU	Signal- und Datenverarbeitungseinheit der NPMM-200, von engl. <i>Signal and Data Processing Unit</i>
SFB	Sonderforschungsbereich
TCP/IP	Gruppe von Netzwerkprotokollen, von engl. <i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
TTL	Transistor-Transistor-Logik
VCS	Datenverarbeitungssystem der NPMM-200 für optische Sensoren, von engl. <i>Video Control System</i>

Formelzeichen

a	Beschleunigung, Abstand, Parameter
B	magnetische Flussdichte
b	Abstand, Parameter
c	Federkonstante, Sensitivitätskoeffizient
d	Durchmesser, Abstand
e	Anzahl Inkremente
F	Kraft
FWHM	Halbwertsbreite, von engl. <i>full width at half maximum</i>
f	Brennweite, Frequenz
h	Abstand
I	elektrische Stromstärke
i, \dots, i	elektrische Stromstärke, Zählerstand, Laufindex
J	Stromdichte
j	Ruck
k	Erweiterungsfaktor, Interferenzordnung
l	Länge
l_t	Totstrecke einer Interferometeranordnung
n	Brechzahl, Ladungsträgerdichte
p	Druck
r	Radius
s	Abstand, Weg, Standardabweichung
t	Zeit, Teilungsperiode
U	elektrische Spannung
v	Geschwindigkeit
X, x, \dots, x	Länge, Achsenbezeichnung
Y, y, \dots, y	Länge, Achsenbezeichnung
Z, z, \dots, z	Länge, Achsenbezeichnung
α	Winkel
β	Winkel
λ	Wellenlänge

λ_{vac}	Vakuumwellenlänge
φ	Winkel

Nicht aufgeführte Formelzeichen sind an der entsprechenden Textstelle näher erläutert.

1 Einleitung und Überblick

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die Nanopositionier- und Nanomesstechnik immer stärker an Bedeutung gewonnen, da der globale Trend zur Miniaturisierung technischer Produkte und der zunehmende industrielle Einsatz mikrotechnischer Produkte anhalten. Die mikrotechnischen Produkte werden in der Öffentlichkeit oft unter den Oberbegriffen „Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)“ und „Nanoelektromechanische Systeme (NEMS)“ diskutiert [33]. Die Mikro- und Nanotechnologien ermöglichen diese Miniaturisierung, weshalb sie schon jetzt als bedeutende Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gelten [34, 166, 167]. In Folge der stetig steigenden Anforderungen und Komplexität derartiger Systeme wachsen auch die Anforderungen an die Nanometrologie und an geeignete Messgeräte sowie Messmethoden zur Prüfung von MEMS und NEMS im Rahmen der Qualitätssicherung zur Kontrolle der gesetzten Funktionalitäts- und Qualitätsziele [83, 90, 133, 302, 312].

Nanopositionier- und Nanomessmaschinen (NPMM, NMM) können diesen Anforderungen gerecht werden. Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der TU Ilmenau wurde im Rahmen eines Thüringer Verbundprojektes gemeinsam mit der SIOS Meßtechnik GmbH und weiteren lokalen Kooperationspartnern die Nanomessmaschine NMM-1 entwickelt [91]. Aufgrund der exzellenten Ergebnisse, die mit dieser Maschine erzielt werden konnten, wurde im Jahr 2002 der Sonderforschungsbereich (SFB) 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichtet. Ziel der Forschungsaktivitäten war es, die technischen und physikalischen Grenzen für NPMMs mit Arbeitsbereichen bis $450\text{ mm} \times 450\text{ mm} \times 80\text{ mm}$, Messauflösungen bis $0,01\text{ nm}$ und Reproduzierbarkeiten kleiner 1 nm zu erarbeiten. Dies bedeutet enorme technologische Herausforderungen, da eine Vergrößerung des Messvolumens nicht durch eine reine Skalierung möglich ist. Bei der Evaluierung der ersten Antragsperiode im Jahr 2005 durch die Gutachter der DFG wurde dem SFB 622 eine internationale Spitzenstellung auf dem Forschungsfeld der

Nanopositionier- und -messtechnik bescheinigt und der Bau einer weiteren, kompletten 3-D-NPMM mit größerem Messvolumen empfohlen.

Der Beweggrund hierfür ist die Notwendigkeit der Messung, Analyse und Manipulation größerer dreidimensionaler Objekte, bei denen die NMM-1 an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Messvolumens stößt. So sind in der Halbleitertechnologie heutzutage Wafer mit Strukturbreiten von 22 nm und Außendurchmessern bis zu 300 mm Stand der Technik [128]. Für das Jahr 2015 oder 2016 werden sogar Wafer mit 450 mm Außendurchmesser und 14 nm Strukturbreiten angekündigt [84]. Diese müssen möglichst vollständig inspiziert und Defektstellen erkannt werden. Ein weiteres großes Anwendungsfeld ist die Bestimmung der Oberflächentopographie großer ebener Spiegel, die als Referenzflächen für Anlagen im Bereich der *extreme ultra violet lithography* (EUVL) dienen. Es werden Oberflächenrauheiten kleiner 1 nm gefordert, da zur Belichtung Plasmastrahlung mit einer Wellenlänge von nur 13,5 nm zum Einsatz kommt [40, 278]. Weitere Anwendungsbeispiele sind große mechanische und optische Präzisionsbauteile mit äußeren Abmessungen größer 100 mm aber geforderten Form- und Lagetoleranzen im Submikrometerbereich (z. B. Asphären). Derzeit ebenfalls ungelöst sind die Herstellung und metrologisch rückführbare Messung geeigneter Strukturhöhen- und Strukturbreitennormale für derart große Abmessungen. Darüber hinaus werden durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Präzisions- und Nanotechnologien ständig neue, bisher ungelöste, messtechnische Fragestellungen aufgeworfen.

Der Empfehlung der DFG-Gutachter folgend wurde im Rahmen von Transfer- und Verbundprojekten ein Labormuster einer neuen NPMM mit einem Messvolumen von 200 mm × 200 mm × 25 mm entwickelt und aufgebaut, das nachfolgend als NPMM-200 bezeichnet wird. An der Entwicklung dieses Messgeräts haben mehr als zehn Kooperationspartner, u. a. Fachgebiete der TU Ilmenau und Industriepartner, mitgewirkt. Das Bestreben bei der Entwicklung war es, eine Messauflösung besser als 0,08 nm, eine Positionierreproduzierbarkeit von 1 nm und eine 3-D-Messunsicherheit von weniger als 30 nm zu realisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in der Entwicklungsphase wesentliche Beiträge zur Konstruktion des Positioniersystems der NPMM-200 und zur Integration aller mechanischen Teilkomponenten in den Gesamtaufbau ge-

leistet. Darauf aufbauend ist die Zielstellung der vorliegenden Dissertation, die Leistungsfähigkeit und die Grenzen der 3-D-Positioniereigenschaften der NPMM-200 zu analysieren sowie einen metrologischen Nachweis mit Hilfe ausgewählter Normale zu erbringen. Eine umfassende Betrachtung des Messunsicherheitsbudgets am Beispiel einer Messaufgabe ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Unter Berücksichtigung der genannten Zielsetzung wird in Kapitel 2 zunächst ein Überblick über den Stand der Technik bei der Entwicklung von NPMMs gegeben. Dabei kristallisieren sich drei Konstruktionsansätze heraus, anhand denen die vorgestellten NPMMs klassifiziert werden. Die Gegenüberstellung der NPMMs erfolgt hinsichtlich Messvolumen, Messauflösung, Positioniersystem, Bedienungskonzept und Messumgebung. Aus dieser Analyse werden weitere Entwicklungsziele für die NPMM-200 abgeleitet. Da es sich bei der NPMM-200 um ein komplexes mechatronisches System handelt und zahlreiche Kooperationspartner zu der Entwicklung beigetragen haben, wird demzufolge in Kapitel 3 ein Überblick über das Gesamtsystem gegeben, um die wesentlichen Zusammenhänge darzustellen, die für das Verständnis der Arbeit erforderlich sind. Die Beschreibung umfasst das metrologische Konzept, den mechanisch-optischen Grundaufbau, die Informations- und Signalverarbeitung sowie das Steuerungs- und Bedienerkonzept. Anschließend werden in Kapitel 4 die im Rahmen dieser Arbeit geleisteten Beiträge zur Entwicklung des Positioniersystems detailliert beschrieben, das im Wesentlichen aus Antriebs- und Führungssystem, einer Vorrichtung zur Gewichtskraftkompensation und Endlagenschaltern besteht. Mit dem Ziel, die Reproduzierbarkeit der Nullposition des Gerätekoordinatensystems der NPMM-200 zu erhöhen, werden in Kapitel 5 die für die NPMM-200 neu entwickelten fasergekoppelten, konfokalen Nullpunktsensoren vorgestellt und ihre messtechnischen Eigenschaften bewertet. Daran schließt sich das Kapitel 6 an, in dem umfangreiche Untersuchungen zur Analyse der Positioniereigenschaften erfolgen. Dabei werden das permanente und das dynamische Positionsrauschen sowie die erzielbare Positionierauflösung und die Positionierreproduzierbarkeit untersucht. Weiterhin werden die während der Verfahrbewegung auftretenden Bahnabweichungen anhand typischer Bewegungsvorgänge charakterisiert. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird dann der metrologische Nachweis anhand der Messung ausgewählter Normale angestrebt. Hierzu werden in Kapitel 7 die in die NPMM-200 integrierten Antastsysteme beschrie-

ben. Die Ergebnisse des metrologischen Nachweises im darauffolgenden Kapitel zeigen, dass sich die NPMM-200 als 3-D-NPMM zur Erfüllung von Messaufgaben mit höchster Präzision eignet. Typische Anwendungsbeispiele für die NPMM-200 in Kapitel 9 runden die Betrachtungen ab. Die vorliegende Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, einem Vergleich mit den angestrebten Entwicklungszielen und einem Ausblick ab, der Vorschläge für weiterführende Forschungsthemen liefert.

2 Stand der Technik

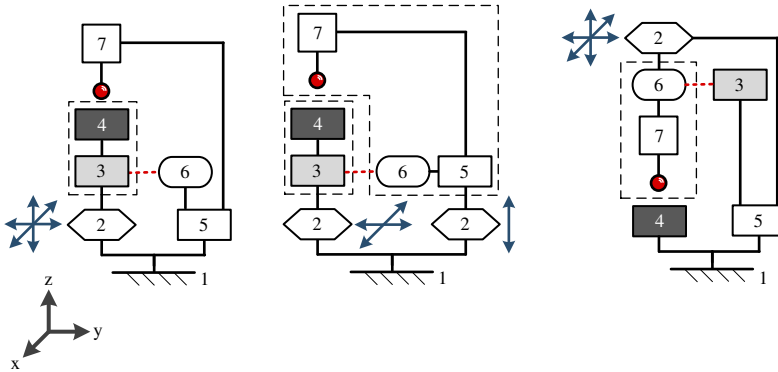
NPMMs bestehen im Allgemeinen aus einem dreiachsigen Positioniersystem mit Präzisionsführungen und -antrieben, rückführbaren Längen- und Winkelmesssystemen in einem parallelen Metrologiesystem und geeigneter Hard- und Software zur Messsignalverarbeitung sowie zur Steuerung und Regelung der Bewegung [92]. Darüber hinaus werden hochauflösende Antast- oder Bearbeitungssysteme benötigt, um die NPMM als Messgerät oder Bearbeitungsmaschine mit einem Auflösungsvermögen in subatomarer Größenordnung einzusetzen. Beim Entwicklungsprozess von NPMMs unterscheidet man zwei verschiedene Herangehensweisen. Eine Möglichkeit ist der sogenannte *Bottom-Up*-Ansatz, bei dem eine Erhöhung des Messbereichs von Rastersondenmikroskopen, insbesondere in vertikaler Richtung, angestrebt wird. Die andere Vorgehensweise ist der sogenannte *Top-Down*-Zugang, bei dem Geräte und Prinzipien, die aus der konventionellen Koordinatenmesstechnik bekannt sind [209], so modifiziert werden, dass sie den Anforderungen der Mikro- und Nanokoordinatenmesstechnik genügen [115].

In Abschnitt 2.1 werden die bedeutendsten, im Rahmen von Forschungs- oder Industrieprojekten entwickelten NPMMs vorgestellt. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, da sich weltweit zahlreiche Forschungsprojekte mit diesem Themenfeld befassen. Die am IPMS gemeinsam mit anderen Projektpartnern entwickelte Nanomessmaschine NMM-1 wird in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Sie bestimmt bis heute den Stand der Technik und ist die einzige NPMM, die als Serienprodukt aufgebaut wird und mehr als fünfzehnmal verkauft wurde [92]. Aus der Analyse des Standes der Technik werden in Abschnitt 2.3 die Entwicklungsziele für die NPMM-200 abgeleitet.

2.1 Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Bei der konstruktiven Ausführung von NPMMs sind drei Ansätze zu unterscheiden [130, 133]: *Sample Scanning Mode*, *Mixed Scanning Mode* und

Scanning Probe Mode (Abbildung 2.1). Diesbezüglich umfasst der Oberbegriff Antastsystem passive und aktive Systeme [95].



(a) *Sample Scanning Mode* (b) *Mixed Scanning Mode* (c) *Scanning Probe Mode*

Abbildung 2.1: Konstruktionsansätze für NPMMS: 1 Gerätebasis, 2 Positioniersystem, 3 Messspiegel, 4 Messobjekt, 5 metrologischer Rahmen, 6 Messsysteme, 7 Antastsystem

Ein konstruktiver Ansatz besteht darin, nur das Messobjekt zu bewegen und das Antastsystem gemeinsam mit den Längenmesssystemen an einem metrologischen Rahmen zu befestigen (*Sample Scanning Mode*). Auf diese Weise kann das Abbe'sche Komparatorprinzip in allen drei Messachsen eingehalten werden und die Längen- und Winkelmesssysteme müssen nicht bewegt werden [1]. Dieser Ansatz stößt an seine Grenzen, je größer das Messvolumen wird und je höher dementsprechend die bewegten Massen sind, da letztere die erreichbare Dynamik der vertikalen Messobjektbewegung limitieren [173]. Um dieses Problem der Bewegung großer Massen in vertikaler Richtung zu vermeiden, besteht ein weiterer konstruktiver Ansatz darin, eine kombinierte Bewegung vom Messobjekt in lateraler Richtung und vom Antastsystem, dessen Masse bekannt und deutlich kleiner ist, in vertikaler Richtung zu realisieren (*Mixed Scanning Mode*). Zur Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips in vertikaler Richtung müssen die Messsysteme in diesem Fall in vertikaler Richtung mitbewegt werden. Dadurch entstehen zusätzliche Störeinflüsse und die Masseneinsparung im Vergleich zur erstgenannten Variante

hält sich in Grenzen. Problematisch ist darüber hinaus die Kombination beider Bewegungen und die damit verbundene Regelung und Modellbildung für die Bewegungen. Der dritte Konstruktionsansatz ist der sogenannte *Scanning Probe Mode*, der aus der konventionellen Koordinatenmesstechnik bekannt ist. Koordinatenmessmaschinen sind meist in Portalbauform aufgebaut [309], und das Messobjekt wird auf dem Maschinentisch fixiert, wohingegen das am Portal befestigte Antastsystem in allen drei Achsrichtungen bewegt wird. Zur Realisierung einer NPMM mit diesem Prinzip unter Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips müssen die Längen- und Winkelmesssysteme zur Messung der Antastsystemposition in den Messkopf integriert und mitbewegt werden. Um das bewegte Gewicht zu reduzieren und möglichst viele Wärmequellen zu vermeiden, müssen die Messsysteme fasergekoppelt aufgebaut werden.

2.1.1 NPMM mit bewegtem Messobjekt

Die erste Realisierung einer NPMM mit *Sample Scanning Mode* ist die NMM-1 der TU Ilmenau, die im Abschnitt 2.2 detailliert beschrieben wird.

Kurze Zeit nach Beginn der Entwicklung der NMM-1 wurde von dem *Centre for Industrial Technology of Royal Philips Electronics N.V.* die *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine* entwickelt, die wie die NMM-1 eine abbeoffsetfreie Messanordnung besitzt (vgl. Abbildung 2.2a) [237]. Das Messobjekt wird mit der Spiegelecke in einem Volumen von $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ bewegt, wobei die Position mit drei Interferometern mit einer Auflösung von 5 nm gemessen wird, deren Achsen sich virtuell in einem Punkt schneiden, dem sogenannten Abbepunkt [237]. Auf diesen Punkt ist das Antastelement des Antastsystems ausgerichtet. Der Positioniertisch wird von elektromagnetischen Linearmotoren angetrieben und von Luftlagererelementen geführt. Außerdem ist eine pneumatische Gewichtskraftkompensation integriert. Der metrologische Rahmen ist aus einer Aluminiumlegierung gefertigt. Zur Korrektur der thermischen Längenausdehnung dieses Rahmens sind 16 Temperatursensoren eingelassen [190]. Die Möglichkeiten zur Integration verschiedener Antastsysteme werden aufgrund der monolithischen Bauweise des Rahmens stark eingeschränkt (siehe Abbildung 2.2a). Dieser erste Prototyp wurde an das Schweizer Eidgenössische Amt für Messwesen (METAS) übergeben [159, 190]. Dort wurde das Steuerungssystem



(a) Prototyp, übergeben an METAS [159] (b) ISARA [124]

Abbildung 2.2: *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine - ISARA*

durch ein in LabVIEW Implementiertes ersetzt. Dadurch lassen sich die Messabläufe mit Hilfe der kommerziellen Messsoftware Quindos von Hexagon Metrology PTS GmbH steuern [109, 191].

Ein zweiter, weiterentwickelter Prototyp wurde in Zusammenarbeit mit der Firma *IBS Precision Engineering* aufgebaut, der dann unter dem Namen *ISARA* kommerziell angeboten wurde (vgl. Abbildung 2.2b). Die Interferometer wurden in diesem Messgerät durch kommerzielle, fasergekoppelte Interferometer von der Firma *Renishaw plc* ersetzt, um den Wärmeeintrag in den Messaufbau zu verringern. In [231] wird angegeben, dass sich die Messauflösung dadurch auf 0,39 nm verbessert hat. Die aerostatischen Führungen wurden durch lineare Wälzkörperführungen mit Kugeln ersetzt. Darüber hinaus wurde Invar 36[®] für den metrologischen Rahmen anstelle von Aluminium verwendet. In [61] wird angegeben, dass die 1-D Messunsicherheit auf diese Weise auf 15 nm reduziert werden konnte.

Vor wenigen Jahren wurde in einem niederländischen Gemeinschaftsprojekt der TU Eindhoven, *NTS Systence*, *TASS Software Professionals* und *Xpress Precision Engineering* die NPMM *TriNano* entwickelt, die ebenfalls den *Sample Scanning Mode* umsetzt (Abbildung 2.3). Sie unterscheidet sich von den bisher vorgestellten NPMMs dieser Bauart insbesondere dadurch,

dass sie kein rechteckiges Messvolumen besitzt, sondern eins in Form einer doppelten dreiseitigen Pyramide (Abbildung 2.3a).

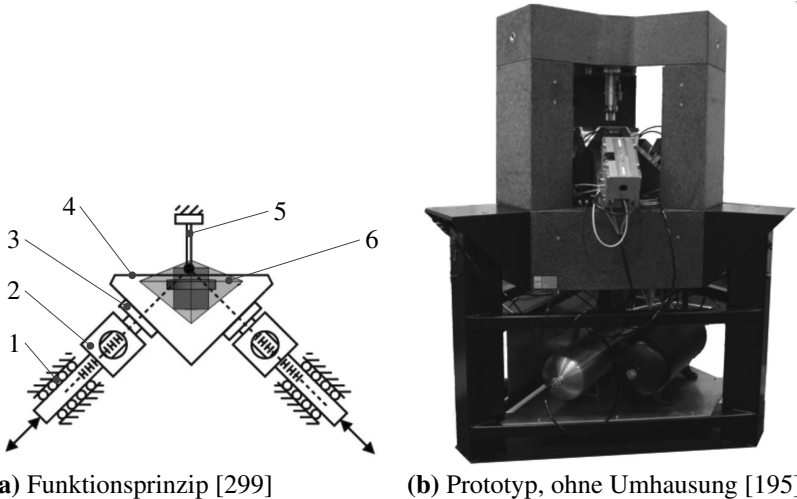


Abbildung 2.3: *TriNano*: 1 Antrieb und Wälzkörperführung, 2 Längenmesssystem, 3 aerostatische Führung, 4 Messobjektträger, 5 Antastsystem, 6 Visualisierung des Messvolumens

Das resultiert aus dem Einsatz eines tetraederförmigen Messobjektträgers aus Aluminium, dessen rechtwinklig zueinander angeordnete, identische Seitenflächen als Führungsflächen dienen [38]. Über drei Festkörpergelenke und vakuumvorgespannte aerostatische Führungen wird er mit dem Positioniersystem verbunden. Letzteres umfasst drei identische Baugruppen, die jeweils aus Linearantrieb, Wälzkörperführung und inkrementalem Längenmesssystem mit Maßstab aus Zerodur® bestehen. Die Maßstäbe besitzen eine Auflösung von 1 nm. Diese Baugruppen sind so angeordnet, dass sich die virtuelle Verlängerung ihrer Messachsen in einem Punkt schneiden (Abbildung 2.3a). Dadurch wird das Abbe'sche Komparatorprinzip in allen drei Messachsen eingehalten [235]. Das Hauptentwicklungsziel der *TriNano* ist eine kostengünstige NPMM mit einer 3-D-Messunsicherheit kleiner 100 nm zu realisieren, die kommerziell gut verfügbare Antriebe, Führungen und Messsysteme verwendet [234].

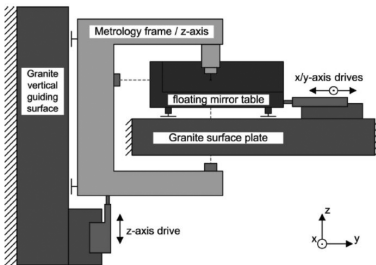
Ein Prototyp dieses Messgeräts wurde aufgebaut. Derzeit werden die messtechnischen Eigenschaften untersucht [196, 298]. In [195] wird auf deren Basis angegeben, dass die angestrebte 3-D-Messunsicherheit von weniger als 100 nm erreicht werden kann. Als Antastsystem wird ein piezoresistiver Mikrotaster (Gannen-XM von der niederländischen Firma *Xpress Precision Engineering* [36, 37]) eingesetzt. Es ist eine universelle Antastsystemschnittstelle vorhanden und der weitere Entwicklungsplan sieht die Integration eines Rasterkraftmikroskops sowie eines Weißlichtmikroskops vor. Die kommerzielle Vermarktung der *TriNano* hat in der zweiten Jahreshälfte 2011 begonnen und wird von *Xpress Precision Engineering* vorangetrieben. Es sind derzeit zwei kommerzielle Varianten N-100 und N-300 in Planung, die sich hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit unterscheiden [300].

Zur Erhöhung der Präzision werden in [253] Konzepte für eine ähnliche Anordnung mit interferometrischen Längenmesssystemen vorgeschlagen, bei welchen die Außenflächen des tetraederförmigen Messobjektträgers dann als Messspiegel für die Interferometer dienen.

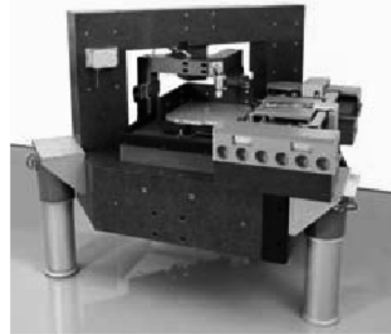
2.1.2 NPMM mit kombinierter Bewegung von Messobjekt und Antastsystem

Eine NPMM mit kombinierter Bewegung von Messobjekt und Antastsystem ist die *ISARA 400*, der Nachfolger der *ISARA* mit einem deutlich größeren Messvolumen von 400 mm × 400 mm × 100 mm [62, 272]. Dieses Messgerät wird von der Firma *IBS Precision Engineering* entwickelt und kommerziell angeboten. Die Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips in allen drei Achsen wird erreicht, indem die x- und y-Interferometer gemeinsam mit dem Antastsystem an einem metrologischen Rahmen aus Siliziumcarbid befestigt sind und dieser Rahmen vertikal bewegt wird (Abbildung 2.4a) [60].

Dementsprechend hoch sind die Seitenwände der in lateraler Richtung beweglichen Spiegelecke aus Zerodur[®] ausgeführt. Die vertikale Bewegung wird ebenfalls interferometrisch gemessen. Alle Interferometer sind kommerzielle Ausführungen, deren Auflösung mit 1,6 nm angegeben wird [125]. Die Spiegelecke wird in lateraler Richtung mit vorgespannten aerostatischen Führungen auf einem Granitfundament abgestützt, wohingegen die Bewegung von zwei seitlich angeordneten Antrieben erzeugt und mit Hilfe von Profilschienenführungen geführt wird. Die Führung des in vertikaler Richtung be-



(a) Funktionsprinzip [61]



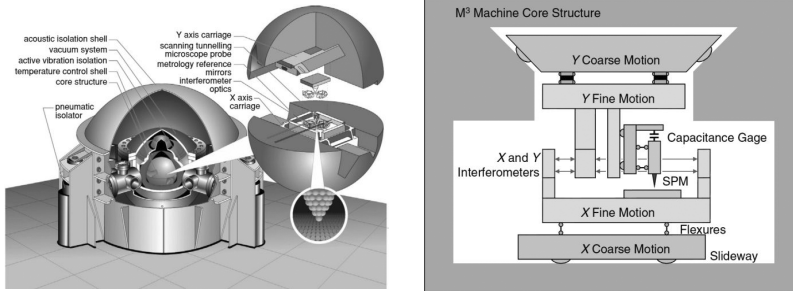
(b) Prototyp, ohne Umhausung [274]

Abbildung 2.4: ISARA 400

wegen metrologischen Rahmens erfolgt ebenfalls aerostatisch. Das Eigengewicht kann mit Hilfe einer adaptiven pneumatischen Gewichtskraftkompensation ausgeglichen werden [273]. Als Sicherheitsmechanismus ist eine Bremse integriert, die den Rahmen klemmt, wenn die Antriebe oder die Druckluft ausgeschaltet werden. Um die bis zu 32 kg schweren Messobjekte auf der Spiegelecke zu positionieren, ist eine Zuführeinrichtung zur Handhabung der Messobjekte integriert. Die *ISARA 400* ist als Universalmessgerät konzipiert und besitzt eine Wechselschnittstelle für verschiedene Antastsysteme. Sie wird von *IBS Precision Engineering* kommerziell mit einem 3-D-Mikrotaster (*Triskelion* [61]) angeboten. Die Integration eines Rasterkraftsensors und eines optischen Sensors ist ebenfalls möglich [125]. Als Messunsicherheiten werden 1-D 45 nm ($k = 2$) und 3-D 100 nm ($k = 2$) angestrebt [310].

Eine weitere Nanomessmaschine dieses Typs, allerdings mit deutlich kleinerem Messvolumen – insbesondere in vertikaler Richtung – ist die *Molecular Measuring Machine* des *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (Abbildung 2.5), die als Labormuster aufgebaut wurde [154, 293]. Das Messvolumen beträgt $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ und die Auflösung der interferometrischen Längenmesssysteme wird in [155] im Subnanometerbereich angegeben. Das kinematische Konzept baut darauf auf, dass die x-Achse das Messobjekt und die Messspiegelanordnung bewegt (Abbildung 2.5b). Die y-Achse bewegt das Antastsystem und die Strahlteileranordnungen der Interferometer zur Messung der lateralen Position. Das Antastsystem wird darüber

hinaus auch in z-Richtung bewegt. Diese Anordnung hat einen Abbeoffset von 10 mm [152].



(a) Gesamtaufbau

(b) Funktionsprinzip Positioniersystem

Abbildung 2.5: *Molecular Measuring Machine* [153]

Die Positionierung erfolgt in allen drei Achsen mit Hilfe einer Kombination von Groß- und Kleinstellpositioniersystem. Für das Großstellpositioniersystem werden in lateraler Richtung Gleitführungen mit Führungsflächen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) und piezoelektrische Schreitantriebe genutzt. Das Kleinstellpositioniersystem setzt Parallelfederführungen und Piezostapelaktoren ein [155]. Bei der vertikalen Achse wird als Antriebssystem ebenfalls eine Kombination von piezoelektrischem Schreitantrieb und Piezoaktor genutzt. Jedoch erfolgt die Führung des Großstellpositioniersystems ausschließlich über das zylindrische Gehäuse. Die Großstellbewegung wird nur vor Messungen ausgeführt, sodass Übersprechen zwischen den Bewegungsachsen sowie den Groß- und Kleinstellantrieben minimiert wird. Die Führung des vertikalen Kleinstellpositioniersystems erfolgt über Membranfederführungen [152]. Die laterale Position der kombinierten Bewegung von Groß- und Kleinstellpositioniersystem wird interferometrisch ermittelt, wohingegen die vertikale Position des Großstellsystems potentiometrisch über eine relative Potentialdifferenz und die des Kleinstellpositioniersystems kapazitiv detektiert wird [169]. Das Messgerät wird im Hochvakuum bei 10^{-5} Pa betrieben [152]. Es ist mit einem System zur aktiven Schwingungsdämpfung ausgestattet [161]. Die Bedienung erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche in MATLAB [152]. Als Antastsysteme wurden verschiedene Rastersondentechniken implementiert [153]. Das Ziel, 1 nm Messunsicherheit für 50 mm Punkt

zu Punkt-Messungen zu gewährleisten, wurde nach Angaben in [153] nicht erreicht.

Das metrologische Rasterkraftmikroskop *NRC Metrological AFM*, das vom *Institute for National Measurement Standards* des *National Research Council* von Kanada vorgestellt wurde, setzt diesen konstruktiven Ansatz aus kombinierter Bewegung von Messobjekt und Antastsystem ebenfalls um (Abbildung 2.6). Das Messvolumen wird in [70] mit $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ angegeben. Laut den Angaben in [70] wird eine Messauflösung im Subnanometerbereich bei etwa $0,5\text{ nm}$ angestrebt.

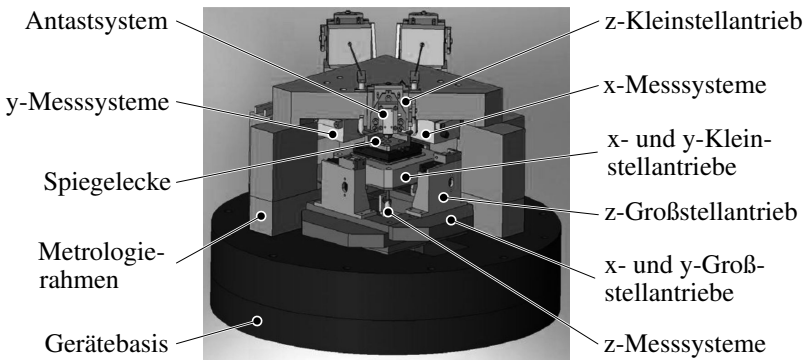


Abbildung 2.6: *NRC Metrological AFM* [70]

Das Messobjekt wird gemeinsam mit der Spiegelecke in lateraler Richtung durch eine Kombination von Groß- und Kleinstellpositioniersystem sowie in vertikaler Richtung nur durch ein Großstellpositioniersystem bewegt. Der Kleinstellantrieb in z-Richtung ist in die Antastsystemschnittstelle integriert, um hohe Bewegungsfrequenzen realisieren zu können. Eine Besonderheit in der Konstruktion besteht darin, dass für die Positioniersysteme nur kommerziell verfügbare Komponenten eingesetzt werden. Die Position der Spiegelecke wird mit drei SP 2000 Interferometern der Firma SIOS Meßtechnik GmbH und drei selbstentwickelten Winkelsensoren gemessen, die einen Teil des rückkommenden Messstrahls der Interferometer nutzen. Die vertikale Antastsystemposition des Kleinstellpositioniersystems wird kapazitiv gemessen. Um die rotatorischen Abweichungen der Groß- und Kleinstellantriebe der Spiegelecke auszugleichen, ist sie auf diesem Positioniersystem mit 6 Scher-

piezoaktoren, angeordnet auf zwei Ebenen, drehbar gelagert. Diese ermöglichen Rotationen von $30 \mu\text{rad}$ um die Achsen x und y sowie $75 \mu\text{rad}$ um die z -Achse. Im Moment erfolgt der Aufbau als Rasterkraftmikroskop. Jedoch ist eine universelle Antastsystemschnittstelle integriert, sodass auch andere Antastsysteme verwendet werden können, z. B. ein Weißlicht-Mikroskop [70]. Es wird eine Messunsicherheit von 1 nm angestrebt, die jedoch nicht die Beiträge des Antastsystems zum Messunsicherheitsbudget berücksichtigt [70].

Als weiteres Beispiel für eine NPMM mit *Mixed Scanning Mode* sei die *micro-CMM* genannt, die unter der Leitung von Prof. Fan an der *National Taiwan University* entwickelt wurde (vgl. Abbildung 2.7). Das Messvolumen wird mit $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ angegeben [73]. Das Messobjekt wird lateral und das Antastsystem vertikal bewegt [74]. Die Konstruktion unterscheidet sich von den anderen genannten Messgeräten hauptsächlich in der modifizierten Portalanordnung für das Antastsystem. Das Portal ist nicht als Rechteck, sondern als Bogen ausgeführt, wodurch sich die Steifigkeit erhöht und die Durchbiegung reduziert – insbesondere bei hochfrequenten Bewegungen des Antastsystems [72]. Als Antastsystem wird ein neuentwickelter Fokussensor eingesetzt, dessen Messfleckdurchmesser in der Fokusebene ca. $1 \mu\text{m}$ beträgt und der ein vertikales Auflösungsvermögen im Nanometerbereich besitzt [71]. Eine Messunsicherheit von 30 nm ($k = 2$) konnte unter gewissen Randbedingungen erreicht werden [73].

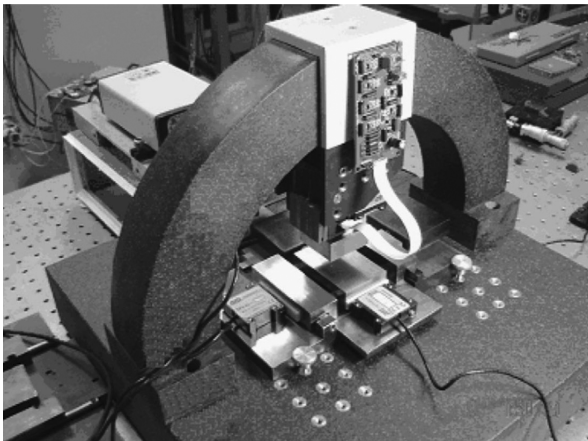


Abbildung 2.7: *micro-CMM* der *National Taiwan University* [73]

2.1.3 NPMM mit bewegtem Antastsystem

Die erste Realisierung einer NPMM, bei welcher der Messkopf dreiachsig bewegt und das Messobjekt auf einer Grundplatte aus Zerodur[®] befestigt wird, erfolgte in den 1980er Jahre von der Firma Carl Zeiss mit der Typenbezeichnung *M400* (Abbildung 2.8) für die hausinterne Qualitätssicherung [24].

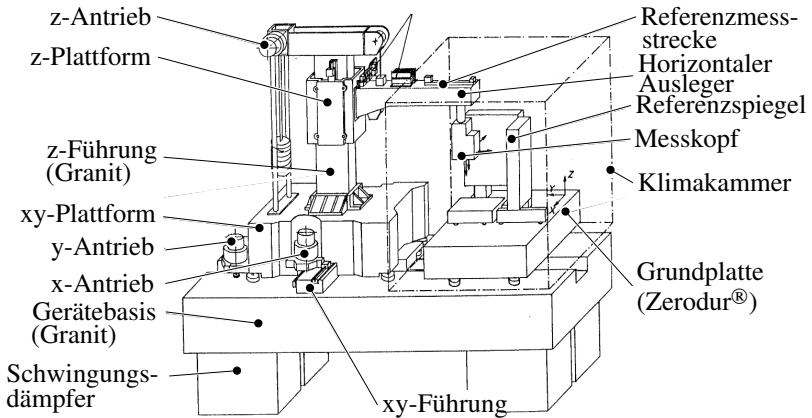


Abbildung 2.8: *M400* der Firma Carl Zeiss [24]

Am Messkopf befindet sich ein mechanisches Antastsystem, welches in einem Messvolumen von $400 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ bewegt wird und das Messobjekt mit einer Antastkraft $< 0,1 \text{ N}$ berührt. Der Messkopf wird von einem auf dem Gerätefundament angeordneten Helium-Neon-Laser (He-Ne-Laser) über Strahlableitungen versorgt [260]. Im Messkopf wird das Laserlicht für fünf Planspiegelinterferometer und eine Referenzmessstrecke, die zur Temperaturkompensation dient, genutzt. Die Messauflösung wird mit 10 nm angegeben [24], was für die damalige Zeit über den Stand der Technik hinaus ging.

Der Messkopf wird mit einem dreiachsigen Positioniersystem bewegt. Für die lateralen Bewegungsachsen werden Reibradantriebe eingesetzt, wohingegen für die vertikale Achse ein Riemenantrieb verwendet wird. Alle Bewegungsachsen werden aerostatisch geführt. Das Abbe'sche Komparatorprinzip wird nur für die z-Richtung eingehalten. Für die anderen Achsen können Abweichungen durch den vertikalen Abstand zwischen den Messstrahlen der

Achsen x und y und dem Antastelement auftreten [262]. Die Anordnung der fünf Interferometerachsen ermöglicht Winkelmessungen zur Erfassung und nachträglichen Korrektur dieser Abweichungen. Der Messkopf, das Messobjekt und die Referenzspiegel für die Interferometerachsen befinden sich in einer Klimakammer mit einer Temperaturstabilität von ± 50 mK [24]. Die erforderliche Elektronik und das Bedienprogramm wurden von Carl Zeiss für die *M400* speziell entwickelt. Heutzutage wird das Messgerät nicht mehr für die reguläre Qualitätssicherung eingesetzt, denn es erfolgte keine Weiterentwicklung im Zuge der Verfügbarkeit neuerer Technologien.

Eine kommerziell verfügbare NPM, die das *Scanning probe*-Prinzip umsetzt, ist das *Ultra Accuracy 3-D Profilometer* von der Firma *Panasonic* (Abbildung 2.9) [213]. Das Messobjekt wird auf der Grundplatte fixiert. Das Antastsystem wird in einem Messvolumen von $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ in drei Achsen bewegt [292].

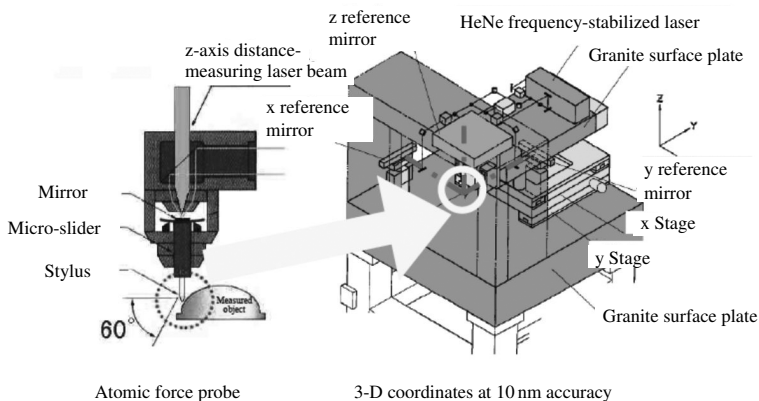


Abbildung 2.9: Panasonic *Ultra Accuracy 3-D Profilometer* [292]

Das Abbe'sche Komparatorprinzip wird nur für die vertikale Richtung eingehalten. Als Antastsystem wird ein Fokussensor eingesetzt. Dieser misst die Position eines vertikal verschiebbaren Bolzens. An dem Bolzen können entweder eine Rubinkugel mit $500\ \mu\text{m}$ Durchmesser oder die Spitze eines Tastschnittgeräts ($2\ \mu\text{m}$ Kegelradius) als Antastelement befestigt werden. Auf der Oberseite des Bolzens ist ein Spiegel als Messfläche für den Fokussensor und den fokussierten Messstrahl des z -Interferometers angebracht [301]. Zwei

weitere Interferometer dienen zur Erfassung der lateralen Position. Alle drei Interferometer und der zur Versorgung benötigte He-Ne-Laser werden lateral bewegt. Die Referenzspiegel sind an einem gemeinsamen Rahmen gestellfest angeordnet. Nach Angaben in [292] erreicht das Messgerät eine „Genauigkeit“ von 10 nm.

2.2 Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1

Die Nanomessmaschine NMM-1 setzt den *Sample Scanning Mode* um. Sie wurde Ende der 90er Jahre entwickelt und unter anderem in [91] beschrieben. Sie ermöglicht in einem Messvolumen von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ eine Messauflösung von 0,1 nm und wird von der Firma SIOS Meßtechnik GmbH als kommerzielles Produkt mit Multisensorik angeboten [162, 269]. Die Besonderheit der Konstruktion der NMM-1 liegt in der Realisierung des Abbe'schen Komparatorprinzips für alle drei Messachsen der interferometrischen Längenmesssysteme im gesamten Messbereich [132]. Dies wird durch ein am metrologischen Rahmen fixiertes und somit unbewegliches Antastsystem, einen bewegten Probenträger (Spiegelecke) und eine Anordnung der Interferometer gemäß Abbildung 2.10 erreicht.

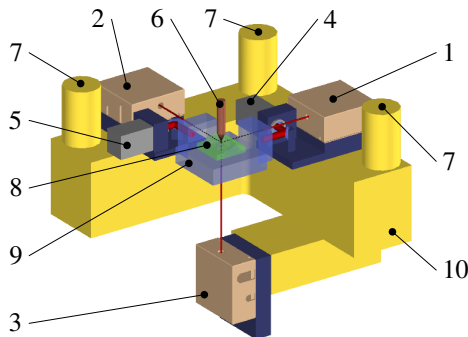


Abbildung 2.10: Grundanordnung der NMM-1 [91]: 1 x-Interferometer, 2 y-Interferometer, 3 z-Interferometer, 4 Nick- und Gierwinkelsensor, 5 Roll- und Gierwinkelsensor, 6 Antastsystem (raumfest), 7 Befestigungspunkte für das Antastsystem, 8 Messobjekt, 9 Spiegelecke, 10 metrologischer Rahmen

Die bewegliche Spiegelecke dient als Referenzkoordinatensystem [137]. Das Antastsystem berührt im virtuellen Schnittpunkt der Messachsen der Interferometer die Messobjektfläche und dient als Nullindikator [136]. Der Metrologierahmen wird gemeinsam mit dem dreiachsigen Positioniersystem von der Gerätebasis getragen, die aus dem Naturhartgestein Gabbro Impala gefertigt wird. Jeder Antrieb wirkt auf eine eigene Stellplattform und die oberste in allen drei Achsen bewegliche Plattform trägt die Spiegelecke und das Messobjekt (siehe Abbildung 2.11).

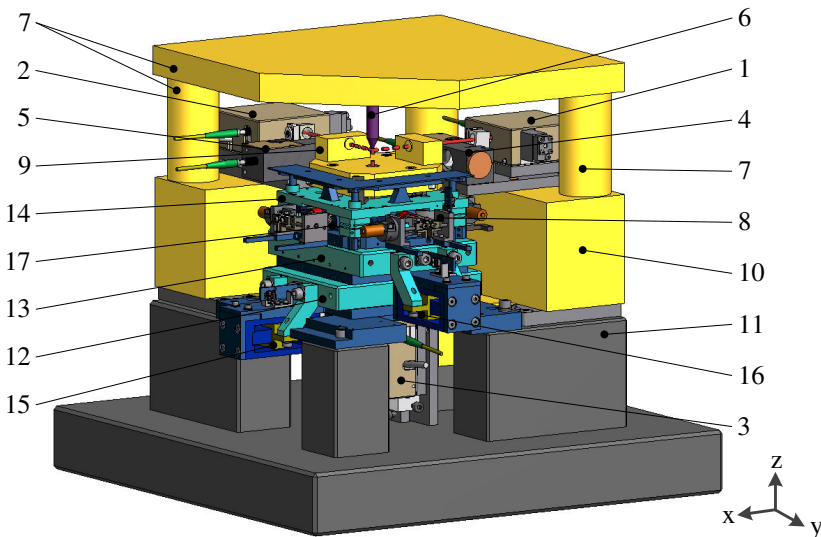


Abbildung 2.11: Mechanischer und optischer Grundaufbau der NMM-1 (in Anlehnung an [91]): 1 x-Interferometer, 2 y-Interferometer, 3 z-Interferometer, 4 Nick- und Gierwinkelsensor, 5 Roll- und Gierwinkelsensor, 6 Antastsystem (raumfest), 7 Befestigungspunkte für das Antastsystem, 8 Gewichtskraftkompensation für die z-Antriebe, 9 Spiegelecke, 10 metrologischer Rahmen, 11 Gerätebasis, Führungen der 12 x-, 13 y- und 14 z-Achse sowie Antriebe der 15 x-, 16 y- und 17 z-Achse

Die Stellplattformen für die lateralen Bewegungen sind hinsichtlich ihres Führungs- und Antriebssystems identisch aufgebaut. Als Führungen kommen horizontal angeordnete, vorgespannte Wälzkörperführungen mit Kugeln zum

Einsatz. Als Antrieb wird jeweils ein elektromagnetischer Linearantrieb mit rechteckigem Magnetquerschnitt eingesetzt. Die vertikale Bewegung wird von vier zylindrischen elektromagnetischen Direktantrieben erzeugt. Zur vertikalen Führung kommen drei Kugelbuchsenführungen zum Einsatz. Zur Ausregelung möglicher Winkelabweichungen um die x- und die y-Achse wurden ergänzend zu den interferometrischen Längenmesssystemen zwei optoelektronische Winkelsensoren integriert, die auf dem Prinzip eines Autokollimationsfernrohres (AKF) basieren. Da in vertikaler Richtung nicht nur die Messbewegung ausgeführt sondern zusätzlich noch die Gewichtskraft der bewegten Teile überwunden werden muss, ist jedem z-Antrieb eine Einheit zur Gewichtskraftkompensation (GKK) zugeordnet. Die Kompensationskraft kann auf die Messobjektmasse abgestimmt werden. Dadurch werden die Massen der Stellplattform, der Spiegelecke und des Messobjekts kompensiert, so dass möglichst wenig Wärme in den Antrieben erzeugt wird. Die Elektronikeinheit der NMM-1 zur Messdatenerfassung und -verarbeitung sowie zur Versorgung der elektronischen Komponenten des Aufbaus kann räumlich getrennt aufgestellt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise, der Messdaten- und Signalverarbeitung sowie der verschiedenen möglichen Betriebsmodi findet sich in [92].

2.3 Entwicklungsziele

Die Analyse des Stands der Technik bei der Entwicklung von NPMMs zeigt, dass die *ISARA 400* derzeit die einzige kommerziell verfügbare, universale NPMM mit großem Messvolumen ist, die als 3-D-Nanokoordinatenmessgerät, Hochgeschwindigkeitsoberflächenmessgerät und großflächiges Rastersondenmikroskop konzipiert ist. Allerdings limitiert die Auflösung der interferometrischen Längenmesssysteme die Positionierauflösung und die messbaren Strukturbreiten. Die erreichbare 3-D-Messunsicherheit wird mit 100 nm ($k = 2$) angegeben.

Das Spezialmessgerät *Nanomefos*, das für die schnelle (bis 250 mm/s), berührungslose Oberflächenmessung großer optischer Präzisionsobjekte (Asphären, Freiformflächen etc.) mit bis zu 500 mm Außendurchmesser und 100 mm Höhe in einem Gemeinschaftsprojekt mehrerer niederländischer Firmen, der TU Eindhoven und dem *National Physical Laboratory* (NPL)

entwickelt und als Prototyp aufgebaut wurde [99, 100], erreicht nach Angaben in [101] zwar 3-D-Messunsicherheiten in der Größenordnung von 30 nm ($k = 2$), eignet sich jedoch nicht als 3-D-Nanokoordinatenmessgerät.

Demzufolge wird dem steigenden Bedarf der metrologisch rückführbaren Messung größerer dreidimensionaler Objekte mit Messunsicherheiten im Nanometerbereich derzeit nur ungenügend Rechnung getragen. Für die Analyse und Manipulation derartige Objekte steht kein Gerät zur Verfügung. Im Vergleich zur Halbleitermetrologie bestehen die großen technologischen Herausforderungen insbesondere in der metrologischen Präzision bei der Erfassung der dritten Dimension.

Um sich deutlich vom Stand der Technik abzuheben, lassen sich die folgenden Entwicklungsziele für die NPMM-200 ableiten:

- Messvolumen: 200 mm × 200 mm × 25 mm
- Messauflösung ≤ 20 pm
- Positionierreproduzierbarkeit ≤ 1 nm
- 3-D-Messunsicherheit ≤ 30 nm
- Eignung für Multisensorik: Integration verschiedener Antastsysteme (taktile, optische, ...) und von Analyse- sowie Bearbeitungssystemen

Tabelle 2.1: Abgrenzung der Leistungsfähigkeit der NPMM-200 vom Stand der Technik

Messgerät	Messvolumen	Messauflösung	Positionierreproduzierbarkeit	3-D-Messunsicherheit
NMM-1	25 mm × 25 mm × 5 mm	0,08 nm	≤ 1 nm	≤ 50 nm [246]
ISARA 400	400 mm × 400 mm × 100 mm	1,6 nm	≤ 500 nm	100 nm [310]
NPMM-200	200 mm × 200 mm × 25 mm	$\leq 0,08$ nm	≤ 1 nm	≤ 30 nm

3 Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM-200

3.1 Metrologisches Konzept

Das metrologische Konzept der NPMM-200 (Abbildung 3.1) folgt dem der NMM-1. Es ist ebenfalls der *Sample Scanning Mode* realisiert worden, d. h., das Messobjekt wird dreidimensional positioniert und der Antastpunkt, festgelegt durch den virtuellen Schnittpunkt der drei Interferometerstrahlen von x-, y- und z-Interferometer, ist raumfest. Auf diese Weise wird das Abbe'sche Komparatorprinzip in allen drei Messachsen eingehalten. Es gibt jedoch wesentliche Unterschiede und Erweiterungen im metrologischen Konzept aufgrund des im Vergleich zur NMM-1 deutlich größeren Messvolumens von $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 25\text{ mm}$, die im Folgenden vorgestellt werden.

Der metrologische Rahmen als mechanisch stabiles und ausdehnungsarmes Bezugssystem trägt die Längen- und Winkelmesssysteme, Referenzsensoren für die Längenmesssysteme sowie das Antastsystem. In der NPMM-200 werden für die Achsen x und y je ein Zweistrahlinterferometer eingesetzt und für die z-Achse ein Dreistrahlinterferometer. Damit stehen insgesamt sieben Interferometerachsen zur Längen- und Winkelmessung zur Verfügung, d. h. eine Interferometerachse mehr als geometrische Freiheitsgrade. Diese redundante Anordnung ist realisiert worden, um verschiedenste messtechnische Untersuchungen durchführen zu können.

Ein Unterschied im metrologischen Konzept ist, dass in der NMM-1 die taktilen Endlagenschalter des Positioniersystems gleichzeitig als Nullpunktsensoren für die Einstrahlinterferometer eingesetzt werden. In der NPMM-200 werden konfokale Sensoren als Referenzsensoren für die interferometrische Längenmessung eingesetzt. Für die interferometrische Winkelmessung der NPMM-200 werden zwei optoelektronische, absolut messende Winkelsensoren zur Initialisierung eingesetzt. Sie können zusätzlich auch zur perma-

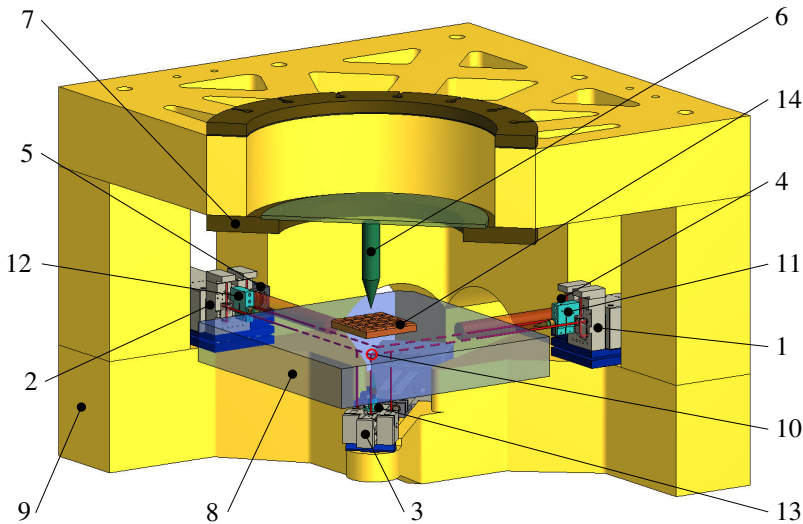


Abbildung 3.1: Grundanordnung der NPM-200: 1 x-Interferometer, 2 y-Interferometer, 3 z-Interferometer, 4 Nick- und Gierwinkelsensor, 5 Roll- und Gierwinkelsensor, 6 Antastsystem (raumfest), 7 Befestigungspunkte für das Antastsystem, 8 Spiegelplatte, 9 metrologischer Rahmen, 10 Abbepunkt, 11 x-Referenzsensor, 12 y-Referenzsensor, 13 z-Referenzsensor, 14 Messobjekt

nenen Erfassung und Regelung der Winkelabweichungen eingesetzt werden. Dies stellt somit eine Redundanz zur interferometrischen Winkelmessung dar.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied in den metrologischen Konzepten der NMM-1 und der NPM-200 besteht in der Anordnung der z-Interferometer (Abbildung 3.2). Bei der NMM-1 ist es unterhalb des Positioniersystems angeordnet, so dass jede Stellplattform eine Öffnung zur Durchführung des Laserstrahls bis zur Spiegelecke besitzen muss (vgl. Abbildung 2.11). Um diese Messstrecke deutlich zu verkleinern, ist das z-Interferometer der NPM-200 daher oberhalb der Stellplattformen für die lateralen Bewegungsrichtungen angeordnet. Dadurch lassen sich die Messabweichungen bei der interferometrischen Längenmessung aufgrund von Temperaturgradienten oder Luftverwirbelungen reduzieren.

Die in allen drei Achsen bewegliche Spiegelplatte der NPM-200 dient – analog zur Messspiegelecke der NMM-1 – als Probenhalterung und defi-

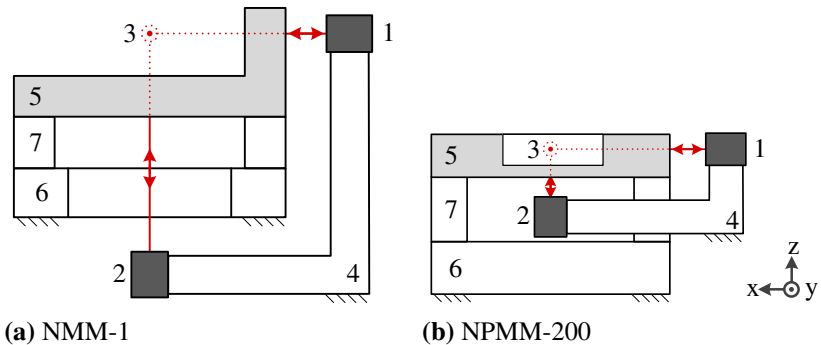


Abbildung 3.2: Gegenüberstellung der metrologischen Konzepte von NMM-1 und NPMM-200 (in Anlehnung an [96]): 1 x- und 2 z-Interferometer, 3 Messstrahl vom y-Interferometer, 4 metrologischer Rahmen, 5 Spiegelecke bzw. -platte, Führungs- und Antriebssysteme für 6 laterale Bewegungen (x und y) sowie 7 z-Bewegung

nirt mit ihren Spiegelflächen das Referenzkoordinatensystem (siehe Abbildung 3.1). Ein bedeutsamer Unterschied zwischen den metrologischen Konzepten der NMM-1 und der NPMM-200 besteht jedoch hinsichtlich des Messvolumens für Messungen mit dem Anspruch einer abbeoffsetfreien Längenmessung. Bei der NMM-1 kann im gesamten Messvolumen im Abbepunkt gemessen werden. Bei der NPMM-200 wurde auf hochgezogene Seitenspiegel verzichtet und anstattdessen eine Öffnung in der Spiegelplatte vorgesehen (Abbildung 3.2b), um im Abbepunkt messen zu können. Somit kann nur ein eingeschränktes Messvolumen in Form eines Zylinders mit einem Durchmesser von 130 mm für abbeoffsetfreie Messungen genutzt werden. Das gesamte Messvolumen von 200 mm × 200 mm × 25 mm steht nur zur Verfügung, wenn das Antastsystem einen vertikalen Offset zum Abbepunkt besitzt. Aus dem vertikalen Versatz des Antastpunktes von mindestens 44,5 mm resultiert eine Messabweichung zweiter Ordnung, die für den Abstand der Seitenspiegelflächen zum Abbepunkt von 172,5 mm ca. 0,2 nm beträgt. In Zukunft ist für das Antastsystem eine vertikale Verstelleinrichtung vorgesehen, um auch höhere Messobjekte problemlos messen zu können. Dann können dieser vertikale Abbeoffset und die daraus resultierenden Messabweichungen entsprechend größer sein.

3.2 Mechanischer und optischer Grundaufbau

Das aus dem metrologischen Konzept abgeleitete konstruktive Gesamtkonzept der NPMM-200 ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Eine wichtige Randbedingung bei der Umsetzung der Konstruktion war, dass der Messbetrieb im Grobvakuum [141] bei ungefähr 1 mbar möglich sein soll, um die Messunsicherheitsbeiträge aufgrund von Umgebungseinflüssen zu reduzieren [131] und so das Ziel einer 3-D-Messunsicherheit ≤ 30 nm erreichen zu können.

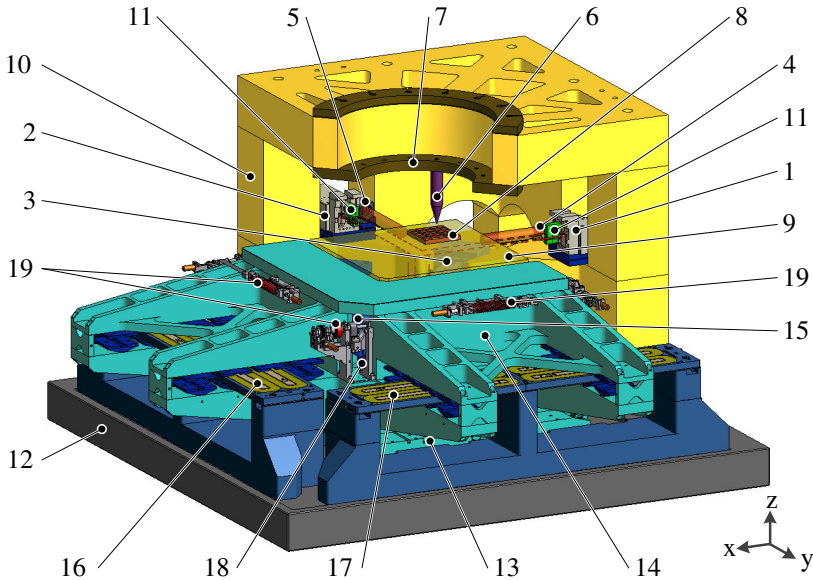


Abbildung 3.3: Mechanischer und optischer Grundaufbau der NPMM-200: 1 x-, 2 y- und 3 z-Interferometer, 4 Nick- und Gierwinkelsensor, 5 Roll- und Gierwinkelsensor, 6 Antastsystem (raumfest), 7 Befestigungspunkte für das Antastsystem, 8 Messobjekt, 9 Spiegelplatte, 10 metrologischer Rahmen, 11 Referenzsensor, 12 Gerätebasis, 13 x-, 14 y- und 15 z-Achse, Antriebe der 16 x-, 17 y- und 18 z-Achse, 19 GKK

Aufgrund des Einsatzes im Vakuum ergeben sich besondere konstruktive Anforderungen. Zum einen müssen umfassende Maßnahmen zur Abführung der Wärmeenergie von wärmegenerierenden Baugruppen getroffen werden, da der Wärmeübergang durch Konvektion im Vakuum im Vergleich zur At-

mosphäre vernachlässigbar ist und nur Wärmestrahlung auftritt. Zum anderen muss die Vakuumtauglichkeit bei der Werkstoffauswahl und der Konstruktion berücksichtigt werden, um das Ausgasen leicht flüchtiger chemischer Verbindungen zu minimieren [25, 78, 98, 117]. Letztere lagern sich zeitweise oder dauerhaft an andere im Rezipienten befindliche Baugruppen an und behindern die uneingeschränkte Funktionalität bspw. der optischen Systeme [277]. In den folgenden Abschnitten werden die Baugruppen des mechanisch-optischen Grundaufbaus beschrieben, welche in Folge der Arbeitsteilung im Transferprojekt von anderen Kollegen des IPMS bzw. weiteren Projektpartnern entwickelt und im Rahmen dieser Dissertation in das Gesamtsystem integriert wurden.

3.2.1 Gerätebasis und metrologischer Rahmen

Die Gerätebasis trägt den metrologischen Rahmen und das Positioniersystem. In vielen klassischen Koordinatenmessgeräten oder Werkzeugmaschinen sowie in manchen NPMMs werden das Naturhartgestein Gabbro Impala als Gerätebasis eingesetzt [68, 219]. Da es nicht vakuumtauglich ist, kann es für die NPMM-200 nicht verwendet werden [297]. Anstattdessen wird die Gerätebasis aus Aluminium (Alimex ACP 5080, 3.3547 AlMg4.5Mn0.7) gefertigt [4]. Da die Gerätebasis nicht im Messkreis der NPMM-200 liegt, hat der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient des Aluminiums keinen Einfluss auf die Messunsicherheitsbeiträge aufgrund von thermischer Ausdehnung. Auf der Gerätebasis wird der metrologische Rahmen spannungsarm befestigt. Hierzu liegt er auf polierten Gleitflächen aus Edelstahl (1.4301 X5CrNi18-10) auf, die mit der Gerätebasis verschraubt sind. Der metrologische Rahmen selbst wird nur am mittleren Auflagepunkt mit der Gerätebasis verschraubt. Die anderen Enden können auf den vier äußeren Auflageflächen gleiten, so dass mechanische Spannungen aufgrund der um zwei Größenordnungen unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten vom metrologischen Rahmen und der Gerätebasis vermieden werden.

Der metrologische Rahmen zählt zu den besonders funktionswichtigen und kritischen Komponenten einer NPMM (vgl. Abbildung 3.3), da er alle Messsysteme sowie das Antastsystem trägt und damit die Stabilität des Gerätekoordinatensystems sicherstellt. Deshalb muss für den metrologischen Rahmen ein Werkstoff mit sehr geringer thermischer Ausdehnung und gu-

ter Langzeitstabilität gewählt werden. Es kommen technische Gläser (z. B. BK7, Quarzglas, S-LAH79, ULE[®]) oder Glaskeramiken (z. B. Astrositall[®], Clearceram[®]-Z, Nexcera[®], Zerodur[®]) in Frage [92]. In den vergangenen Jahren galt die von der Schott AG patentierte Glaskeramik Zerodur[®] [257] als der Werkstoff der Wahl [59]. Sie wird in zahlreichen NPMMs eingesetzt. Derzeit wird die Langzeitstabilität dieser Glaskeramik in manchen Literaturquellen kritisch diskutiert [50, 288]. In [210] wird angegeben, dass Nexcera[®] eine höhere Steifigkeit und eine bessere Langzeitstabilität als Zerodur[®] aufweist. Hierzu laufen derzeit national und international an verschiedenen Forschungseinrichtungen Untersuchungen [249, 288], die mit den Untersuchungsergebnissen von Zerodur[®] aus [22] und [23] verglichen werden. Letztere haben gezeigt, dass relative Längenänderungen pro Jahr von $-0,69$ bis $-0,03$ $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ zu erwarten sind, die jedoch mathematisch gut beschrieben werden können [23]. Im SFB 622 wurden ebenfalls Langzeituntersuchungen der Materialien Quarzglas, ULE[®], Zerodur[®] und Clearceram[®]-Z begonnen, um Kriecherscheinungen und Hysterese bei mechanischer Belastung abschätzen und den Einfluss auf die Messunsicherheit bei einer konkreten Messung beurteilen zu können [180]. Aussagekräftige Untersuchungsergebnisse liegen jedoch noch nicht vor.

Beim metrologischen Rahmen der NPMM-200 wurde sich deshalb und aus wirtschaftlichen Gründen (gute Verfügbarkeit, Preis) sowie den langjährigen Erfahrungen mit der NMM-1 für die Glaskeramik Zerodur[®] mit der Dehnungsklasse 0 (thermischer Längenausdehnungskoeffizient $0 \pm 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ in einem Temperaturbereich von $0 \dots 50$ °C) entschieden [170, 251].

3.2.2 Spiegelplatte

Die Spiegelplatte ist eine weitere wichtige Komponente im metrologischen Kreis, da sie als Messobjektträger fungiert und das Referenzkoordinatensystem bildet. Sie trägt durch ihre Form- und Winkelabweichungen sowie ihre Topographie entscheidend zur Leistungsfähigkeit des Messgeräts bei. Die Kenntnis und die Langzeitstabilität dieser Abweichungen sind die Basis für das metrologische Korrekturkonzept. In [172] und [174] wurden grundlegende Entwurfsvarianten sowie neue Messspiegelkonzepte vorgestellt und diskutiert. Das Ergebnis der Untersuchungen ist, dass nur monolithische Strukturen die geforderte Langzeitstabilität sicherstellen können. Auf diesen Ergeb-

nissen aufbauend wurde vom IPMS eines der vorgestellten Messspiegelkonzepte übernommen und für die Erfordernisse der NPMM-200 adaptiert. Als Ergebnis entstand für den Messbereich von $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ eine Spiegelplatte mit den Außenabmessungen von $310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, die aus Zerodur® (Dehnungsklasse 0) gefertigt wurde und eine Gesamtmasse von 7,6 kg aufweist. Die Lagerung auf der z-Stellplattform erfolgt spannungsarm mit Halteelementen und kurzen Kugelführungen, die über Zylinderstifte realisiert werden, um die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Spiegelplatte und der Stellplattform auszugleichen [92]. Diese Halteelemente werden nachfolgend als Spiegelplattenhalter bezeichnet.

Um die Herstellungskosten für das NPMM-200-Labormuster in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu halten, wurde die Spiegelplatte mit Ebenheitsabweichungen $< \lambda/2$ und Rechtwinkligkeitsabweichungen $< 1'$ hergestellt. Diese Fertigungstoleranzen reichen jedoch nicht aus, um die angestrebte 3-D-Messunsicherheit von weniger als 30 nm zu erzielen. Deshalb ist es erforderlich, die Geometrie und die Topographie der Spiegelplatte mit Nanometerpräzision messtechnisch zu erfassen, um sie im Betrieb des Messgeräts rechnerisch in Echtzeit korrigieren zu können. Im Teilprojekt „Metrologie der NPM-Maschinen“ des SFB 622 wurden zahlreiche Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung mit einem Zygo-Interferometer der GPI™-Serie durchgeführt, das einen Messbereich von sechs Zoll (ca. 150 mm) besitzt. Es wurde zusätzlich ein zweiachsiger Positioniertisch in den Versuchsaufbau integriert, um mehrere Aufnahmen an verschiedenen Positionen machen und somit größere Spiegelflächen erfassen zu können (Abbildung 3.4). Die einzelnen Aufnahmen des Zygo-Interferometers werden dann mit einem Stitching-Algorithmus zusammengefügt [316]. Die Reproduzierbarkeit dieser aus Einzelaufnahmen zusammengesetzten Topographien liegt bei etwa 20 nm [180]. Führt man Wiederholungsmessungen bei deaktiviertem Positioniertisch an derselben Position durch, kann die Messunsicherheit der Spiegelflächenmessung unter Berücksichtigung aller systematischen Messabweichungen mit weniger als 5 nm angegeben werden [315].

Zur Echtzeitkorrektur der Oberflächentopographie und der Winkelabweichungen der Spiegelplatte gibt es zwei verschiedene Ansätze. Ein Ansatz ist die Online-Korrektur mit Hilfe von Korrekturpolynomfunktionen [91]. Diese ermöglichen nur die Korrektur von langwelligen Formabweichungen. Deshalb wird für die NPMM-200 aufgrund der größeren Spiegelflächen in [92]

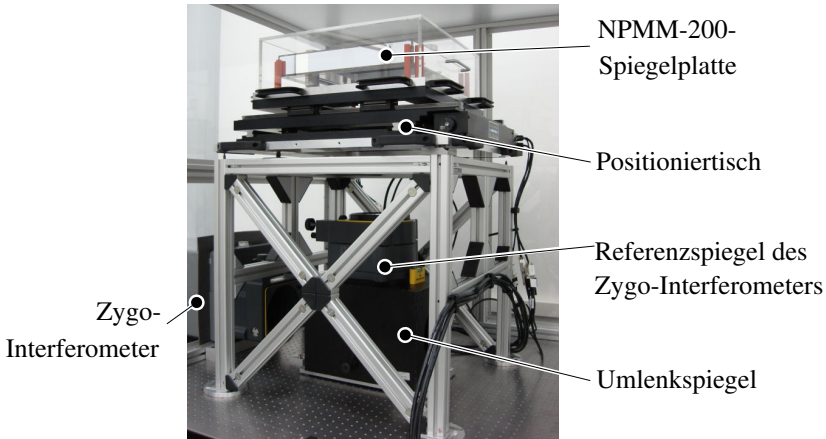


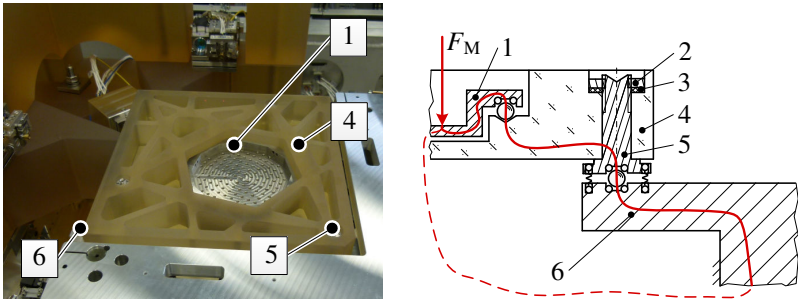
Abbildung 3.4: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Topographie der Spiegelplatte [180]

ein alternativer Algorithmus auf Basis von Korrekturmatrizen vorgeschlagen. Dieser wurde in der Firmware implementiert.

Das metrologische Konzept der NPMM-200 sieht zwei verschiedene Messmodi vor, nämlich Messungen im Abbepunkt bei eingeschränktem Messvolumen und Messungen mit vertikalem Offset zum Abbepunkt zur Nutzung des gesamten Messvolumens (vgl. Abschnitt 3.1). Die Spiegelplatte der NPMM-200 ist so konstruiert worden, dass sie für diese zwei Messmodi Befestigungsmöglichkeiten für Aufnahmeplatten von Messobjekthaltern bietet.

Für Messungen im Abbepunkt steht eine kleine Messobjektaufnahmeplatte zur Verfügung, die in der mittleren Öffnung der Spiegelplatte gelagert wird (Abbildung 3.5). Die Lagerung erfolgt mit Hilfe dreier um 120° versetzt angeordneter Koppelstellen. Als Koppelstelle wirkt eine Edelstahlkugel, die auf der Spiegelplatte in einem Kegel direkt auf dem Zerodur[®] aufliegt und auf der Gegenseite in einer von zwei Stahlstiften gebildeten Nut geführt wird. Die Nuten der einzelnen Koppelstellen sind auf das virtuelle Zentrum des Kreises ausgerichtet, auf dem die Koppelstellen angeordnet sind. Dadurch können unterschiedliche thermische Längenausdehnungskoeffizienten der einzelnen Bauteile ausgeglichen und mechanische Spannungen vermieden werden. Mit Hilfe dieser Messobjektaufnahmeplatte können Messobjekte mit einem ma-

ximalen Durchmesser von 130 mm im Abbepunkt vermessen werden. Hierzu muss das Antastsystem entsprechend tief abgesenkt werden. Aufgrund der Außenabmessungen des Antastsystems kann es zu Kollisionen mit der Spiegelplatte kommen, so dass der nutzbare Messbereich auf dem Messobjekt entsprechend den äußeren Abmessungen des Antastsystems reduziert wird.



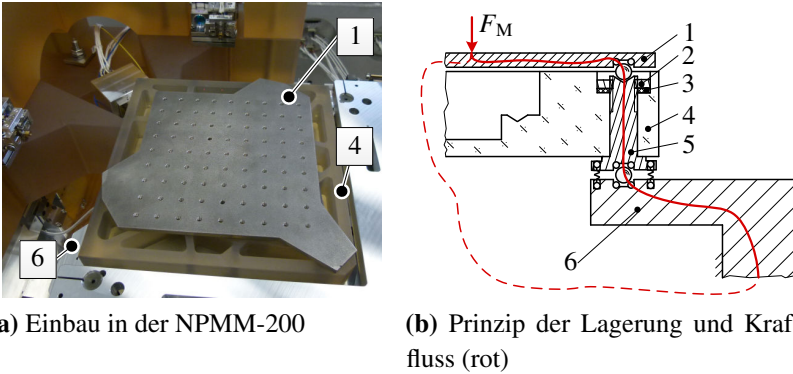
(a) Einbau in der NPMM-200

(b) Prinzip der Lagerung und Kraftfluss (rot)

Abbildung 3.5: Messobjektaufnahmeplatte für Messungen im Abbepunkt: 1 Messobjektaufnahmeplatte, 2 Befestigungsmutter, 3 Federelement, 4 Spiegelplatte, 5 Spiegelplattenhalter, 6 z-Plattform

Die große Messobjektaufnahmeplatte wird für Messungen außerhalb des Abbepunktes eingesetzt. Die Lagerung erfolgt auf den Haltern der Spiegelplatte, so dass kein direkter Kontakt zwischen dem Zerodur[®] der Spiegelplatte und der Messobjektaufnahmeplatte besteht (Abbildung 3.6). Der Vorteil ist, dass die Gewichtskraft F_M von Messobjektaufnahmeplatte und Messobjekt über die Spiegelplattenhalter direkt in die z-Stellplattform eingeleitet wird. Dadurch wird die Spiegelplatte nicht durch F_M deformiert. Somit wird das Prinzip eines möglichst kurzen und direkten Kraftflusses gut umgesetzt [296]. Im Ergebnis bewirkt diese Lagerung eine hohe Stabilität der Spiegelplatte auch bei wechselnder mechanischer Belastung, z. B. verursacht durch Messobjektwechsel.

Der konstruktiven Ausführung der Messobjektaufnahmeplatten kommt eine zentrale Bedeutung zu, da sie im metrologischen Kreis mit enthalten sind und in vertikaler Richtung bewegt werden. Derzeit sind sie aus Invar 36[®] gefertigt, um die thermische Längenausdehnung möglichst klein zu halten.



(a) Einbau in der NPMM-200

(b) Prinzip der Lagerung und Kraftfluss (rot)

Abbildung 3.6: Messobjektaufnahmeplatte für Messungen außerhalb des Abtastpunkts: 1 Messobjektaufnahmeplatte, 2 Befestigungsmutter, 3 Federelement, 4 Spiegelplatte, 5 Spiegelplattenhalter, 6 z-Plattform

Das hat jedoch den Nachteil, dass sie vergleichsweise schwer sind. Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Optimierungspotentiale (u. a. Werkstoffänderung und Topologieoptimierung) untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass bei gleicher konstruktiver Ausführung aus Siliziumcarbid SiC 30 das Eigengewicht um ca. 67 % reduziert werden kann und somit eine höhere Nutzlast, d. h. zulässige Messobjektmasse, zur Verfügung steht. Der thermische Längenausdehnungskoeffizient ist ungefähr doppelt so groß, was zur Folge hat, dass der resultierende Messunsicherheitsbeitrag aufgrund von Temperatureinflüssen um 0,2% ansteigt.

Diese universellen Messobjektaufnahmeplatten eignen sich jedoch nicht für alle Messaufgaben. Beispielsweise bei der Vermessung dünner Wafer mit Außenabmessungen von mehr als 100 mm, die wegen Schichtspannungen leichter zur Verformung neigen, muss der Messobjekthalter besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da die Durchbiegung aufgrund des Eigengewichts in der Größenordnung der geforderten Messunsicherheiten (wenige Nanometer) oder darüber liegt. In diesen Fällen muss eine an das jeweilige Messobjekt angepasste Probenhalterung verwendet werden.

3.3 Längenmesssysteme

Die Längenmesssysteme der NPMM-200 dienen zur Ermittlung der Position der Spiegelplatte respektive des mit dieser bewegten Messobjekts und stellen somit eine weitere wichtige Systemkomponente dar. Die technologische Herausforderung besteht darin, dass die Position in einem Messbereich von 200 mm mit einer Auflösung im Subnanometerbereich und einer Messunsicherheit im Bereich weniger Nanometer über einen Zeitraum von mehreren Tagen stabil gemessen werden muss – sowohl unter atmosphärischen Bedingungen als auch im Grobvakuum. Darüber hinaus soll die metrologische Rückführbarkeit gewährleistet sein.

3.3.1 Überblick zu den Längenmesssystemen

Kapazitive und induktive Messverfahren erfüllen diese Anforderungen aufgrund der unzureichenden relativen Auflösungen der Messsignale und den prinzipbedingten Nichtlinearitäten nicht [89, 92]. Inkrementale Messsysteme mit optischem Encoder können aufgrund der Modulation mit dem Maßstab und der nachfolgenden Demodulation mit der Messelektronik bessere relative Messauflösungen erreichen. In [92] ist eine Übersicht über verschiedene Prinzipien inkrementeller Längenmesssysteme mit Maßstab dargestellt. Derartige Messsysteme sind in modernen Werkzeugmaschinen mit hohen Genauigkeitsanforderungen weit verbreitet [64, 65]. Zusammenfassend lässt sich jedoch feststellen, dass für Anwendungen in der Nanopositionier- und Nanomess-technik nur das interferentielle Abtastprinzip mit Gitterperioden von weniger als $0,5 \mu\text{m}$ Auflösungen $< 0,1 \text{ nm}$ ermöglicht [120, 319].

Zweiachsige Positioniersysteme mit inkrementalen Längenmesssystemen in einem parallelen Metrologiesystem werden u. a. von der Firma Physik Instrumente GmbH kommerziell angeboten [222]. Auflösungen im Nanometerbereich sind Stand der Technik. In der Literatur sind darüber hinaus auch dreiachsige Positioniersysteme mit Parallelmetrologie vorgestellt worden [82]. In der dritten Achse sind jedoch lediglich Bewegungen im Mikrometerbereich realisierbar [82]. Für ein dreiachsiges Messsystem mit Messbereichen von mehreren Millimetern in allen drei Achsen müssen inkrementale Längenmesssysteme an den einzelnen linearen Führungsachsen sequentiell angeordnet werden, so dass kein paralleles Metrologiesystem realisiert werden kann.

Eine vollständige Umsetzung des Abbe'schen Komparatorprinzips erfordert die Ausrichtung der drei Messachsen der Maßstäbe auf einen Punkt. Dieses Konzept ist in der NPMM *TriNano* (vgl. Abschnitt 2.1.1) umgesetzt worden [195]. In [38] wird angegeben, dass bei einem Funktionsnachweis Messunsicherheiten im Nanometerbereich erzielt werden konnten.

Interferometrische Längenmesssysteme mit diskreten Wellenlängen, die sich für große Messlängen mit Nano- und Subnanometerauflösungen eignen, sind heutzutage Stand der Technik und werden von verschiedenen Herstellern kommerziell angeboten. Man unterscheidet prinzipiell zwischen Homodyn- und Heterodyninterferometer. Beim Homodyninterferometer werden Mess- und Referenzarm von Licht der gleichen Wellenlänge λ durchlaufen, wohingegen beim Heterodyninterferometer Licht unterschiedlicher Wellenlänge zum Einsatz kommt [287]. Aufgrund des metrologischen Konzepts und der Kinematik des Positioniersystems (Seriellles Kinematiksystem, vgl. Kapitel 4) kommen nur interferometrische Längenmesssysteme für die NPMM-200 in Betracht, um ein paralleles Metrologiesystem realisieren und die angestrebten messtechnischen Eigenschaften erreichen zu können.

Die meisten kommerziell verfügbaren Interferometer besitzen mehrere Messstrahlen, die parallel mit einem Abstand von mehreren Millimetern auf die Messspiegelfläche treffen [3, 231]. Die tatsächliche Messachse des Interferometers liegt dazwischen und kann nur indirekt auf den Abbepunkt ausgerichtet werden [92, 122]. Deshalb wurden am IPMS in den 1990er Jahren polarisationsoptische Homodyninterferometer mit Planspiegelreflektor und Faserkopplung entwickelt, die mit nur einem Messstrahl arbeiten und eine exakte Justierung auf den Abbepunkt ermöglichen [42, 43, 135]. Dadurch wurde die erstmalige Realisierung einer abbeoffsetfreien Messanordnung in der NMM-1 möglich. Für die NPMM-200 sind am IPMS neue vakuumtaugliche Interferometer mit mehreren Messstrahlen entwickelt und von der Firma SIOS Meßtechnik GmbH aufgebaut worden. Sie wurden darüber hinaus auf Basis der in [56] dokumentierten Untersuchungen hinsichtlich höherer thermischer Stabilität optimiert. Die Interferometer für die Achsen x und y unterscheiden sich von dem der z-Achse hauptsächlich in der Anzahl der Messstrahlen (vgl. Abbildung 3.1 zur Grundanordnung der NPMM-200). In den zwei folgenden Abschnitten werden diese nun vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Beschreibung der wesentlichen funktionalen Neuerungen.

3.3.2 x- und y-Interferometer

Die x- und y-Interferometer besitzen jeweils zwei Mess- und Referenzstrahlen. Aus Symmetrie- und Redundanzgründen sind sie nahezu baugleich (lediglich spiegelverkehrt) aufgebaut. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3.7 für einen Mess- und Referenzstrahl dargestellt ist. Der zweite Strahlengang (Position 19 in Abbildung 3.7) verläuft in einer identischen Anordnung der optischen Bauelemente mit einem Parallelversatz von nominell 30 mm und wird durch Abspaltung vom ersten Strahlengang mit einem polarisationsneutralen Strahlteiler (Position 3 in Abbildung 3.7) erzeugt.

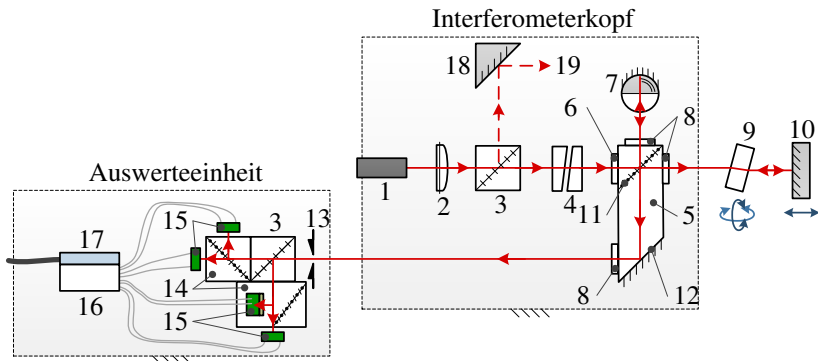


Abbildung 3.7: Funktionsprinzip der polarisationsoptischen Homodyninterferometer für die Achsen x und y: 1 LWL, 2 Kollimationslinse, 3 polarisationsneutraler Strahlteilerwürfel, 4 Drehkeilpaar, 5 Strahlteilergruppe (bestehend aus 11 polarisierende Strahlteilerschicht und 12 Umlenkspiegel), 6 Polarisationsfilter, 7 Kugelreflektor als Referenzspiegel, 8 $\lambda/4$ -Platte, 9 drehbare Planparallelplatte, 10 Spiegelfläche der Spiegelplatte, 13 Auswerteblenne, 14 polarisierender Strahlteilerwürfel, 15 Fotoempfänger, 16 Operationsverstärker (OPV)-Einheit, 17 Wasserkühlung, 18 Prisma zur 90° -Umlenkung, 19 zweiter Teilstrahl

Als Laserlichtquelle kommt ein verbesserter frequenzstabilisierter He-Ne-Laser zum Einsatz, mit dem eine relative Frequenzstabilität von $\pm 1,5 \cdot 10^{-10}$ über einen Zeitraum von 24 h nachgewiesen werden konnte [185]. Die Ausgangsleistung ist durch weitere Optimierungsmaßnahmen erhöht worden, so dass beide Interferometerachsen bei gleichbleibender Signalqualität von nur

einer Laserlichtquelle über einen polarisationserhaltenden LWL versorgt werden können. Das hat zwei bedeutende Vorteile. Zum einen werden Frequenzschwankungen vermieden, die zwischen zwei unterschiedlichen Laserlichtquellen auftreten. Zum anderen werden Phasenfehler eliminiert. Das trägt dazu bei, die Stabilität der Winkelmessung signifikant zu verbessern. Ein weiterer Vorteil hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte des Gesamtsystems ist, dass die Anzahl benötigter He-Ne-Lasereinheiten halbiert werden kann.

Durch die Verwendung von zwei Messstrahlen bei x- und y-Interferometer ist für metrologische Untersuchungen eine (redundante) Winkelmessung der Rotation um die z-Achse möglich. Diese kann auch zur Mittelwertbildung in der Messwertverarbeitung verwendet werden. Das im Strahlengang hinzugefügte Drehkeilpaar (Position 4 in Abbildung 3.7) ermöglicht die Justage der Parallelität der zwei Teilstrahlen des Interferometers. Die Einstellung des Strahlabstands sowie die Justage auf den Abbepunkt können über die drehbaren Planparallelplatten erfolgen. Der konstruktive Aufbau ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

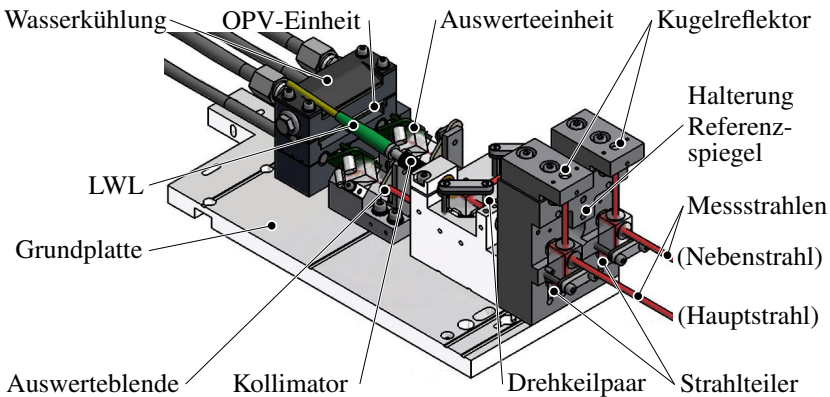


Abbildung 3.8: Aufbau des y-Interferometers der NPMM-200 (in der Darstellung sind die drehbaren Planparallelplatten ausgeblendet)

Die Anordnung der Auswerteeinheit des Interferometers erfolgt ca. 100 mm entfernt vom Interferometerkopf. Der Grund hierfür ist, dass die aktiven elektronischen Bauelemente in der Auswerteeinheit Abwärme entwickeln. Bei Betrieb der NPMM-200 im Grobvakuum kann diese nicht aus-

reichend abgeführt werden. Durch die räumlich abgesetzte Anordnung wird der Wärmeeintrag auf die interferenzoptische Auswertung möglichst gering gehalten. Zur konstruktiven Realisierung ist der kommerzielle Strahlteilerwürfel durch ein speziell angefertigtes Parallelepipid mit einem angekitteten dreiseitigen Prisma (Position 5 in Abbildung 3.7) ersetzt worden, welches die zwei Funktionen Strahlteilung und Strahlumlenkung erfüllt. Hierzu besitzt es an der oberen Seite eine polarisierende Schicht, die zur Strahlteilung von Referenz- und Messstrahl dient. An der Unterseite ist eine spiegelnde Schicht aufgebracht, die zur 90°-Umlenkung des überlagerten Referenz- und Messstrahls dient.

Die Auswerteeinheit des Interferometers wurde auch hinsichtlich thermischer Störeinflüsse optimiert. Bei den bisherigen Interferometern der NMM-1 sind die OPVs gemeinsam mit den Fotoempfängern auf einer Leiterkarte integriert, welche dann auf den Strahlteilerwürfel geklebt wird. Diese Leiterkarte wird im Folgenden als aktive Leiterkarte bezeichnet. In Summe werden drei solcher aktiven Leiterkarten in einer Auswerteeinheit eingesetzt [63]. Die Verlustwärme der insgesamt sechs OPVs kann insbesondere im Vakuumbetrieb die Signale der Fotoempfänger beeinträchtigen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass auf die OPVs aufgrund der Kabellängen jedoch nicht verzichtet werden kann [15, 279]. Aus diesem Grund wurde die Auswerteeinheit bei den Interferometern der NPMM-200 dahingehend modifiziert, dass auf die Strahlteilerwürfel eine sogenannte passive Leiterkarte geklebt wird, auf der nur die Fotoempfänger aufgelötet sind. Deren Signale werden zu einer abgesetzt angeordneten, zweiten Leiterkarte übertragen, welche die OPVs zur Verstärkung der Fotoempfängersignale trägt (sogenannte OPV-Einheit, Position 16 in Abbildung 3.7). Auf diese wird ein Aluminiumkörper mit integrierter Wasserkühlung zur gezielten Wärmeabführung montiert. Geringfügige Vibrationen, die durch das fließende Kühlmedium eingepreßt werden, können von der OPV-Einheit aufgenommen werden und beeinflussen die Signalqualität nicht.

Der einzige funktionelle Unterschied zwischen x- und y-Interferometer besteht darin, dass beim y-Interferometer der durchgehende Strahl (Hauptstrahl) als Positionsmessachse verwendet und auf den Abbepunkt ausgerichtet wird, wohingegen beim x-Interferometer der abgespaltene Strahl (Nebenstrahl) hierfür genutzt wird.

3.3.3 z-Interferometer

Das z-Interferometer unterscheidet sich in der prinzipiellen konstruktiven Ausführung vom x-Interferometer in wenigen Punkten. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass das z-Interferometer drei Messstrahlen besitzt, um die Rotationen der Spiegelplatte um die Achsen x und y der NPMM-200 zu messen (vgl. Abbildung 3.1). Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3.9 für einen Mess- und Referenzstrahl dargestellt. Der zweite und der dritte Strahlengang (Positionen 19 in Abbildung 3.9) verlaufen in identischen Anordnungen der optischen Bauelemente und werden durch Abspaltung vom ersten Teilstrahl (Position 13 in Abbildung 3.9) erzeugt.

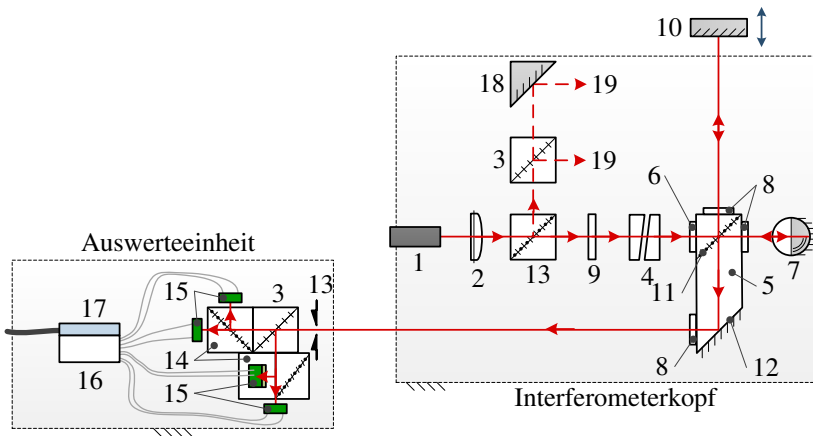


Abbildung 3.9: Funktionsprinzip des polarisationsoptischen Homodyninterferometers für die z-Achse: 1 LWL, 2 Kollimationslinse, 3 polarisationsneutraler Strahlteilerwürfel, 4 Drehkeilpaar, 5 Strahlteilergruppe (bestehend aus 11 polarisierende Strahlteilerschicht und 12 Umlenkspiegel), 6 Polarisationsfilter, 7 Kugelreflektor als Referenzspiegel, 8 $\lambda/4$ -Platte, 9 $\lambda/2$ -Platte, 10 Spiegelfläche der Spiegelplatte, 13 Auswertblende, 14 polarisierender Strahlteilerwürfel, 15 Fotoempfänger, 16 OPV-Einheit, 17 Wasserkühlung, 18 Prisma zur 90° -Umlenkung, 19 zweiter bzw. dritter Teilstrahl

Ein Unterschied zwischen x- und z-Interferometer besteht hinsichtlich der Polarisationseigenschaften des Strahlteilerwürfels zur Abspaltung der weiteren Messstrahlen. Beim x-Interferometer kommt ein polarisationsneutraler

Strahlteilerwürfel zum Einsatz, wohingegen im z-Interferometer ein Polarisierender eingesetzt wird. Dadurch lässt sich das Intensitätsverhältnis von Haupt- und Nebenstrahlen so einstellen, dass alle Teilstrahlen annähernd gleiche Intensität besitzen. Der dritte Teilstrahl wird vom Zweiten an einem polarisationsneutralen Strahlteilerwürfel abgespalten und über ein Prisma um 90° umgelenkt. Als Konsequenz aus dieser Kombination von Strahlteilerwürfeln ist zur einheitlichen Polarisationsausrichtung aller drei Strahlen in jedem der Strahlengänge vor der Aufspaltung in Referenz- und Messarm darüber hinaus eine $\lambda/2$ -Platte (Position 9 in Abbildung 3.9) erforderlich.

Im optischen System existiert ein weiterer funktioneller Unterschied. Beim x-Interferometer wird der durch das Parallelepiped durchgehende Strahl direkt als Messstrahl genutzt, wohingegen beim z-Interferometer der nach oben reflektierte Strahl genutzt wird. Außerdem entfallen die Planparallelplatten zur Justage des Strahlversatzes, da sie unterhalb der Spiegelplatte unzugänglich sind. Dieser Tatsache muss bei der Justage des Abbepunkts Rechnung getragen werden, indem das x- und das y-Interferometer auf den Strahl des z-Interferometers ausgerichtet werden. Abbildung 3.10 zeigt den konstruktiven Aufbau des z-Interferometers.

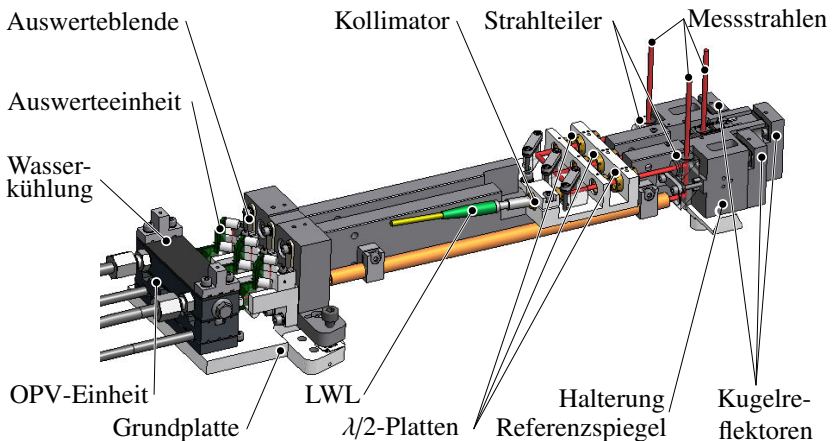


Abbildung 3.10: Aufbau des z-Interferometers der NPMM-200

Im Unterschied zum x-Interferometer ist die Auswerteeinheit des z-Interferometers etwas mehr als doppelt so weit vom Interferometerkopf ent-

fernt angeordnet (ca. 235 mm im Vergleich zu etwa 100 mm). Damit wird bezweckt, dass die trotz Wasserkühlung der OPV-Einheit verbleibende Restabwärme der Auswerteeinheit die eigentliche Messstelle möglichst wenig beeinflusst.

3.4 Winkelmesssysteme

Rotatorische Führungsabweichungen lassen sich aufgrund von Fertigungstoleranzen der Führungsschienen, der Wälzkörper und der Stellplattformen mechanisch nicht eliminieren und verursachen Verkippungen der NPMM-200-Spiegelplatte. Sie tragen somit zu den Messunsicherheiten der Längenmessungen bei. Durch entsprechende konstruktive Maßnahmen bei der Ausführung des Positioniersystems der NPMM-200 können die Verkippungen minimiert werden. Zusätzlich sollen die verbleibenden systematischen Messabweichungen durch eine Ausregelung der Winkelabweichungen oder eine numerische Korrektur der Längenmesswerte mit Winkelmesswerten reduziert werden. Hierzu ist eine Auflösung der Winkelmesssysteme $< 0,0016''$ erforderlich [92].

In der NPMM-200 sind zwei redundante Winkelmesssysteme integriert. Die x-, y- und z- Interferometer ermöglichen Winkelmessungen um alle drei Koordinatenachsen. Jedoch ist die Anfangswegdifferenz und somit auch die Winkel-Nullposition unbekannt. Eine Untersuchung in [92] hat ergeben, dass dies für die NPMM-200 nicht zwingend erforderlich ist und das Nullen der Interferometer zur Winkelmessung in beliebiger Winkellage möglich ist. Trotzdem sind in unmittelbarer Nähe der x- und y-Interferometer zusätzlich zwei optoelektronische Winkelsensoren angeordnet, die auf dem AKF-Prinzip basieren und sich als Referenzsensoren für die Winkellage beim Initialisieren der interferometrischen Winkelmessung eignen. Hierdurch lassen sich systematische Messabweichungen bei der interferometrischen Winkelmessung verringern.

3.4.1 Autokollimatoren

In der NPMM-200 werden zwei am IPMS weiterentwickelte und für beide Achsen baugleiche Autokollimatoren eingesetzt. Ausgangspunkt der Entwicklung waren die Autokollimatoren, die derzeit in der NMM-1 eingesetzt

werden. Aufgrund von Bauraumeinschränkungen können diese nicht unverändert genutzt werden. Außerdem wurde in [246] festgestellt, dass der Umlenkspiegel zur Strahljustage hinsichtlich Befestigung und thermischer Drift überarbeitet werden sollte. Für die NPMM-200 wurde deshalb das optische System der Autokollimatoren angepasst. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

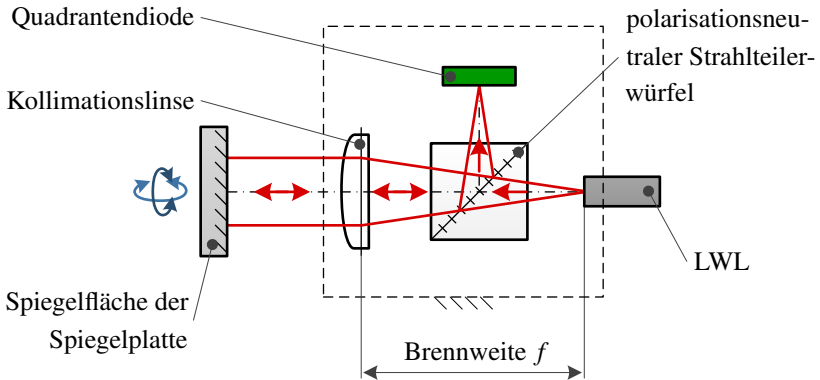


Abbildung 3.11: Funktionsprinzip der NPMM-200-Autokollimatoren

Die Beleuchtung erfolgt mit einer breitbandigen LED mit einer mittleren Wellenlänge von 840 nm, deren Licht über einen Multimode-Lichtwellenleiter zum Sensorkopf in der Vakuumkammer übertragen wird [92]. Der Kerndurchmesser des LWL beträgt $62,5 \mu\text{m}$. Als Kollimationslinse wird eine für den Nahinfrarotbereich hinsichtlich geringer sphärischer Aberrationen optimierte Linse mit einer Brennweite von $f = 35 \text{ mm}$ eingesetzt. Der Divergenzwinkel β_{div} , der nach [246] von der Brennweite der Kollimationslinse und dem Kerndurchmesser des LWL abhängt, ist mit $184,2''$ ausreichend klein, um die Entfernungsunabhängigkeit der Winkelmessung zu gewährleisten. Der kollimierte Messstrahl weist einen Durchmesser von ca. 19 mm auf. Der Strahlteilerwürfel lenkt den vom Messspiegel reflektierten Lichtstrahl auf die Quadrantendiode um. Es wird eine Quadrantendiode mit Metallgehäuse und Glasfenster verwendet. In Voruntersuchungen, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt wurden, kam auch eine Quadrantendiode ohne Glasfenster zum Einsatz. Es wurde erwartet, dass dadurch ungleichmäßige Brechungen an der Eintrittsfläche eliminiert werden können.

Es konnten jedoch keine nennenswerten Verbesserungen hinsichtlich der Signalqualität erzielt werden. Große Nachteile dieser Quadrantendiode ohne Glasfenster sind die hohe Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen und die Gefahr, dass die Bonddrähte während der Justage des Autokollimators abreißen. Aus diesen Gründen werden in den Autokollimatoren der NPMM-200 nun Quadrantendioden mit Glasfenster verwendet.

Der Messbereich auf der Quadrantendiode beträgt $\pm 24,75 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 72,93''$. Er wird jedoch durch die elektronische Auswertung auf ca. $\pm 35''$ beschränkt [246]. Die Winkelauflösung lässt sich dann mit Hilfe der A/D-Umsetzerauflösung (16-bit), dem Ausgangsspannungsbereich ($U_A = \pm 1,5 \text{ V}$), der Verstärkung in der Elektroneinheit (Faktor 6) und der Brennweite f berechnen. Sie beträgt dementsprechend $0,00237''$.

Die elektrische Signalverarbeitung ist in [92] detailliert beschrieben. Deshalb werden an dieser Stelle nur die wichtigsten Aspekte genannt. Die einzelnen Stromsignale $I_A \dots I_D$ der Quadrantendiode werden mit OPV-Schaltungen in die zwei Differenzsignale und das Summensignal gewandelt. Die beiden Differenzsignale werden mit dem Summensignal normiert, um die lateralen Positionen s_x und s_y zu ermitteln [92]:

$$s_x = k_x \left(\frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \right) \quad \text{und} \quad s_y = k_y \left(\frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \right) \quad (3.1)$$

Mit Hilfe der Brennweite f der Kollimationslinse können die Winkelwerte α_x und α_y berechnet werden:

$$\alpha_x = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{s_x}{f} \right) \quad \text{und} \quad \alpha_y = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{s_y}{f} \right) \quad (3.2)$$

Die Koeffizienten k_x und k_y müssen mit einer Kalibrierung bestimmt werden. Zur Kalibrierung wird die in [92] vorgeschlagene Anordnung verwendet (Abbildung 3.12). Das Funktionsprinzip der Kalibrieranordnung basiert darauf, dass die Winkellage einer einseitig verspiegelten Planparallelplatte gleichzeitig von einer Seite durch die Glasplatte hindurch an der inneren Seite der Verspiegelungsschicht mit einem Referenzautokollimator und von der anderen Seite mit dem NPMM-200-Winkelsensor gemessen wird. Die Winkellage der Planparallelplatte kann mit zwei Piezoaktoren um eine Kugel als Drehpunkt

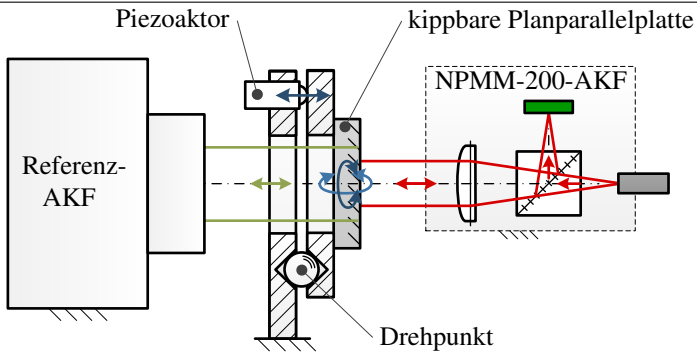


Abbildung 3.12: Kalibrieranordnung für die Autokollimatoren (in Anlehnung an [92])

in zwei Richtungen gekippt werden. Als Referenzautokollimator wird der Elcomat HR von der Firma Möller Wedel mit einer Messauflösung von $0,005''$ eingesetzt [199].

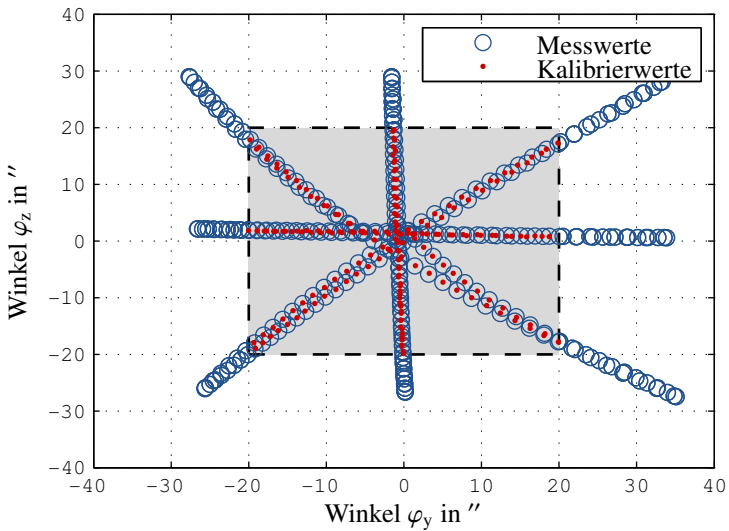


Abbildung 3.13: Messwerte bei der Kalibrierung am Beispiel des Sensors der x-Achse

Die Messwerte eines Kalibriervorgangs sind in Abbildung 3.13 dargestellt. Der Kalibrierbereich beträgt $\pm 20''$. Für beide Messrichtungen ist die Empfindlichkeit nahezu gleich. Am Verlauf der Messwerte ist zu erkennen, dass auf der Quadrantendiode geringe Nichtlinearitäten auftreten. Diese werden hauptsächlich durch die Trennstege zwischen den einzelnen Quadranten verursacht. Deshalb wird eine kubische Approximation der Messwerte für die Bestimmung der Kalibrierkoeffizienten gewählt.

Am Beispiel des Autokollimators, der in Richtung der x-Achse der NPMM-200 montiert wird, sind in Abbildung 3.14 die Winkelabweichungen zwischen den Messdaten und der kubischen Approximation dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Winkelabweichungen um die y-Achse kleiner sind und eine Standardabweichung von nur $0,047''$ aufweisen. Die maximalen Abweichungen über den gesamten Kalibrierbereich streuen zwischen $\pm 0,1''$.

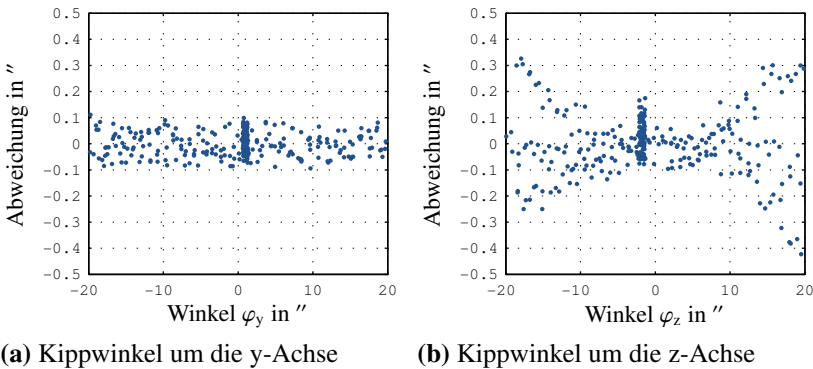


Abbildung 3.14: Kalibrierergebnisse am Beispiel des Autokollimators der x-Achse

Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Dissertation Untersuchungen zur Stabilität der Kalibrierkoeffizienten gemacht mit dem Ziel, die Langzeitstabilität der Kalibrierkoeffizienten nach dem Einbau der Autokollimatoren in die NPMM-200 abzuschätzen. Hierzu wurde die Kalibrierprozedur an mehreren Wochentagen jeweils mehrfach hintereinander ausgeführt. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die Kalibrierkoeffizienten sehr geringe Standardabweichungen zeigen, sodass die Autokollimatoren eine hohe mechanische und thermische Stabilität aufweisen.

3.4.2 Interferometrische Winkelmessung

Die interferometrische Winkelmessung in der NPMM-200 basiert auf der rechtechnischen Ermittlung der Wegdifferenz h aus zwei interferometrischen Längenmessungen. Das Messprinzip für eine Interferometeranordnung mit zwei Messstrahlen und einer Spiegelfläche der NPMM-200-Spiegelplatte ist in Abbildung 3.15 für den unverkippten Ausgangszustand und einen verkipp-ten Zustand dargestellt [92]. Die maximal zulässige Verkippung α_{\max} der Spiegelfläche lässt sich mit Hilfe des Blendendurchmessers d und der Wellenlänge λ der eingesetzten He-Ne-Laser berechnen [43]:

$$\alpha_{\max} = \frac{1}{2} \arcsin \left(0,9 \cdot \frac{\lambda}{d} \right) \quad (3.3)$$

In den Interferometern werden Blenden mit einem Durchmesser von 0,8 mm eingesetzt, woraus ein zulässiger Kippwinkel $\alpha_{\max} \leq 1'13''$ resultiert. Dieser zulässige Winkel darf im Betrieb des Messgeräts nicht überschritten werden.

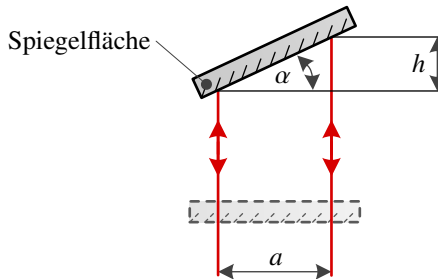


Abbildung 3.15: Grundprinzip der interferometrischen Winkelmessung

Der Kippwinkel α der Spiegelplatte kann bei bekanntem Abstand a zwischen den beiden parallelen Messachsen berechnet werden:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{h}{a} \right) \quad (3.4)$$

Bei den Interferometern beträgt der nominelle Strahlabstand $a = 30$ mm und die Wegmessauflösung 5 pm (siehe Abschnitt 3.5, Gleichung 3.5). Daraus ergibt sich eine rechnerische Winkelmessauflösung von etwa $0,00003''$. Das ist zwei Größenordnungen besser als die Winkelmessauflösung der Autokollimatoren. Deswegen erfolgt die Winkelregelung der NPMM-200 auf Basis der interferometrischen Winkelmesswerte.

3.5 Informations- und Signalverarbeitung

Der mechanische und optische Grundaufbau der NPMM-200 wird durch eine umfangreiche Elektronikeinheit zur elektrischen Versorgung, Laserlichterzeugung, Messwerterfassung und Messwertverarbeitung ergänzt (Abbildung 3.16). Für die NPMM-200 wurde ein neuartiges Gesamtkonzept für die

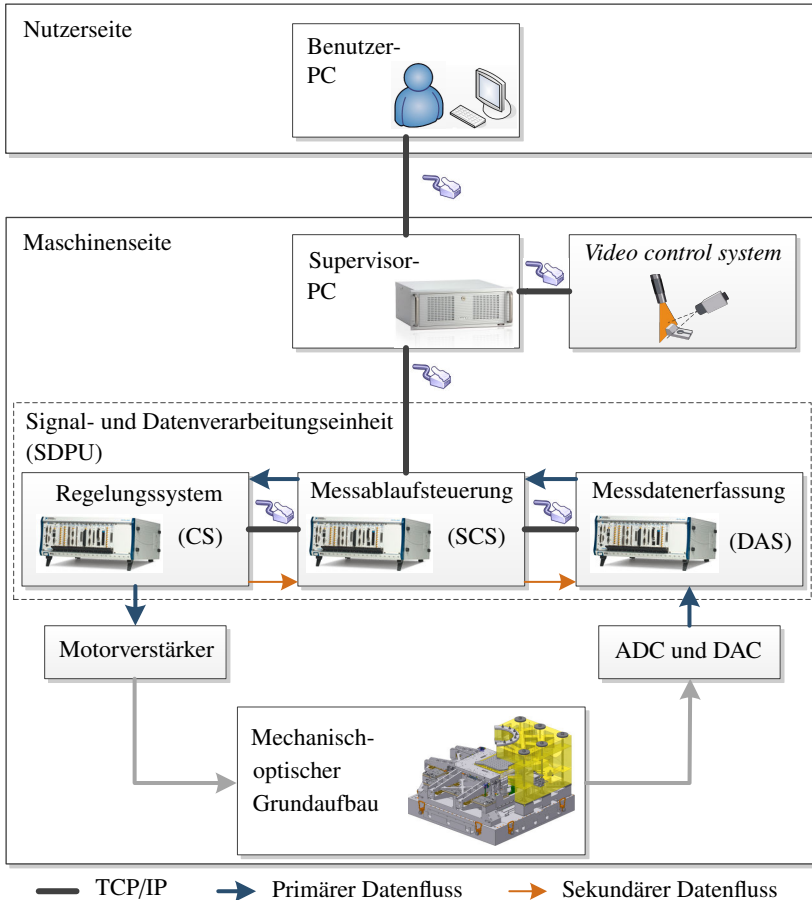


Abbildung 3.16: Vereinfachte Struktur der NPMM-200-Informations- und Signalverarbeitung

Informations- und Signalverarbeitung entwickelt und umgesetzt, das auf einem modularen Mehrrechnersystem basiert. In diesem Konzept wird grundlegend zwischen Nutzerseite und Maschinenseite unterschieden. Auf der Nutzerseite befindet sich der Benutzerrechner (PC), der über ein lokales Netzwerk (Ethernet) mit dem sogenannten Supervisor-Computer verbunden ist. Letzterer befindet sich auf der Maschinenseite in einem separaten lokalen Maschinennetzwerk und bildet die Schnittstelle zur Bedienung der NPMM-200. Außerdem ist er für die übergeordnete Verwaltung verantwortlich, wie zum Beispiel den Befehls- und Datenaustausch zwischen Benutzer und NPMM-200 (siehe Abschnitt 3.7). Im Maschinennetzwerk sind darüber hinaus die Signal- und Datenverarbeitungseinheit (*Signal and Data Processing Unit*, abgekürzt mit SDPU) und das *Video Control System* (VCS) beherbergt. Die Kommunikation dieser Teilsysteme im lokalen Netzwerk erfolgt über das *Transmission Control Protocol / Internet Protocol* (TCP/IP). Das VCS ist nur als ein Beispiel für die Datenverarbeitung bei Nutzung optischer Antastsysteme (bspw. Weißlichtinterferometer, Fokussensor nach dem *depth from focus* (DFF)-Verfahren [178] oder Laser-Linienscanner) dargestellt. Es steht stellvertretend für alle Antastsysteme, bei denen eine rechenintensive Nachverarbeitung der Messdaten erforderlich ist. Auf diese Weise unterstützt das Konzept zur Informations- und Signalverarbeitung die Anwendung der NPMM-200 als Multisensorik-NPMM.

Die Kernkomponente der Informations- und Signalverarbeitung ist die SDPU, die in Zusammenarbeit des IPMS mit dem Teilprojekt „Signalverarbeitung und Systemsteuerung“ des Transferprojekts entwickelt wurde [150]. Die SDPU basiert auf kommerziell verfügbaren und echtzeitfähigen Komponenten der Hardware-Plattform PXI von National Instruments. Sie besteht aus insgesamt drei PXI-Systemen, von denen jedes einen Echtzeit-Controller und mehrere Module mit *field programmable gate arrays* (FPGAs) besitzt. Die Bezeichnung der Systeme orientiert sich an den zu erfüllenden Funktionen. Es wird zwischen dem Messdatenerfassungssystem (*Data Acquisition System*, abgekürzt mit DAS), der Messablaufsteuerung (*Sequence Control System*, abgekürzt mit SCS) und dem Regelungssystem (*Control System*, abgekürzt mit CS) unterschieden. Die drei PXI-Systeme bilden eine in sich heterogene, modulare Struktur. Als Entwicklungsumgebung wird das grafische, datenflussorientierte und hardwareunabhängige Programmiersystem LabVIEW von National Instruments verwendet. Das hat den Vorteil, dass alle PXI-Komponenten

mittels LabVIEW einheitlich und als gesamtes System verwaltet, angesprochen und programmiert werden können. Nachfolgend werden nun die interne Struktur der SDPU und die wesentlichen Systemeigenschaften beschrieben.

Die Schnittstelle der SDPU zum mechanisch-optischen Grundaufbau stellt das DAS dar. Es besitzt zahlreiche Analog-Digital-Umsetzer (ADC) und Digital-Analog-Umsetzer (DAC) zur Erfassung der Rohmessdaten. Durch die Verwendung von FPGAs ist eine Skalierung leicht möglich. In der derzeitigen Systemkonfiguration werden insgesamt acht FPGA-Module eingesetzt, wobei jedes Modul acht Analog-Digital-Umsetzer (ADC) und DAC mit einer Auflösung von 16 Bit besitzt. Zwei der FPGA-Module werden für die sieben Interferometerachsen zur Längen- und Winkelmessung genutzt, wobei jede Interferometerachse zwei ADC-Eingänge erfordert. Ein weiteres FPGA-Modul dient zur Signalerfassung der drei konfokalen Nullpunktsensoren und der zwei optoelektronischen Winkelsensoren. Außerdem werden noch zwei FPGA-Module für die Auswertung der Antastsystemsignale angewandt: eins erfasst die Daten von acht analogen Eingängen und eins ist für bis zu vier Interferometerachsen von Antastsystemen konfiguriert. Eine detaillierte Übersicht enthält Tabelle B.1 im Anhang.

Die Auflösung der interferometrischen Längenmesssysteme s_q ist unter anderem von den eingesetzten ADC, der Vakuumwellenlänge λ_{vac} und der Luftbrechzahl n abhängig. Nach [133] gilt näherungsweise:

$$s_q = \frac{\Delta k \cdot \lambda_{vac}}{i \cdot n} = \frac{\lambda_{vac}}{e \cdot i \cdot n} \quad (3.5)$$

Hierin ist i der Interferometerfaktor, Δk die kleinste auflösbare Interferenzordnung und e die Anzahl Inkremente, mit der eine Interferenzordnung erfasst wird. Durch die Verwendung von ADC mit 16 Bit-Auflösung (d. h.: $e = 65536$) kann für $\lambda_{vac}/n = 632,8 \text{ nm}$ [133] eine Messwertquantisierung von 5 pm erreicht werden. Dies wurde in einem Testaufbau nachgewiesen (Abbildung 3.17).

Die vom DAS erfassten und vorverarbeiteten Rohmessdaten werden zum SCS bzw. CS weitergeleitet. Das SCS dient zur Steuerung des Messablaufs der NPMM-200 und es übernimmt den Befehlsaustausch zwischen den Teilsystemen. Das CS erhält vom SCS Sollwerte für die Zielpositionen und weitere Steuerungsgrößen wie z. B. die Form der Trajektorie. Innerhalb des CS erfolgt dann die Berechnung der komplexen Regelungsalgorithmen, die im

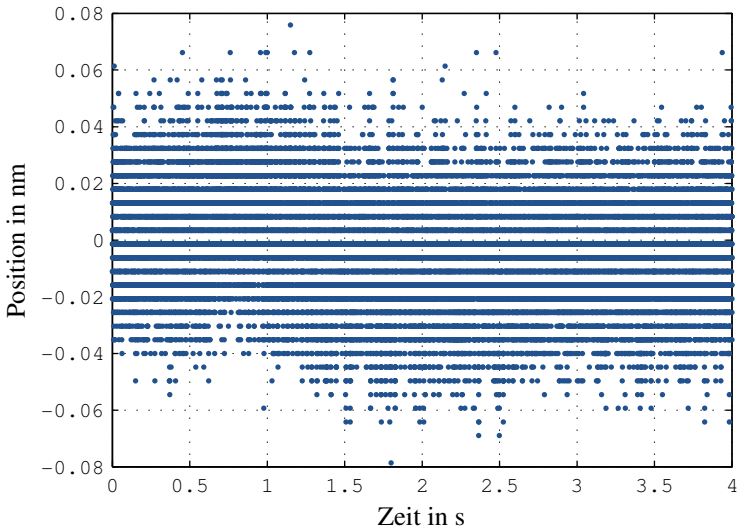


Abbildung 3.17: Rauschen des Interferometersignals (Punktdarstellung der Einzelmesswerte)

folgenden Abschnitt 3.6 vorgestellt werden. Die Stellsignale der Regler werden vom CS an die Antriebsverstärker (PAUs) ausgegeben, dort verstärkt und dann an die Antriebe der NPMM-200 ausgegeben. Die Messdaten werden dem Benutzer vom SCS bereit gestellt.

Die großen Herausforderungen bei der Umsetzung der Rechnerarchitektur dieser drei PXI-Systeme sind die Bewältigung des hohen Datenaufkommens und die Realisierung eines möglichst latenzarmen Datentransfers. Letzteres ist besonders wichtig, um eine hohe Synchronität der Rohmessdaten – insbesondere der Längenmesswerte – zu erreichen. Deshalb ist die Architektur so gestaltet, dass die Daten möglichst an der Stelle verarbeitet werden, an der sie entstehen. Dadurch lässt sich bei der Messdatenvorverarbeitung eine Parallelisierung der analogen Eingangskanäle und der zugehörigen Berechnungen realisieren, wobei die Leistung des Gesamtsystems in gewissem Maße unabhängig von der Anzahl analoger Eingangskanäle ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Komplexität der Kommunikation verringert wird. Als Konsequenz wurden zur optimalen Gestaltung dieses Mehrrechnersystems unterschiedliche Zeitebenen, d. h. Taktraten, für die Teilsysteme festgelegt (Abbildung 3.18).

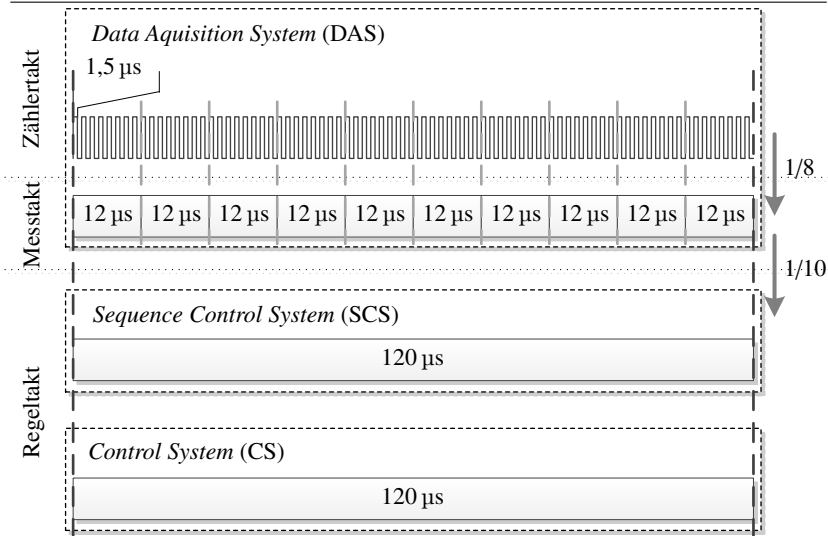


Abbildung 3.18: Übersicht zu Zeitebenen innerhalb der SDPU

Die Erfassung und Vorverarbeitung der Rohmessdaten erfolgt innerhalb des DAS unter Nutzung der FPGA-Module. Die acht ADC und DAC eines FPGA-Moduls können eine maximale Abtastfrequenz von 750 kHz pro Kanal realisieren. Die Leistungsfähigkeit dieser ADC gibt den sogenannten Zählertakt vor. Es wurde eine Frequenz von $666\frac{2}{3}$ kHz (entspricht einer Taktperiode von $1,5 \mu\text{s}$) als Zählertakt festgelegt, d. h. mit dieser Frequenz werden die Eingangskanäle abgetastet und die Periodenzählung der Interferometer vorgenommen [217]. Jeder achte Wert wird für die Nachverarbeitung der Rohmessdaten und für die Demodulation (siehe [92]) genutzt. Zu dieser Nachverarbeitung gehören komplexe Berechnungen mit Fließkomma-Arithmetik einfacher und doppelter Genauigkeit sowie Online-Messwertkorrekturen (z. B. Ellipsenregression, Umweltkorrekturen). Die Nachverarbeitung erfolgt innerhalb des DAS im sogenannten Messtakt mit einer dementsprechend reduzierten Frequenz von $83\frac{1}{3}$ kHz bzw. $12 \mu\text{s}$ Taktperiode (d. h. $1/8$ des Zählertaktes) [216]. Zur Ausführung der komplexen Berechnungen in den FPGA-Modulen im Zuge der Nachverarbeitung wurde ein in LabVIEW integrierter konfigurierbarer Floating-Point Prozessor (*LiSARD*) entwickelt [212].

Jeder zehnte dieser vorverarbeiteten und teilweise korrigierten Messwerte wird dann an das SCS übertragen, d. h. es erfolgt der Transfer vom Messtakt zum Regeltakt. Der Regeltakt ist somit als 1/10 des Messtakts festgelegt, d. h. 8,3 kHz (bzw. 120 μ s). Das SCS kommuniziert mit der Frequenz des Regeltakts mit dem CS. Die Messdaten werden vom SCS zum Supervisor-PC übertragen und somit maximal mit 8,3 kHz bereit gestellt.

3.6 Regelungssystem

Das Regelungskonzept der NPMM-200 wurde im Teilprojekt „Signalverarbeitung und Systemsteuerung“ des Transferprojekts entwickelt. Es baut auf den im SFB 622 entwickelten neuartigen, modellbasierten Regelungsalgorithmen mit integrierten Methoden zur Reibkraftkompensation auf [8, 12].

Im Betrieb der NPMM-200 müssen die Position und die Winkellage der in allen drei Achsen bewegten Spiegelplatte (Freiheitsgrade (DOF) = 6) geregelt werden. Die Anforderungen an die Positions- und Winkelregelung unterscheiden sich jedoch grundlegend. Die Positionsregelung erfordert die Regelung auf einen vorgegebenen Sollwert entlang einer definierten Trajektorie. Zur Steigerung der Messdynamik werden möglichst schnelle Verfahrensgeschwindigkeiten während aller Phasen des Messvorgangs angestrebt. Hierzu muss die Positionsregelung eine hohe Bahntreue nicht nur stationär, sondern auch während der Fahrt entlang einer vorgegebenen Trajektorie einhalten. Die Winkellage soll entsprechend der Funktionsweise hingegen stets auf einen konstanten Sollwert – in dem Fall 0° – ausgegelt werden [91]. Deshalb muss die Winkelregelung auf Störgrößenkompensation ausgelegt sein. Bei der gleichzeitigen Positions- und Winkelregelung können Wechselwirkungen (Übersprechen etc.) entstehen, die im Regelungskonzept zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus muss das Regelungssystem robust gegenüber äußeren Störungen sein. Insgesamt stehen dem Regelungssystem 7 Stellgrößen zur Verfügung: 4 Kräfte erzeugt von den x- und y-Aktoren (F_{x0} , F_{x1} , F_{y0} , F_{y1}) und 3 Kräfte von den z-Aktoren (F_{z0} , F_{z1} , F_{z2}).

Aufgrund der genannten Anforderungen reicht kein einfacher Regler für eine Bewegungsachse aus, sondern es ist ein Mehrgrößenregler umgesetzt worden, welcher die Wechselwirkungen aktiv kompensieren kann. Voruntersuchungen an einem zweiachsigen Positioniersystem als Demonstrator für die

NPMM-200 [146] haben gezeigt, dass bei Linearführungen mit Wälzkörpern die Reibung die maximal mögliche Bahngeschwindigkeit bei zulässigen Positionierabweichungen im Submikrometerbereich begrenzt [10]. Daher ist die Reibung als nicht direkt messbare, stochastische und nichtlineare Störgröße in das Regelungskonzept integriert worden. Es wird ein erweitertes Reibmodell auf Basis des *Dynamic NonLinear Regression with direct application of eXcitation*-Reibmodell (DNLRX-Reibmodell) eingesetzt, das alle signifikanten Reibphänomene hinreichend präzise nachbildet sowie Methoden zur Reibkraftschätzung und Kompensation beinhaltet [11]. Das ist insbesondere im Hinblick auf physikalisch bedingte Beschränkungen durch hohe bewegte Massen vorteilhaft, da diese bei der Bahnplanung durch Begrenzung der maximal möglichen Geschwindigkeit, der Beschleunigung und des Rucks berücksichtigt werden können.

Zwischen den in x - und y -Richtung bewegten Stellplattformen sowie der in z -Richtung Bewegten bestehen aus regelungstechnischer Sicht prinzipiell keine Verkopplungen. Dies haben theoretische Voruntersuchungen an einem dynamischen Systemmodell der NPMM-200 in Matlab-Simulink gezeigt, die im Teilprojekt „Signalverarbeitung und Systemsteuerung“ durchgeführt wurden. Aus diesem Grund lassen sich die Regelungssysteme funktional trennen. Ein Regelungssystem regelt die x - und y -Position sowie die Rotation um die z -Achse (Gieren) mit Hilfe der x - und y -Aktoren (vgl. Abbildung 3.19).

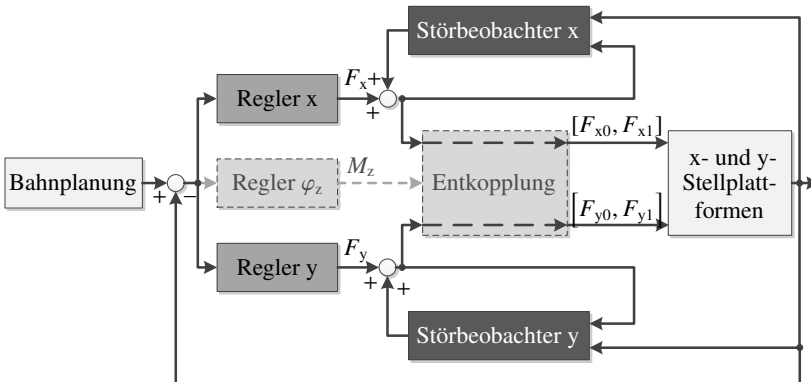


Abbildung 3.19: Regelungssystem für die Achsen x und y der NPMM-200 [322]

Das zweite Regelungssystem ist für die Positionsregelung der z-Plattform in z-Richtung und für die Winkelregelung der Rotationen um die x-Achse (Rollen) und die y-Achse (Nicken) zuständig (vgl. Abbildung 3.20).

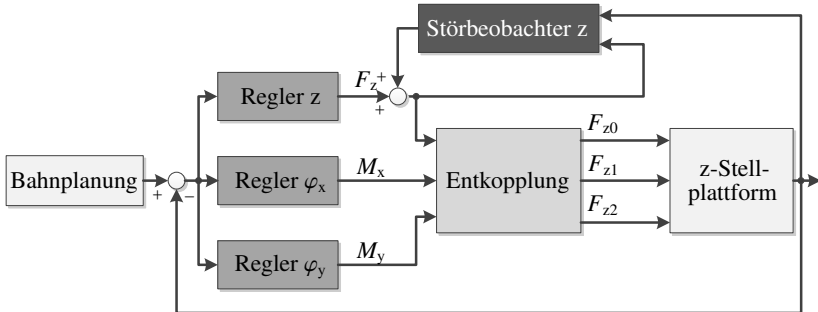


Abbildung 3.20: Regelungssystem für die z-Achse der NPM-200 [322]

Beiden Regelungssystemen ist gemeinsam, dass ein Mehrgrößenzustandsregler und ein erweiterter Störgrößenbeobachter auf Kalman-Filter-Basis zur Trajektorienfolgeregelung verwendet werden. Zur Positions- und Winkelregelung auf die vorgegebenen Sollwerte werden modifizierte PID-Regler eingesetzt. Um das Positionierverhalten vor allem bei kleinen Stellwegen und -winkeln zu verbessern, wurde eine nichtlineare Modifikation der Regler-Integrator-Verstärkung mit Hilfe einer look-up Table (LUT) integriert, wie sie bereits in der NMM-1 verwendet wird [93]. Eine Erweiterung dieser LUT um eine nichtlineare Modifikation der Regler-Proportional-Verstärkung (P-Anteil), wie sie in [314] vorgeschlagen wird, hat aufgrund des erweiterten Störgrößenbeobachters keine Verbesserung gezeigt und ist deshalb nicht erforderlich.

Das Bahnplanungsmodul, das in beiden Regelungssystemen integriert ist, realisiert die Erzeugung von Referenztrajektorien für die Bewegung. Der Bahnplaner der NPM-200 zeichnet sich dadurch aus, dass er Bewegungen generiert, die aus beliebig vielen Linien-, Kreis- und Helixsegmenten bestehen. Darüber hinaus ist es möglich, kinematische Beschränkungen bis zur vierten Ableitung der Position zu berücksichtigen, wodurch insbesondere Anregungen des Systems durch sprungartige Sollgrößenwechsel minimiert werden [9]. Zwei benachbarte Bahnsegmente können mit Hilfe von Blosskurven

verschliffen werden, so dass es möglich ist, beliebige kontinuierliche Bewegungsprofile zu generieren [255].

Beim Regelungssystem der Achsen x und y besteht die Besonderheit darin, dass die konzeptionell vorgesehene Winkelregelung um die z -Achse derzeit nicht verwendet werden muss. Die Ursache dafür ist der konstruktive Aufbau des Positioniersystems der NPMM-200. Durch die Orthogonalität der Bewegungsachsen und die Anordnung der Aktoren in den Bewegungsrichtungen können zumindest bei den Positionsstellgrößen die Bewegungsrichtungen in der theoretischen Betrachtung exakt den entsprechenden Aktoren zugeordnet werden. In der praktischen Umsetzung wird das dadurch gewährleistet, dass die Führungssysteme für die x - und y -Bewegung so justiert werden, dass sie möglichst wenig Führungsspiel besitzen. Winkelabweichungen um die z -Achse können also nur im Rahmen der mechanischen Elastizitäten der Führungen bzw. der Wälzkörper auftreten. Zur Regelung des Winkels wären somit deutlich höhere Kräfte als für die translatorische Bewegung notwendig. Infolge dessen können die überlagerten Bewegungen beider Achsen getrennt betrachtet werden. Die Entkopplung kann deshalb entfallen und eine Trennung zwischen zwei Positions- und einem Winkelregler beim Regelungssystem für die xy -Stellplattform erfolgen.

Im Unterschied dazu sind die drei Aktoren der z -Plattform jeweils gemeinsam für die translatorische Bewegung in z -Richtung sowie für die beiden Rotationen (Nicken und Rollen) verantwortlich. Somit handelt es sich bei der z -Plattform um ein verkoppeltes System, so dass in diesem Regelungssystem eine Entkopplung der Eingangs- und Ausgangsgrößen vorgesehen ist (vgl. Abbildung 3.20). Diese bewirkt, dass sich die Änderung eines Systemeingangs auch nur auf einen Systemausgang auswirkt. Im konkreten Anwendungsfall ist diese Entkopplung mit Hilfe einer Entkopplungsmatrix realisiert, die auf Basis der Geometrie der z -Plattform bestimmt wurde. Auf diese Weise ist es möglich, die Position der z -Plattform getrennt von den beiden Winkeln zu regeln.

Die schrittweise Inbetriebnahme der einzelnen Regelungssysteme erfolgte in Kooperation mit dem Teilprojekt „Signalverarbeitung und Systemsteuerung“ des Transferprojekts. Für die Analyse der in Abschnitt 6.4 dargestellten, erzielbaren Positioniereigenschaften der NPMM-200 wurden im Rahmen dieser Dissertation Parameteroptimierungen vorgenommen.

3.7 Steuerungs- und Bedienerkonzept

Die NPMM-200 unterscheidet sich deutlich von anderen NPMMs, da sie als universale Multisensorik-NPMM für verschiedene Betriebsarten (z. B. 3-D-Nanokoordinatenmessmaschine, Hochgeschwindigkeits-Scanning-Messgerät, ...) konzipiert ist. Diese unterschiedlichen Betriebsarten erfordern ein angepasstes Steuerungs- und Bedienerkonzept. Eine Übersicht zeigt die folgende Abbildung 3.21.

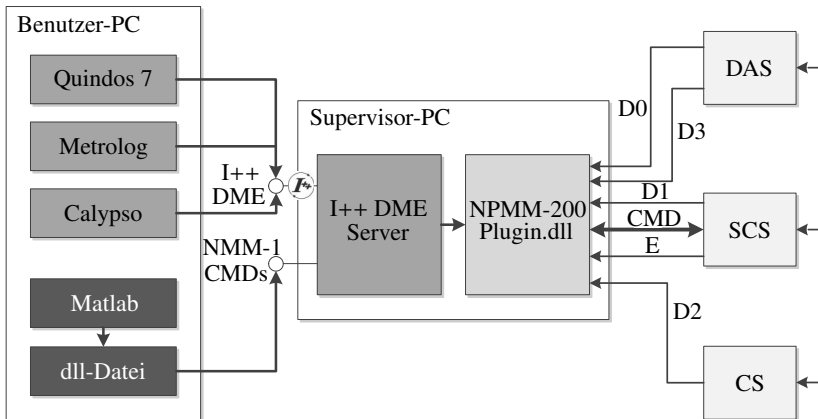


Abbildung 3.21: Steuerungs- und Bedienerkonzept der NPMM-200

Das Bindeglied zwischen dem Benutzer-PC und der Maschinenseite der NPMM-200 stellt der Supervisor-PC dar (vgl. Abbildung 3.16). Die Kommunikation zwischen diesen beiden Systemen erfolgt nach dem *Inspection plus-plus Dimensional Measurement Equipment* (I++ DME) Modell, d. h. einem Client-Server-Modell, welches das komplette Messsystem in zwei Teile untergliedert: das Messgerät als Server und die Messsoftware als Clients. Der Befehlssatz ist im herstellerneutralen I++ DME Standard spezifiziert, der von den größten deutschen Automobilherstellern gefördert und von vielen Herstellern für Messsoftware unterstützt wird [29]. Zur Umsetzung dieses I++ DME Modells wurde ein universeller I++ DME Server entwickelt [276]. Dieser stellt die Verbindung zum Messgerät mittels Erweiterungen (Plug-Ins) her. Zur Kommunikation mit dem Benutzer-PC werden zwei Schnittstellen bereit gestellt: eine standardisierte I++ DME Schnittstelle und eine proprie-

täre Schnittstelle zur Unterstützung des erweiterten Matlab-Befehlssatzes der NMM-1 inklusive aller Administratorfunktionen (Abbildung 3.21).

Die standardisierte I++ DME Schnittstelle ermöglicht es, die NPMM-200 als 3-D-Nanokoordinatenmessgerät mit Messsoftware verschiedener Hersteller (z. B. Quindos von Hexagon Metrology PTS GmbH, Calypso von Carl Zeiss IMT GmbH oder Metrolog von Metrologic Group) zu betreiben. Einzige Voraussetzung ist, dass die Messsoftware den I++ DME Standard unterstützt. Da auch in Amerika Untersuchungen zur Umsetzung dieses Standards laufen, ergibt sich hieraus ein enormes Anwendungspotential für die NPMM-200 [226]. Momentan stehen dem IPMS die Softwarepakete Quindos und Calypso zur Verfügung [275, 276].

Die zweite Schnittstelle ist proprietär und wurde zusätzlich in den I++ DME Server integriert, um den kompletten erweiterten Matlab-Befehlssatz der NMM-1 zu unterstützen. Damit ist die NPMM-200 auch als Hochgeschwindigkeits-Scanning-Messgerät nutzbar und es können alle Matlab-Messskripte der NMM-1 auch für die NPMM-200 genutzt werden. Der große Vorteil dieser skriptorientierten Gerätebedienung, wie sie derzeit bei der NMM-1 Stand der Technik ist, besteht darin, dass eine flexible Anpassung an die jeweiligen Messaufgaben möglich ist, da über eine Vielzahl von Parametern und Konfigurationsvariablen verfügt werden kann. Der Nachteil ist, dass nur erfahrene Anwender die volle Funktionalität der NPMM nutzen können. Diese Schnittstelle erfordert eine zusätzliche dynamische Bibliothek (DLL) auf dem Benutzer-PC, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation umgesetzt und getestet wurde. Die DLL kommuniziert dann über TCP/IP mit dem I++ DME Server.

Der Plugin eines Messgeräts dient dazu, die I++ DME konformen Befehle für die individuelle Ablaufsteuerung des Messgeräts umzusetzen. Im Fall der NPMM-200 werden die Befehle über das lokale Netzwerk mit Hilfe des TCP/IP an die Messablaufsteuerung (SCS) übertragen (in Abbildung 3.21 mit CMD gekennzeichnet). Außerdem empfängt der Plugin Statusmeldungen (*Events*, abgekürzt mit E) vom SCS. Darüber hinaus stellen die einzelnen Teilsysteme CS, DAS und SCS dem Plugin vorverarbeitete Messdaten und andere Informationen zur Verfügung (D0, D1 und D2). Das DAS hat darüber hinaus eine zweite Datenverbindung zur Bereitstellung der Umweltmessdaten aus der Messumgebung der NPMM-200 (D3). Die Messumgebung und die Erfassung der Umweltmessdaten werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

3.8 Messumgebung

Die Messumgebung der NPMM-200 leistet aufgrund von Temperatur-, Luftdruck- und Luftfeuchteschwankungen einen signifikanten Beitrag zu den erreichbaren Messunsicherheiten. Außerdem sind auch Vibrationen und Schall von Bedeutung. Zur Reduzierung aller genannten Einflussfaktoren sind geeignete Maßnahmen am Aufstellort und Korrekturen aller Messwerte mit gemessenen Umweltparametern erforderlich – insbesondere der interferometrischen Längenmesswerte.

In [92] werden die Aufstellbedingungen der NMM-1 und die mit Hilfe der Maßnahmen erzielten Ergebnisse ausführlich beschrieben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und den Betrachtungen in [131, 134] wurde die NPMM-200 für den Einsatz im Grobvakuum konzipiert. Auf diese Weise können nicht nur Temperatureinflüsse, sondern auch der Einfluss von Luftdruckschwankungen auf die interferometrische Längenmessung effektiv reduziert werden. Nachfolgend werden nun die Umgebungsbedingungen der NPMM-200 beschrieben, mit deren Hilfe die angestrebte kombinierte 3-D-Messunsicherheit ≤ 30 nm erreicht werden soll.

3.8.1 Vakuumkammer, Temperierung und Schallisolation

Die NPMM-200 wird in einer Vakuumkammer mit einem Fassungsvermögen von $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$ betrieben, die im Ernst-Abbe-Zentrum (EAZ) der TU Ilmenau aufgestellt ist (Abbildung 3.22). Die abgesetzte Elektronik-einheit zur Versorgung, Messdatenerfassung und Signalverarbeitung befindet sich momentan etwa 2 m entfernt vom Rezipienten. Die Verbindung zu diesem bzw. zur NPMM-200 erfolgt über trennbare optische und elektrische Leitungen. Die Abmessungen der Elektronikeinheit sind im Vergleich zur NMM-1 beträchtlich gestiegen, sodass die Unterbringung in einem großen 19-Zoll-Elektronikschrank erforderlich ist. Eine Übersicht über die 19-Zoll-Einschübe des Elektronikschanks enthält Tabelle A.1 im Anhang.

Für die NPMM-200 wird ein Messbetrieb im Grobvakuum bei $p \approx 1$ mbar angestrebt. Bei leerer Vakuumkammer konnte mit der vorhandenen Pumpenanlage sogar ein Enddruck von $5 \cdot 10^{-5}$ mbar erzielt werden. Derzeit kann noch keine Aussage zum erreichbaren Druck und der Leckrate gemacht werden, wenn sich die NPMM-200 in der Kammer befindet.

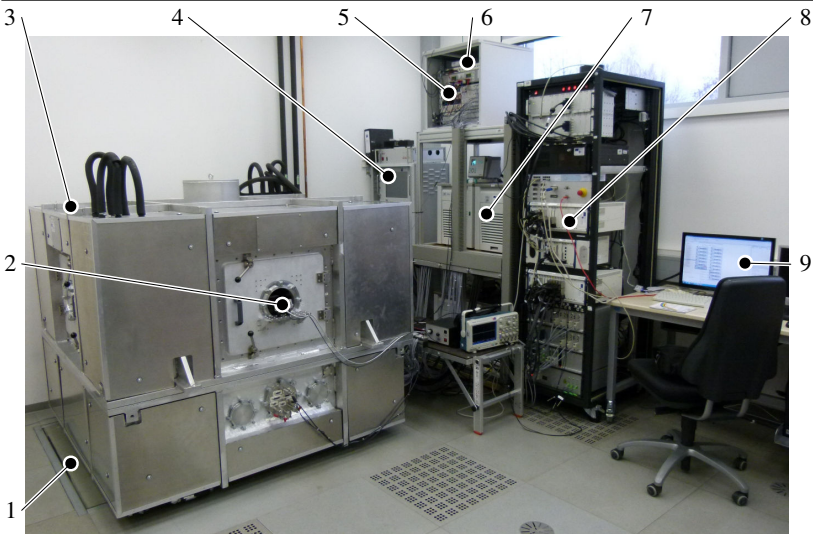


Abbildung 3.22: Messumgebung der NPMM-200: 1 schwingungsisoliertes Fundament, 2 Überblickkamera des Beobachtungskamerasystems, 3 Vakuumkammer mit Temperierung und Schallschutz, 4 Steuerung für die Vakuumkammer, 5 Umweltmesssystem, 6 Videoserver, 7 Kälte-Umwälzthermostate (4 Stück), 8 Elektronikeinheit, 9 Benutzer-PC

Die Vakuumkammer ist darüber hinaus mit einem Temperierungssystem für den Innenraum ausgerüstet. Von außen, d. h. atmosphärenseitig, sind Kühlkanäle auf die Vakuumkammer aufgebracht, durch die Wasser als Temperiermedium mit Hilfe eines Kälte-Umwälzthermostaten Julabo FPW50-HL gepumpt wird [142]. Die Heiz- oder Kühlleistung des Thermostaten wird mit Hilfe eines externen, in der Vakuumkammer befindlichen Temperatursensors vom Typ Platin 100 (Pt 100) auf eine vorgegebene Solltemperatur (20°C) geregelt. Der Thermostat ist an die Kühlwasserversorgung des Gebäudes angeschlossen, um seine eigene Abwärme effektiv abführen zu können, so dass die Raumtemperatur möglichst wenig beeinflusst wird. Drei weitere Kälte-Umwälzthermostate, deren Abwärme in gleicher Weise abgeführt wird, werden für die Kühlung der Längenmesssysteme und des Antastsystems (optional), die Antriebssysteme und die Lasereinheiten im Elektronikrack eingesetzt. Bei diesen drei Thermostaten wird die Heiz- oder Kühlleistung jedoch

nicht über einen externen Sensor, sondern über eine vorgegebene konstante Temperatur der internen Wasserbäder geregelt.

Zur Erfassung der Umweltmessdaten werden zwei identische Systeme – basierend auf je einem Messdatenerfassungssystem Agilent 34970A mit zwei integrierten 20-Kanal-Multiplexer-Modulen [2] – eingesetzt, die in ähnlicher Weise seit mehreren Jahren erfolgreich bei der NMM-1 im EAZ verwendet werden [92]. Ein System wird zur Protokollierung (*Logging-System*) und eins zur Online-Korrektur (*Correction-System*) eingesetzt. Insgesamt sind 30 Temperatursensoren vom Typ Pt 100 an 15 verschiedenen Stellen im mechanisch-optischen Aufbau der NPMM-200 integriert. An jedem Ort sind zwei Sensoren redundant angeordnet, von denen einer am *Logging*- und einer am *Correction-System* angeschlossen ist. Bei Messung unter atmosphärischen Bedingungen kann eine zusätzliche, speziell für die Applikation in der NPMM-200 entwickelte Umweltmessbox in der Vakuumkammer montiert und an das *Logging-System* angeschlossen werden. Diese beinhaltet einen Drucksensor RPT 100 [66], einen Feuchtesensor HIH-4602-C [121] und einen weiteren Temperatursensor. Auf die Integration eines CO₂-Sensors zur Brechzahlkorrektur wurde verzichtet, da der verfügbare Sensor eine relativ hohe Verlustleistung von 2,4 W und eine ungenügende Genauigkeit von $\pm 2\%$ besitzt [92].

Die Messwerte der Temperatursensoren an den Messarmen der drei Interferometer in der Vakuumkammer (bei Normaldruck) sind für einen Monat (am Beispiel von Dezember 2012) in Abbildung 3.23 dargestellt. Ergänzend ist in dieser Abbildung auch der Verlauf der Temperatur im Laborraum abgetragen, d. h. die Umgebungstemperatur der Vakuumkammer. Abbildung 3.24 zeigt die Temperaturwerte an den Aktoren und die Laborraumtemperatur in diesem Monat. In dem dargestellten Zeitraum waren die Temperierung der Vakuumkammer und die Klimatisierung des Laborraums durchgängig eingeschaltet. Die Wirksamkeit des Temperierungssystems und die Effektivität der getroffenen Schutzmaßnahmen zeigen sich dadurch, dass in diesem Zeitraum Temperaturschwankungen im Labor um bis zu 1 K zu verzeichnen sind, die jedoch keine Korrelation zu den Temperaturwerten an den Aktoren und den Interferometern im Rezipienten zeigen. Zu Beginn des dargestellten Zeitraums liefen Messreihen mit der NPMM-200. Es sind deshalb Temperaturschwankungen an den Aktoren zu beobachten, wohingegen die Temperaturwerte an den Interferometern nahezu konstant bleiben.

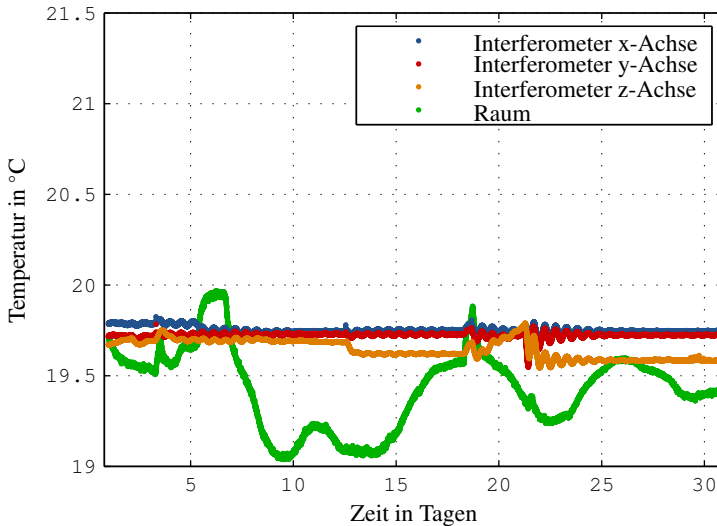


Abbildung 3.23: Verlauf der Temperaturwerte an den Interferometern und im Laborraum für einen Monat (Dezember 2012)

Am Nachmittag des 12. Dezember wurden die Messreihen abgeschlossen und die Aktoren deaktiviert. Daraufhin fielen die an ihnen gemessenen Temperaturen ab und es bildete sich ein Temperaturplateau aus. Vom 13. bis zum 17. Dezember wurde die Temperaturstabilität in der Vakuumkammer über einen Zeitraum von 100h ermittelt, in dem keine Personen im Laborraum anwesend waren. Die Temperaturwerte der einzelnen Interferometer-Achsen zeigten eine maximale Abweichung von 23,4 mK. Gleichzeitig schwankte die Raumtemperatur um bis zu 0,5 K. Die Herstellerspezifikation zur Temperaturstabilität in der Vakuumkammer von $\pm 0,01$ K [142] wird in diesem untersuchten Zeitintervall also knapp überschritten. Dies ist auf die vergleichsweise starke Änderung der Raumtemperatur im Labor zurückzuführen. Betrachtet man nämlich hingegen die Temperaturwerte in einem Zeitintervall von ca. 150h beginnend am 25. Dezember, so konnte eine maximale Temperaturdifferenz in der Vakuumkammer von 12,7 mK an den Interferometern bei Änderungen der Raumtemperatur $< 0,25$ K gemessen werden, was innerhalb der Herstellerspezifikation liegt. In den zwei Bereichen der Temperaturplateaus sind konstante Offsets zwischen den Temperaturmesswerten an den drei Inter-

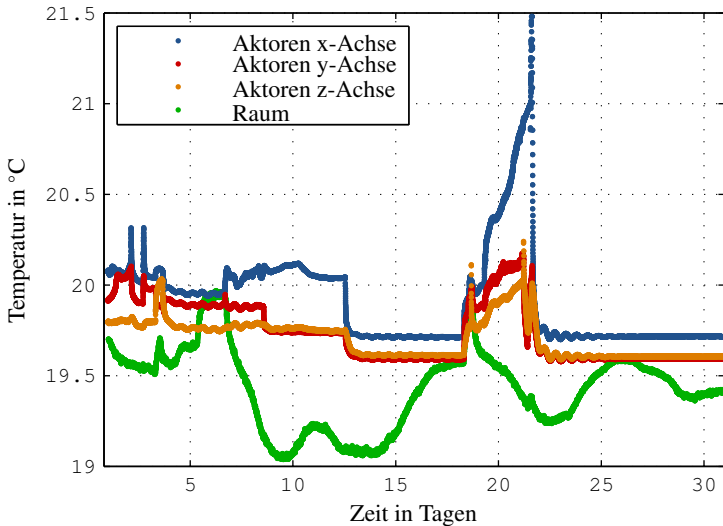


Abbildung 3.24: Verlauf der Temperaturwerte an den Aktoren und im Laborraum für einen Monat (Dezember 2012)

ferometern zu beobachten (≈ 20 mK zwischen x- und y-Achse und $\approx 0,14$ K zwischen x- und z-Achse). Diese Offsets sind größtenteils auf die zum Zeitraum der Messung fehlende Kalibrierung der Temperatursensoren zurückzuführen. Der Offset zwischen den Achsen x und z kann in geringem Maße auch auf einen vertikalen Temperaturgradienten in der Vakuumkammer zurückgeführt werden. Diese These wurde in ersten grundlegenden FEM-Simulationen zur Temperaturverteilung und zu Temperaturgradienten im Rezipienten unter Berücksichtigung lokaler Wärmequellen bestätigt [229].

Am 18. Dezember wurde morgens eine Untersuchung zum Temperaturverlauf bei Bestromung aller Aktoren mit einem Dauerstrom von 0,5 A bis 1,5 A und deaktivierter Aktorkühlung (vgl. Abschnitt 4.3.3) gestartet. Diese Untersuchung wurde am Morgen des 21. Dezember beendet. Es zeigt sich ein Temperaturanstieg an den Aktoren, der mit der Höhe des eingestellten Dauerstroms korreliert. Die Temperatursensoren an den Interferometern der Achsen x und y zeigen keine signifikanten Anstiege. Lediglich am z-Interferometer ist ein langsamer Temperaturanstieg über den Zeitraum der Untersuchung zu beobachten. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Ab-

stand des z-Interferometers zu den Aktoren der z-Achse deutlich geringer ist als der Abstand zu den x- und y-Interferometern.

Nach Abschluss der Untersuchung mit Dauerbestromung der Aktoren wurden diese deaktiviert. Die an ihnen gemessenen Temperaturen fielen innerhalb weniger Stunden exponentiell ab und es bildete sich erneut ein Temperaturplateau aus. Allerdings waren bei allen Temperaturmesswerten an den Aktoren und den Interferometern nach der Deaktivierung periodische Einschwingvorgänge über einen Zeitraum von ca. 3 Tagen zu beobachten. Diese sind auf die Trägheit der Temperaturregelung des Kälte-Umwälzthermostaten auf den vorgegebenen Sollwert von 20 °C mit Hilfe eines Temperatursensors in der Vakuumkammer sowie das große Luftvolumen derselben zurückzuführen. Erst nach etwa 3 Tagen herrschte eine stabile räumliche Temperaturverteilung.

Momentan werden für die Temperaturregelung die vom Hersteller für das Volumen der Vakuumkammer empfohlenen Parameter verwendet. Vergleichende Untersuchungen, bei denen die Regelung der Heiz- oder Kühlleistung auf konstante Temperatur des Wasserbads des Kälte-Umwälzthermostaten eingestellt wurde, haben gezeigt, dass sich erst nach einer Ausgleichszeit von ca. 48 h Temperaturplateaus ausbildeten und dass während Messungen die Temperatur stetig anstieg, wenn die Kühlung der Aktoren deaktiviert war. Deshalb ist die Regelung der Heiz- oder Kühlleistung mit Hilfe eines Temperatursensors in der Vakuumkammer zu bevorzugen. Die Reglerparameter können in der Zukunft durch FEM-Simulationen zur Temperaturverteilung und zum Temperatenausgleich und mit Hilfe von Verifikationsmessungen optimiert werden. Um die Unsicherheit durch thermische Ausdehnung für eine konkrete Messung abzuschätzen, müssen die jeweiligen temporären Temperaturstabilitäten genutzt werden [92].

Einen weiteren kritischen Einflussfaktor stellen Schallquellen in der Umgebung der Vakuumkammer dar, z. B. Lüfter im Elektronikschrank oder die Raumklimatisierung. Deshalb wurden zusätzlich geeignete Maßnahmen zur Schallisolation getroffen [92].

3.8.2 Schwingungsisoliation

Für die Bedingungen hinsichtlich der Schwingungsisoliation am Aufstellort hochpräziser Maschinen und Geräte in der Halbleiterindustrie, Nanotechnologie, Messtechnik und weiteren verwandten Forschungs- und Industriezwei-

gen existieren drei Spezifikationen: die in den 1980er Jahren von Colin G. Gordon aufgestellten VC Kriterien, das in den 1990er Jahren vom NIST für ein neues Labor entwickelte NIST-A Kriterium und die in jüngerer Zeit festgelegten „Nano-Kriterien“. Diese Schwingungskriterien definieren frequenzabhängige Maximalwerte für die zulässigen Schwingungsschnellen [28]. Eine Übersicht gibt Abbildung 3.25.

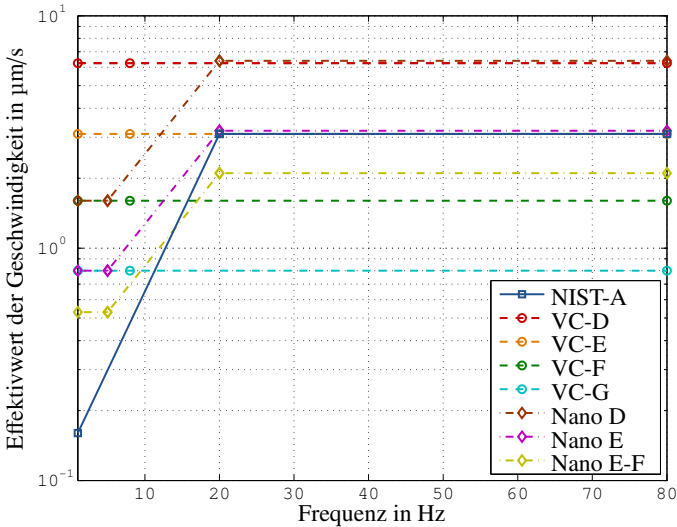


Abbildung 3.25: Schwingungskriterien für den Aufstellort hochpräziser Geräte (angelehnt an [6, 126])

Die VC-Kriterien wurden ursprünglich für die Halbleiterindustrie entwickelt, finden heute aber auch in anderen Bereichen Anwendung [85]. Das NIST-A Kriterium wurde hingegen speziell für metrologische Staatsinstitute definiert und fand beim Neubau eines NIST-Forschungslabors Anwendung [7]. Das NIST-A Kriterium ist für Frequenzen oberhalb von 20 Hz identisch zum VC-E Kriterium. Unterhalb von 20 Hz existiert eine konstante Verschiebung des Effektivwerts der zulässigen Schwingungen. Damit wird den speziellen Anforderungen hochpräziser Maschinen und Messgeräte Rechnung getragen. Speziell für die Nanotechnologie wurden die „Nano-Kriterien“ D, E und E-F definiert, um die niederfrequenten Störungen < 10 Hz in ähnlicher Weise wie das NIST-A Kriterium zu berücksichtigen und die geräte-

technischen Anforderungen zur Herstellung und Messung von Strukturbreiten $< 1 \text{ nm}$ einhalten zu können [202, 232]. Die „Nano-Kriterien“ sind jedoch nur mit viel technischem Aufwand und besonderen Baukonstruktionen realisierbar [126]. Für die NPMM-200 wurde versucht, im Rahmen der technischen Möglichkeiten am Aufstellort im EAZ das NIST-A Kriterium bestmöglich zu erfüllen. Hierzu wurde das im Labor vorhandene passiv schwingungs isolierte Fundament hinsichtlich besserer Entkopplungseigenschaften von der Firma Fabreeka optimiert. Auf dem Fundament steht die Vakuumkammer, abgestützt auf 7 Aufstellfüßen (Abbildung 3.26).

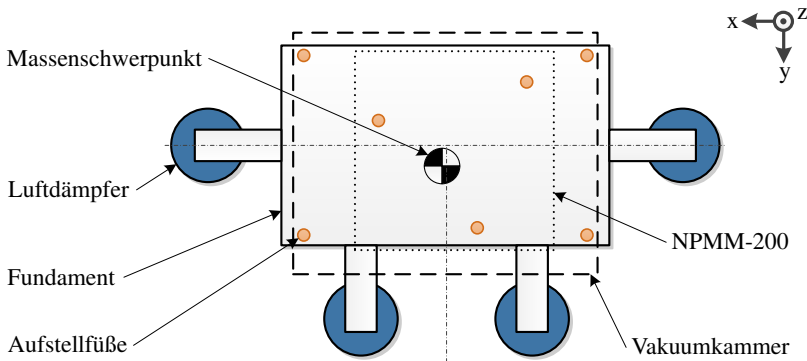


Abbildung 3.26: Anordnung der Luftdämpferelemente am schwingungs isolierten Fundament mit Vakuumkammer (Ansicht von oben)

Die Gerätebasis der NPMM-200 wird über drei Kugel-V-Nut-Paarungen in der Vakuumkammer gelagert. Ein zusätzlicher pneumatischer Schwingungs isolationstisch wie bei der NMM-1 ist nicht vorgesehen. Die Aufstellfüße der Vakuumkammer ermöglichen eine manuelle Nivellierung der Kammer und damit der NPMM-200, um die durch die Hangabtriebskraft verursachte Verlustleistung der lateralen Antriebe möglichst gut zu reduzieren. Das schwingungs isolierte Fundament, auf dem die Vakuumkammer steht, stellt also die einzige Entkopplung von Gebäudeschwingungen und anderen externen Störgrößen dar. Das Gesamtsystem weist eine Masse von etwa 8 t auf. Diese setzt sich aus der Masse des Fundaments (ca. 6 t) und den Massen von Vakuumkammer und NPMM-200 (in Summe ca. 2 t) zusammen. Die bewegte Masse der NPMM-200 beträgt in etwa 150 kg, was ca. 2 % der Gesamtmasse entspricht.

Bei umfangreichen Schwingungsmessungen, die gemeinsam mit dem Teilprojekt „Dynamik von NPM-Maschinen“ des SFB 622 durchgeführt wurden, hat sich gezeigt, dass alle Messreihen Extremwerte über $3 \mu\text{m/s}$ aufweisen. Somit wird das NIST-A Kriterium nicht erfüllt.

Verbleibende Gebäudeschwingungen, die Vibrationen der Klimaanlage und externe Erschütterungen werden über das Fundament, die Vakuumkammer, die auf großer Länge frei hängenden elektrischen und fluidischen Versorgungsleitungen sowie die Gerätebasis eingekoppelt und regen das Positioniersystem zu Schwingungen an. Diese stellen Störgrößen für die Positions- und Winkelregelungssysteme dar. Auswirkungen derartiger externer Einflüsse auf das Positioniersystem der NPMM-200 bzw. den Messvorgang wurden mit Hilfe von reproduzierbar eingepprägten Stößen an der Vakuumkammer untersucht. Abbildung 3.27 und Abbildung 3.28 zeigen die Ergebnisse bei deaktivierter und aktivierter Positionsregelung im Vergleich.

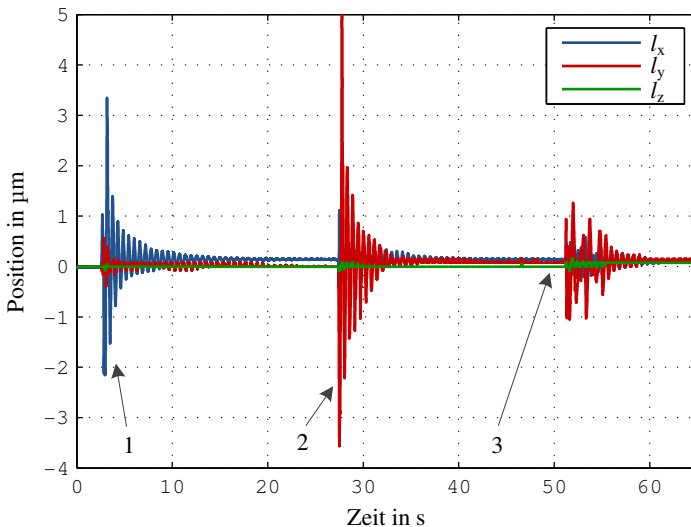


Abbildung 3.27: Positions-messwerte nach Stoß in 1 x-, 2 y- und 3 z-Richtung bei deaktivierter Positionsregelung

In Abbildung 3.27 ist der zeitliche Verlauf der Positionsmesswerte der x-, y- und z-Interferometer (l_x , l_y , l_z) nach gezielt eingepprägten Stößen an der

Vakuumkammer in x-, y- und z-Richtung bei deaktivierter Positionsregelung dargestellt. In diesem Zustand ist die Spiegelplatte lateral frei im Raum beweglich und in vertikaler Richtung wird sie aufgrund der Gewichtskraft in die unteren mechanischen Endanschläge gedrückt. Nach den Stößen sind freie Schwingungen der Spiegelplatte in lateraler Richtung mit Eigenfrequenzen von ca. 1,7 Hz zu beobachten. Die Schwingungen sind nach etwa 18 s abgeklungen. Es ist zu erkennen, dass die Schwingungsamplitude bei Anregung in y-Richtung signifikant höher als die bei Anregung in x-Richtung ist. Ursache hierfür ist die Anordnung der Dämpfer bezogen auf den Schwerpunkt des Gesamtsystems (vgl. Abbildung 3.26). Die Spiegelplatte zeigt in z-Richtung unabhängig von der Anregungsrichtung keine signifikanten Schwingungen, da sie mit ihrem Eigengewicht auf den mechanischen Endanschlägen ruht und die Schwingungsisolierung des Fundaments in vertikaler Richtung eine höhere Dämpfung als in lateraler Richtung aufweist.

Die gemessenen Eigenschwingungen des Gesamtsystems mit einer Frequenz von ca. 1,7 Hz in lateraler Richtung werden durch das schwingungsisierte Fundament nur unzureichend gedämpft und stellen äußere Störgrößen dar. Deshalb wurde ihr Einfluss bei aktivierter Positionsregelung untersucht, um eine Aussage treffen zu können, inwieweit die Positionsregelung diese niederfrequenten Schwingungen effektiv kompensiert (Abbildung 3.28). Als Sollposition für die Positionsregelung der Spiegelplatte wurde die Mitte des Messbereichs ($x = y = 100$ mm, $z = 12,5$ mm) vorgegeben. In allen drei Anregungsrichtungen wirken sich die Stöße auf die Positionsmesswerte aus. In der Darstellung der Positionierabweichungen sind ebenfalls Schwingungen mit ca. 1,7 Hz zu beobachten. Allerdings ist die Schwingungsamplitude in allen Richtungen deutlich kleiner als bei deaktivierter Positionsregelung. Da die Spiegelplatte in vertikaler Richtung nicht mehr auf den mechanischen Endanschlägen ruht, sind beim Stoß in z-Richtung sowohl Positionierabweichungen in vertikaler als auch in horizontaler Richtung zu erkennen. Die Winkelmesswerte φ_x , φ_y und φ_z belegen, dass auch Verkippungen der Spiegelplatte auftreten. Unabhängig von der Anregungsrichtung schafft es die Positionsregelung, die von außen eingepprägten Stöße in bis zu 5 s auszuregulieren. Im Vergleich zur Abklingzeit bei deaktivierten Antrieben ist dies um den Faktor drei kleiner. Das zeigt, dass die Positionsregelung zu einem gewissen Teil die von außen eingepprägten Störungen mindert bzw. kompensiert. Im Messbetrieb werden die Antastsystem- und Interferometersignale simultan aufgezeichnet, und

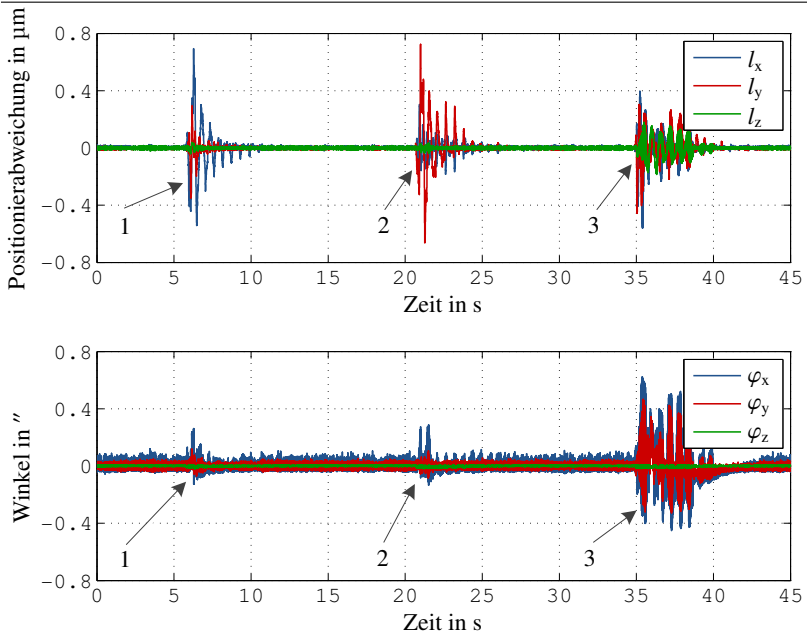


Abbildung 3.28: Positions- und Winkelmesswerte nach Stoß in 1 x-, 2 y- und 3 z-Richtung bei aktivierter Positionsregelung

die Messwertberechnung erfolgt als Differenzbildung zwischen den Signalen. Sind die Frequenzgänge des Antastsystems und der Interferometer für das Spektrum der eingepprägten Störungen idealerweise gleich, heben sich die gemessenen Schwingungen auf und beeinflussen die Messunsicherheit nicht. Wenn die Antastsysteme jedoch wesentlich geringere Frequenzgänge als die Interferometer aufweisen, müssen die durch das Störspektrum verursachten Messabweichungen in der Messunsicherheitsberechnung berücksichtigt werden [92]. Die Kompensation der Schwingungen kann allerdings nur in Antrichtung erfolgen. Das bedeutet, dass beispielsweise bei Oberflächenmessungen mit dem Fokussensor (vgl. Abschnitt 7.1) diese Schwingungen (vgl. Abbildung 3.28) zu unbekannt, lateralen Abweichungen der gemessenen Punkte auf der Messobjektoberfläche führen können.

Beim Betrieb der NPM-200 im Vakuum müssen außerdem die Vibrationen der Vakuumpumpen beachtet werden. Über flexible Rohre müssen die er-

zeugten mechanischen Schwingungen von der Vakuumkammer bestmöglich entkoppelt werden. Darüber hinaus können durch starke Druckschwankungen beim Evakuieren Schwingungen der Vakuumkammerwände entstehen.

3.8.3 Beobachtungskamerasystem

Wenn Messungen im Grobvakuum durchgeführt werden, kann die Vakuumkammer nicht geöffnet werden. Auch bei Messungen unter atmosphärischen Bedingungen ist dies nicht sinnvoll, da es zu Störungen des Temperierungszustandes führt. Deshalb ist ein Beobachtungskamerasystem zur Orientierung im Messvolumen und zur Beobachtung von Antastsystem und Messobjekt erforderlich, insbesondere wenn komplexe 3-D-Messungen an unbekanntem Messobjekten durchgeführt werden. Das System der NPMM-200 basiert – wie bei der NMM-1 – auf einem Videosever SNT-V704, an den bis zu vier Kameras angeschlossen werden können [92, 271]. In der derzeitigen Systemkonfiguration sind zwei Überblickkameras dauerhaft angeschlossen, eine für die x- und eine für die y-Achse (siehe Abbildung 3.22). Die zwei Überblickkameras sind von außen an der Vakuumkammer montiert. Zwei Glasfenster an der Kammer ermöglichen die Ausrichtung und Fokussierung auf das Antastsystem. Dritter und vierter Kamerakanal werden derzeit für das Antastsystem benutzt und können an einem analogen Monitor neben dem Benutzer-PC beobachtet werden (z. B. beim Fokussensor, siehe Abschnitt 7.1).

3.9 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden das metrologische Konzept und der mechanisch-optische Grundaufbau der NPMM-200 vorgestellt. Darüber hinaus wurde auch das Grundkonzept der Informations- und Signalverarbeitung sowie das Steuerungs- und Bedienerkonzept erläutert. Betrachtungen zu den Aufstell- und Umgebungsbedingungen der NPMM-200 und den daraus resultierenden Einflüssen bei Messungen schließen dieses Kapitel ab. Es wird deutlich, dass die NPMM-200 als komplexes mechatronisches System aus zahlreichen Einzelkomponenten besteht, deren gegenseitige Verzahnung die Funktionsfähigkeit des gesamten Messgeräts erst gewährleistet. Im folgenden Kapitel wird das Positioniersystem detailliert beschrieben. Es schafft aus mechanischer Sicht die Grundlage für die hochpräzise 3-D-Nanopositionierung.

4 Positioniersystem

Ein wichtiger Bestandteil der NPMM-200 ist das Positioniersystem. Dieser Begriff wird in der Literatur oft mehrdeutig oder unbestimmt genutzt [69]. Im Rahmen dieser Dissertation wird der Begriff *Positioniersystem* in Anlehnung an [282] benutzt. Den Kern bildet ein Energiewandler, der nicht-kinetische Energie in kinetische Energie wandelt und als *Aktor* bezeichnet wird. Weitere, nicht für jede Anwendung erforderliche Bestandteile sind Getriebe, Führungssysteme, eine Vorrichtung zur Gewichtskraftkompensation sowie Messsysteme (Abbildung 4.1).

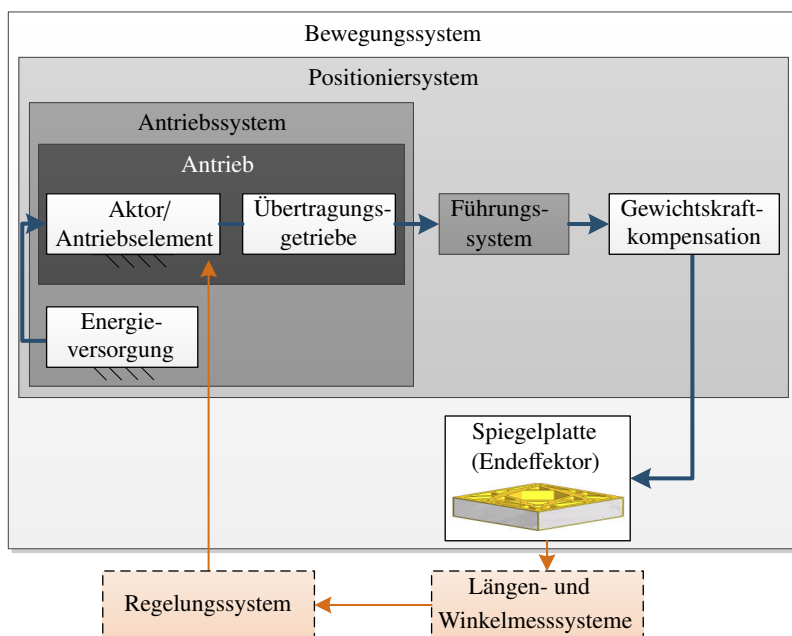


Abbildung 4.1: Komponenten eines NPMM-Positioniersystems (in Anlehnung an [282])

Die enorme technische Herausforderung besteht darin, dass das Positioniersystem einen Bewegungsbereich von 200 mm in der Ebene und 25 mm in der vertikalen Richtung ermöglichen und simultan eine Positionierauflösung im Subnanometerbereich realisieren muss. Der große Bewegungsbereich ergibt sich aus den Anforderungen verschiedener Industriezweige, wie zum Beispiel der Halbleiterindustrie oder der Optikindustrie, und neuartigen Technologien, beispielsweise der EUVL. Ein weiterer Aspekt ergibt sich aus der sogenannten Mikro-Nano-Integration. Durch die fortschreitende Miniaturisierung können viele Bauteile zwar immer kleiner hergestellt werden, jedoch ist eine Schnittstelle für die Systemintegration unumgänglich. Diese Schnittstelle bedingt jedoch, dass die äußeren Abmessungen der Bauteile im Zentimeterbereich liegen, wohingegen die funktionswichtigen, im Rahmen der Qualitätskontrolle zu prüfenden Strukturen wenige hundert Nanometer groß sind.

Die Forderung an die Positionierauflösung resultiert aus den Zielen für realisierbare Strukturbreiten und Positionierabweichungen, die in der *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS) für die nächsten Jahre angestrebt werden und die als Richtlinie für Chip- und Gerätehersteller gilt [129]. So wird beispielsweise prognostiziert, dass im Jahr 2021 Strukturbreiten von bis zu 12,5 nm mit Lageabweichungen von maximal 1,3 nm realisiert werden müssen. Für die Entwicklung von NPMMs ist darüber hinaus die *EMRP Roadmap* von besonderer Bedeutung, die von verschiedenen europäischen metrologischen Staatsinstituten speziell für die Prognose zur Weiterentwicklung dimensioneller Mikro- und Nanotechnologie entwickelt wurde [39]. Dort wird für den Zeitraum von 2016 bis 2020 die Realisierung von 2-D- bzw. 3-D-Multisensormessungen mit NPMMs und die Verfügbarkeit entsprechender Normale prognostiziert, die Strukturen auf Nanometerebene besitzen und gleichzeitig Abmessungen über mehrere hundert Millimeter aufweisen. Das bedingt eine adäquate Weiterentwicklung der Messtechnik, denn es muss mit nahezu atomarer Auflösung positioniert und gemessen werden. Die erforderlichen Messunsicherheiten liegen dann im einstelligen Nanometerbereich, was dementsprechend eine Positionierreproduzierbarkeit im Subnanometerbereich voraussetzt.

Eine weitere technologische Zielstellung bei der Konstruktion des Positioniersystems ist eine möglichst hohe Dynamik zu erreichen. Dies resultiert aus den vielfältigen Bewegungsprofilen einer NPMM. Zur Grobpositionierung werden hohe Verfahrensgeschwindigkeiten mit bis zu 30 mm/s angestrebt,

wohingegen Scanmessungen mit möglichst konstanter Geschwindigkeit typischerweise zwischen $100\ \mu\text{m/s}$ und $500\ \mu\text{m/s}$ erfolgen und dabei die Bewegungsrichtungen stark variieren können. Darüber hinaus werden im Betrieb als taktiles Nanokoordinatenmessgerät Antastvorgänge mit sehr geringen Geschwindigkeiten $< 5\ \mu\text{m/s}$ ausgeführt. Die erzielbare Dynamik wird maßgeblich durch die bewegten Massen limitiert.

In diesem Kapitel werden zunächst verschiedene Kinematikkonzepte zum Aufbau dreiachsiger Positioniersysteme diskutiert (Abschnitt 4.1). In den Abschnitten 4.2 und 4.3 werden Führungs- und Antriebssysteme der NPMM-200 erläutert. Abschnitt 4.4 beschreibt die GKK-Einheiten. Im Abschnitt 4.5 erfolgen Betrachtungen zu Varianten von Endlagenschaltern und der Realisierung in der NPMM-200.

4.1 Kinematikkonzepte

Aus der Koordinatenmesstechnik und der Werkzeugmaschinenarchitektur sind grundsätzlich zwei verschiedene Kinematikkonzepte zum Aufbau dreiachsiger Positioniersysteme bekannt. Man unterscheidet Systeme mit Parallelkinematik und solche mit Seriellkinematik [14].

Reine *Parallelkinematiksysteme* sind dadurch gekennzeichnet, dass jede der einzelnen Achsen die gemeinsame Plattform stützt. Das bekannteste Beispiel ist ein Hexapod, auch als Stewart-Plattform in der Literatur bekannt [280]. Ein Hexapod verfügt über sechs Linearachsen zwischen zwei Plattformen, wodurch alle translatorischen und rotatorischen Bewegungen ($\text{DOF} = 6$) ermöglicht werden [220]. Die Versorgungskabel werden nicht bewegt, da alle Antriebe mit dem Grundbett fest verbunden sind. Hexapoden werden vom Marktführer Physik Instrumente GmbH & Co. KG in vielen verschiedenen Ausführungen angeboten: mit Stellbereichen bis zu $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$, Neigungswinkeln bis zu 60° (Drehpunkt im Raum frei definierbar), Auflösungen im Nanometerbereich und Eignung für Vakuum [220]. Der Vorteil eines Hexapods besteht in der geringen bewegten Masse und der dadurch deutlich verbesserten Dynamik. Hauptnachteil ist jedoch das äußerst komplexe Regelungskonzept [75, 225]. In der Nanomess- und Nanopositioniertechnik existieren zwar Konzepte für Parallelkinematiksysteme [195, 253, 291], jedoch werden die angestrebten Genauigkeitsanforderungen für die NPMM-200 durch derar-

tige Systeme bei weitem nicht erreicht. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass im Bereich von Industrierobotern, bei denen Positionierreproduzierbarkeiten im Mikrometerbereich gefordert werden, Parallelkinematiksysteme durchaus verbreitet sind, wohingegen in der Koordinatenmesstechnik und in der Nanokoordinatenmesstechnik Systeme mit Seriellkinematik dominieren.

Seriellkinematiksysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sich die einzelnen Bewegungsachsen gegenseitig tragen. Jedes Führungs- und Antriebssystem ist einer Bewegungsachse zugeordnet, d. h. jeder Antrieb wirkt auf eine eigene Stellplattform. Dementsprechend definieren die Führungsachsen die Koordinatenachsen des Positioniersystems und deren Winkel zueinander. Die Winkellage kann gemessen und kalibriert werden, sodass durch Kippungen verursachte systematische Messabweichungen kompensiert werden können. Elektrische Versorgungsleitungen müssen unter Umständen dann bis auf die oberste, in allen drei Achsen bewegte Stellplattform hochgeführt werden. Dies stellt keine Schwierigkeit dar, da Flachbandkabel (FFC), die in einer Richtung flexibel sind, zum Stand der Technik gehören und in mannigfaltigen Ausführungsformen erhältlich sind. Hinsichtlich des Regelungssystems ergibt sich der Vorteil, dass je nach Anforderung an die Positionierreproduzierbarkeit und die Bahntreue einfache, entkoppelte Positionsregler ausreichend sind. Allerdings führen translatorische Führungsabweichungen zu Messabweichungen in den jeweils orthogonalen Bewegungsachsen, die im Mikrometerbereich liegen und je nach geforderter Positioniergenauigkeit im Regelungskonzept mitberücksichtigt werden müssen.

Darüber hinaus gibt es auch noch *gemischte Kinematiksysteme*, bei denen zwei Achsen in Form einer Parallelkinematik ausgeführt sind und die dritte, vertikale Achse als seriellkinematische Linearachse aufgesetzt wird. Derartige Systeme erfordern Planarführungen für die lateralen, parallelisierten Achsen. Ein wesentlicher Vorteil planarer Führungen besteht darin, dass sie einen flachen Bauraum besitzen. Außerdem ist ein zusätzlicher Drehfreiheitsgrad um die z-Achse vorhanden. Dieser muss entweder gesperrt werden oder er kann für das Führungssystem genutzt werden, da er eine zusätzliche Verstellung um diese Achse ermöglicht. Dieser Freiheitsgrad muss dann auch geregelt werden. Die Schwierigkeit bei der Realisierung eines dreiachsigen Positioniersystems mit Hilfe einer Planarführung besteht darin, dass die Versorgungsleitungen zwischen dem ortsfesten Grundbett und der in zwei Achsen bewegten Planarplattform in beiden Richtungen flexibel sein müssen [250].

4.2 Führungssystem

Im Allgemeinen dient eine Führung zur Realisierung einer geradlinigen Bewegung, bei der alle rotatorischen DOF und mindestens eine Translation gesperrt sind. Wird hingegen nur ein rotatorischer DOF zugelassen, spricht man von Lagern. Letztere werden im Rahmen dieser Dissertation nicht näher betrachtet. Ein 3-D-Führungssystem für eine NPMM übernimmt also die Aufgabe, geradlinige Bewegungen in den drei Koordinatenachsen zu realisieren, denn ein im Raum frei beweglicher Körper hat prinzipiell sechs DOF: drei Translationen (x , y , z) und drei Rotationen (φ_x , φ_y , φ_z). Ein Führungssystem setzt sich aus den ortsfesten Teilen (Gestell) und den geführten Teilen (Läufer) zusammen, zwischen denen eine Form- oder Kraftpaarung vorhanden ist [92]. In der Nanopositioniertechnik kommen unterschiedliche Führungsarten zum Einsatz, die im Folgenden zunächst beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung für das Führungssystem der NPMM-200 beurteilt werden. Anschließend wird die konstruktive Realisierung in der NPMM-200 vorgestellt.

4.2.1 Überblick zu Führungen

Es existieren in der Literatur verschiedene Einteilungskriterien für Führungen: nach Richtung der Kraftaufnahme in der Paarungsfläche (Axial- oder Radialführung), nach Reibungszustand (Festkörper-, Flüssigkeits- oder Gasführung), nach geometrischer Form der Reibelemente (Zapfen-, Kegel-, Spitzen- oder Kugelführung, usw.), nach Sicherungsart der Paarung (Kraftschluss, Form- oder Stoffschluss) oder nach Art der Reibung in der Paarung [157]. Man unterscheidet hierbei zwischen Gleitführungen (Gleit- oder Bohrerreibung), Wälzführungen (Roll- oder Wälzreibung), Federgelenkführungen (Reibung innerhalb des Werkstoffs) und Magnetführungen (magnetische Reibung) [157]. Diese Art der Einteilung ist in der Feinwerktechnik verbreitet und wird nachfolgend angewandt.

4.2.1.1 Gleitführungen

Gleitführungen kann man in zwei Unterkategorien einteilen: hydrodynamische und fluidostatische Gleitführungen. Charakteristisch für *hydrodynamische Führungen* ist, dass der Reibkoeffizient hauptsächlich von der Relativgeschwindigkeit zwischen den bewegten Teilen abhängig ist und darüber hin-

aus von Material, Oberflächenbeschaffenheit und der Größe der Gleitflächen sowie der Ölviskosität beeinflusst wird [41]. Der Reibkoeffizient kann mit Hilfe der Stribeckkurve beschrieben werden [285]. Während der Bewegung tritt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zwischen den festen und geführten Bauteilen zuerst eine Kombination von Festkörper- und Flüssigkeitsreibung (Mischreibung) auf. Oberhalb der Übergangsgeschwindigkeit bildet sich ein hydrodynamischer Schmierfilm aus, so dass nur noch Flüssigkeitsreibung wirkt. Im Stillstand dominiert die Haftreibung. Bei Richtungswechseln der Bewegung kann ein Umkehrsprung der Reibkraft auftreten. In der Feinwerktechnik werden hydrodynamische Führungen meistens unterhalb der Übergangsgeschwindigkeit eingesetzt und wirken somit als Verschleißführungen [157]. Im Sondermaschinenbau werden hydrodynamische Lager für große Wellen eingesetzt, da sie einen ruhigen Lauf und eine hohe Lebensdauer gewährleisten. Für die Nanopositioniertechnik sind hydrodynamische Führungen ungeeignet, da stark variierende Reibkräfte bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und häufigen Richtungswechseln bei der Bewegung sowie Haftgleit Effekte, sogenannte Stick-Slip-Effekte, die Positionsregelung erschweren und keine Positionsauflösung im Nanometerbereich ermöglichen.

Fluidostatische Führungen werden in aerostatische und hydrostatische Führungen unterteilt. *Aerostatische Führungen* sind dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den Gleitflächen durch verteilte Einströmdüsen oder poröse Materialien (Sinterluftlager) kontinuierlich Luft als Schmiermittel eingebracht wird [145, 245]. Die Führungsflächen sind somit durch einen sehr kleinen Luftspalt (typischerweise $< 20 \mu\text{m}$ [20]) getrennt. Ziel ist es, den Luftdruck so einzustellen, dass eine möglichst hohe Steifigkeit erreicht wird, wobei der Luftverbrauch und die gleichmäßige Einspeisung der Luft über die gesamte Führungsfläche von großer Bedeutung sind, insbesondere deshalb, weil die Tragkraft aerostatischer Führungen vom wirkenden Überdruck abhängig ist [259]. Die geringe Viskosität und die hohe Kompressibilität der Luftschicht führen dazu, dass aerostatische Führungen eine geringe, geschwindigkeitsabhängige Reibung und Dämpfung haben. Von außen aufgeprägte Störungen oder Turbulenzen der strömenden Luft führen zu Schwingungen der Führungselemente senkrecht zur Führungsrichtung, die auch als Restrauschen bezeichnet werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses Restrauschen bei poröser Luftaustrittsschicht der Führungselemente Amplituden von $< \pm 1 \text{ nm}$ aufweisen kann [106, 107]. Es begrenzt die minimal erreich-

bare Positionierauflösung [105]. Ein weiteres Problem sind Schwankungen der Druckluftversorgung, die zu Abstandsänderungen der Führungselemente führen können. Sie können durch den Einsatz von Druckreglern vermieden werden [244]. Darüber hinaus muss die Temperatur der Luftversorgung der Umgebungstemperatur angepasst werden, da die durch den Luftstrom eingebrachte Energie das thermische Gleichgewicht stört und ebenfalls zu Messabweichungen führen kann. Durch eine geeignete Anordnung der Längenmesssysteme kann dieser Einfluss reduziert werden. Aerostatische Führungen werden in verschiedenen NPMMs und Präzisionspositioniersystemen eingesetzt (siehe Abschnitt 2.1). Beim Einsatz aerostatischer Führungen im Vakuum ist zusätzlicher apparativer Aufwand erforderlich, da ein Gas für den Erhalt der Führungseigenschaften notwendig ist und dieses Gas zwischen den Führungselementen wieder abgesaugt werden muss. Deshalb kommen sie für den Einsatz in der NPMM-200 nicht in Frage.

Hydrostatische Führungen besitzen im Vergleich zu aerostatischen Führungen einen Schmierfilm aus Öl. Im Unterschied zu den hydrodynamischen Führungen wird der Druck für den Schmierfilm nicht durch die Relativgeschwindigkeit, sondern außerhalb der Führung aufgebaut und das Öl über Kapillaren oder einen Progressiv-Mengen-Regler zu den Führungsflächen geleitet [123]. Im Vergleich zu aerostatischen Führungen wirken sich die höhere Viskosität und die geringere Kompressibilität des Mediums vorteilhaft auf die Steifigkeit und die Dämpfung aus, wodurch hydrostatische Führungen weniger zu Schwingungen senkrecht zur Führungsrichtung neigen [218]. Hydrostatische Führungen werden heutzutage überwiegend in Werkzeugmaschinen eingesetzt [201]. Sie sind auch für die Nanopositioniertechnik unter atmosphärischen Bedingungen sehr gut geeignet, da sie ohne Verschleiß und ohne Stick-Slip-Effekte arbeiten. Gegenwärtig ist jedoch keine NPMM bekannt, die diese Führungsart einsetzt. Der Einsatz unter Vakuumbedingungen gestaltet sich schwierig, da das erforderliche Schmiermittel verdampft und derzeit keine vakuumtauglichen Schmiermittel auf dem Markt sind.

4.2.1.2 Wälzführungen

Wälzführungen zeichnen sich dadurch aus, dass Wälzkörper (Kugeln, Zylinderrollen etc.) zur Verringerung der Reibung zwischen Gestell und Läufer eingesetzt werden. Zur sicheren Führung und um ein gegenseitiges Berüh-

ren auszuschließen, sind die Wälzkörper meist in Käfigen gehalten [157]. Man unterscheidet zwischen Wälzführungen mit und ohne Rückführung der Wälzkörper. Aufgrund der Abrollbewegung der Wälzkörper und der damit verbundenen elastischen Verformungen an den Kontaktflächen tritt nur geringe Rollreibung auf. Im Vergleich zu hydrodynamischen Führungen fällt der Umkehrsprung der Reibkraft beim Richtungswechsel der Bewegung deutlich geringer aus. Er muss trotzdem im Regelungskonzept berücksichtigt werden [93, 320]. Die Größe des Umkehrsprungs ist von der Traglast der Wälzkörper abhängig. Letztere kann je nach Aufbau des Positioniersystems während der Bewegung in Abhängigkeit von der Führungsposition variieren. Für Anwendungen in der Nanopositioniertechnik müssen Ein- und Auslaufen der Wälzkörper an den Enden der Führungsschienen minimiert oder gänzlich vermieden werden, da dadurch sprunghafte Verkippungen des Aufbaus im Winkelsekundenbereich auftreten können. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Eine ist die spezielle Gestaltung der Einlaufzonen an den Führungsschienen, z. B. durch ballige Einlaufzonen oder aktiv deformierbare Bereiche [254, 256]. Die Alternative ist die konstruktive Vermeidung des Ein- und Auslaufens durch ausreichend lange Führungsschienen und adäquat dimensionierte Wälzkörperkäfige. Durch Vorspannung der Führungsschienen können Wälzkörperführungen spielfrei gestaltet werden. Im Vergleich zu Gleitführungen wirken sich Fremdkörper (Staubpartikel etc.) in den Führungsbahnen deutlich kritischer aus. Weitere Nachteile von Wälzführungen sind, dass die Bewegung bei hoher Flächenpressung stattfindet und die Dämpfung vergleichsweise gering ist.

In der Nanopositioniertechnik werden überwiegend Wälzführungen ohne Wälzkörperückführung eingesetzt. Als Wälzkörper werden in den meisten Fällen Kugeln verwendet [91]. Kugeln weisen die kleinste Berührfläche und damit eine geringere Steifigkeit auf. Die Steifigkeit lässt sich durch den Einsatz von Rollen erhöhen. Jedoch weisen Rollen fertigungsbedingt größere Toleranzen zueinander auf als Kugeln, was die erzielbaren Abrolleigenschaften verschlechtert. Wälzführungen eignen sich gut für den Einsatz in Vakuum, da weder ein Betriebsgas noch ein Schmiermittel benötigt wird.

4.2.1.3 Federgelenkführungen

Federgelenkführungen werden durch Präzisionsbearbeitung aus einem Körper als System mit Festkörpergelenken hergestellt [92]. Sie sind durch Stel-

len mit verminderter Biegesteifigkeit gekennzeichnet, die in der Regel durch eine lokale Querschnittsverringering erzeugt werden. Derartige Führungen zeichnen sich durch Spiel- und Reibungsfreiheit aus. Sie funktionieren ohne weitere Wartung oder Schmierung und sind verschleißfrei, sofern kein Ermüdungsbruch auftritt. Federgelenkführungen werden zur Realisierung sehr geradliniger Bewegungen mit Stellbereichen $< 100 \mu\text{m}$ eingesetzt [143], meist in Verbindung mit Piezoaktoren. Entsprechend einer charakteristischen Federkennlinie steigt mit zunehmender Federauslenkung die erforderliche Antriebskraft proportional zur Federkonstante c an.

In der Nanopositioniertechnik finden Federgelenkführungen Anwendung bei aktiven Mikrotastsystemen [51, 233] oder Kleinstellpositioniersystemen [45, 53, 239]. Sie eignen sich jedoch nicht für große Bewegungsbereiche, was den Einsatz in der NPMM-200 ausschließt.

4.2.1.4 Magnetische Führungen

Magnetische Führungen arbeiten ähnlich wie aerostatische Führungen verschleißfrei und ohne Stick-Slip-Effekte, da Gestell und Läufer völlig voneinander getrennt sind. Die notwendige Kraft wird durch einen Magnetkreis erzeugt. Die Magnetkraft muss die Gewichtskraft des Läufers zur Trennung vom Gestell kompensieren, um den Schwebezustand zu erreichen [157]. Sie kann entweder direkt durch Erzeugung eines Luftspalts zwischen Dauermagneten [238] oder durch Festhalten einer magnetischen Flüssigkeit im Luftspalt und der damit verbundenen Auftriebskraft [116] erzeugt werden. Die seitliche Führungsfunktion zur Erzeugung einer linearen Bewegung wird durch Lorentzkräfte oder Reluktanzkräfte realisiert, wobei die Führungskräfte von den eingespeisten Strömen abhängen [223]. Magnetische Führungen können nur in Kombination mit elektromagnetischen Direktantrieben eingesetzt werden [238]. Eine permanente Regelung der Position ist deshalb erforderlich [46, 57, 305, 307]. Ein großer Nachteil von Magnetführungen ist die prinzipbedingte geringe Steifigkeit, die noch geringer als bei aerostatischen Führungen ist und die dazu führt, dass Magnetführungen zu Schwingungen neigen [197, 263]. Darüber hinaus ist die Komplexität groß, da zusätzliche Positionsensorik, Regler und Leistungsstellelemente zur Stabilisierung erforderlich sind [238]. In der Nanopositioniertechnik sind verschiedene Anwendungen bekannt. Unter anderem kommen in der *Sub-Atomic Measuring Machine* Ma-

gnetführungen zum Einsatz [211, 307]. Im SFB 622 werden ebenfalls Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten von Magnetführungen durchgeführt [44, 241, 304]. Darüber hinaus werden sie in zahlreichen Forschungsprojekten zu Nanopositioniersystemen mit einer oder mehreren Bewegungsachsen eingesetzt [149, 163, 197, 198, 303].

4.2.2 Realisierung in der NPMM-200

Entsprechend der Betrachtungen in Abschnitt 4.2.1 werden nur Wälzkörperführungen mit Kugeln (siehe Abschnitt 4.2.1.2) allen an die NPMM-200 gestellten Anforderungen gerecht, wenn man insbesondere den Einsatz im Vakuum bedenkt. Unter dieser Randbedingung kommt aufgrund der Vorbetrachtungen entweder eine Anordnung mit Seriellkinematik oder eine gemischte Anordnung mit parallelisierten, lateralen Bewegungsachsen und aufgesetzter vertikaler Bewegungsachse in Frage.

Im Teilprojekt „Nanokonstruktion“ des SFB 622 wurden die theoretischen Grundlagen planarer Wälzführungen und deren Eignung für den Einsatz in NPMMs erforscht [111, 113, 114]. Eine planare Wälzführung für die lateralen Bewegungsachsen der NPMM-200 hat mehrere Vorteile gegenüber einer seriellen Anordnung. Zum einen ist die Bauhöhe deutlich geringer, zum anderen ermöglichen sie einen zusätzlichen Freiheitsgrad (Rotation um die z-Achse). Außerdem konnte in [250] gezeigt werden, dass ein planar geführter Läufer für die NPMM-200 ca. 25 % leichter ist als eine vergleichbare serielle Führungsanordnung. Allerdings waren zum Zeitpunkt der Konstruktion der NPMM-200 die Grundlagenforschungen noch nicht so weit voran geschritten [110, 112]. Deshalb basierten viele theoretische und experimentelle Voruntersuchungen hinsichtlich Regelungssystem, geeigneter Aktoren usw. auf dem seriellen Führungskonzept. Darüber hinaus war auch der zweiachsige Demonstrator für die NPMM-200 der im Teilprojekt „Modularer Entwurf modellbasierter Regelungen“ des SFB 622 aufgebaut wurde [8], mit serieller kinematischer Anordnung und 200 mm Verfahrweg je Achse ausgestattet. Aus diesen Gründen wurde sich für das Führungssystem der NPMM-200 auf eine serielle Anordnung festgelegt. Die konkrete Umsetzung ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt.

Das Führungssystem ist mechanisch vom metrologischen Rahmen vollständig entkoppelt, denn die Führungen für die x-Richtung werden auf der Geräte-

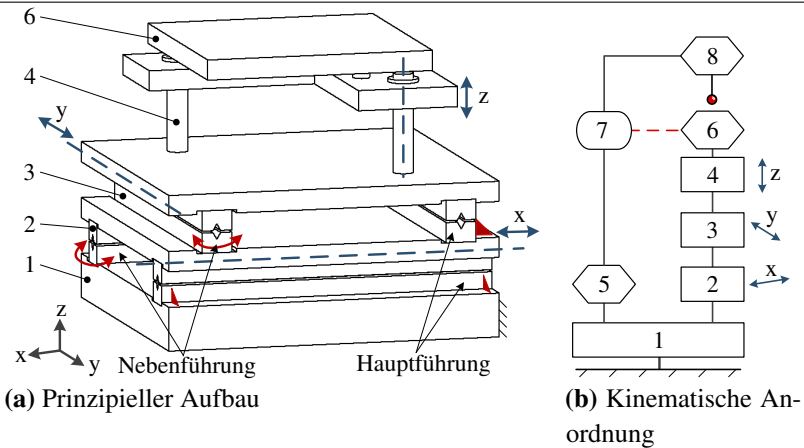


Abbildung 4.2: Serielles Führungskonzept der NPM-200: 1 Gerätebasis, Führungen der Achsen 2 x, 3 y und 4 z, 5 metrologischer Rahmen, 6 Spiegelplatte, 7 Messsysteme, 8 Antastsystem

basis auf separaten Funktionsflächen befestigt. Der Läufer der Führung für die x-Bewegung wird aufgesetzt. Er trägt wiederum die Führungssysteme für die Achsen y und z. Allen drei Führungsachsen ist gemeinsam, dass das Wandern der Wälzkörperkäfige durch mechanische Anschläge begrenzt wird. Die Längenverhältnisse zwischen Führungsschienen und Wälzkörperkäfigen sind so dimensioniert, dass Ein- und Auslaufen der Wälzkörper vermieden werden. Die Konstruktion der Stellplattformen von den einzelnen Bewegungsachsen erfolgte unter der Maßgabe, eine möglichst geringe bewegte Masse bei gleichzeitig hohen Eigenfrequenzen zu realisieren. Zur Optimierung der Topologie und der Steifigkeit wurden FEM-Simulationen eingesetzt. Im Folgenden steht nicht die Beschreibung der konstruktiven Ausführung im Fokus, sondern Betrachtungen zu den ausgewählten Führungen und Untersuchungen zu deren Eigenschaften.

4.2.2.1 Laterale Bewegungsachsen

Für die Führungen der Achsen x und y werden lineare Profilschienenführungen eingesetzt, die vertikal entsprechend Abbildung 4.2 angeordnet und somit

nur durch die Gewichtskraft der Läufer vorgespannt sind. Relative Schwankungen dieser Vorspannung werden ausschließlich durch variierende Messobjektmassen hervorgerufen und betragen dementsprechend maximal 25 N, da die maximal zulässige Messobjektmasse auf 2,5 kg festgelegt wurde. Die x- und y-Führungsebenen weisen durch diese Anordnung einen konstruktiv bedingten vertikalen Abstand von 39 mm auf. Die Profilschienenführungen der beiden Ebenen sind orthogonal zueinander ausgerichtet und definieren die Koordinatenachsen der NPMM-200. Deshalb ist es erforderlich, während der Montage eine präzise Winkelausrichtung um die z-Achse vorzunehmen. Aufgrund der Führungsbreite $b = 450$ mm erfolgt dies über die Realisierung des konstruktiven Prinzips von Haupt- und Nebenführung [156]. Die Hauptführung jeder Führungsebene wird gegen eine mit hoher Präzision gefertigte Bezugsfläche geschoben und arretiert. Die Orthogonalität der Hauptführungen beider Führungsebenen wird dementsprechend durch die Fertigungstoleranzen dieser Endanschlüsse vorgegeben (Abbildung 4.2). Da jedoch auch die Profilschienenführungen einer Führungsebene geometrisch betrachtet überbestimmt sind, müssen sie zueinander ausgerichtet werden, um Zwangskräfte zu minimieren. Dazu wird die Nebenführung relativ zur Hauptführung so ausgerichtet, dass ein minimaler Bewegungswiderstand beim Verschieben der aufgesetzten Stellplattform auftritt. Dann liegen Haupt- und Nebenführung annähernd parallel zueinander.

Die Führungspaare beider Seiten werden vom Hersteller in einer Spezialanfertigung höhenabgestimmt mit einer maximalen Toleranz von $\Delta h = h_1 - h_2 = \pm 0,01$ mm geliefert. Die Auflageflächen der Profilschienenführungen sind ebenfalls mit einer Toleranz von $\Delta a = \pm 0,01$ mm zueinander spezifiziert. Somit ergeben sich im ungünstigsten Fall 0,04 mm Höhendifferenz zwischen den beiden Führungspaaren (Abbildung 4.3). Daraus resultieren maximal mögliche Verkippungen der Stellplattformen aufgrund der Fertigungstoleranzen von 18,3'' um die x-Achse bzw. 36,6'' um die y-Achse.

Mögliche Winkelabweichungen um die z-Achse ergeben sich aus dem Spiel der Wälzkörper aufgrund von Fertigungstoleranzen. Diese Winkelabweichungen werden vom Hersteller mit $< 0,15''$ angegeben [248]. Außerdem stellt die minimale Führungslänge einen wichtigen Einflussfaktor dar. Sie wird bei der NPMM-200 dadurch sichergestellt, dass ein längerer Wälzkörperkäfing mit mehr Kugeln als erforderlich eingesetzt wird. Die mittleren zehn Wälzkörper werden entfernt, da sie zur Gewährleistung der Tragfähigkeit

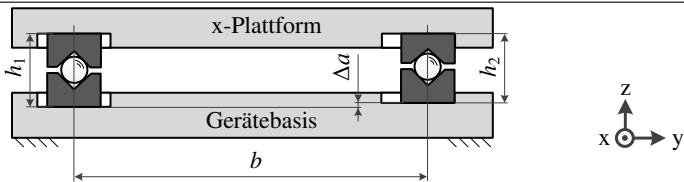


Abbildung 4.3: Höhentoleranz zwischen den Profilschienenführungen am Beispiel der x-Achse

nicht benötigt werden. Auf diese Weise wird eine minimale Führungslänge von 99 mm erzielt, die zu einer signifikanten Reduzierung des Führungsspiels bezogen auf Rotationen um die z -Achse führt.

Darüber hinaus können weitere Führungsabweichungen aus der elastischen Deformation der Wälzkörper resultieren. Diese hängen von der Masse der bewegten Plattformen und dem eingesetzten Wälzkörperwerkstoff ab. Für die Inbetriebnahme und die ersten grundlegenden Untersuchungen wurden vom Hersteller mitgelieferte Wälzkörper aus Wälzlagerstahl (1.3505) eingesetzt. Sie weisen elastische Deformationen von ca. $4 \mu\text{m}$ (je Führungsebene) auf [248]. Theoretische Betrachtungen haben ergeben, dass das gesamte Positioniersystem dann eine Steifigkeit von etwa 420 MPa besitzt. Als Wälzkörperkäfige wurden vom Hersteller empfohlene Käfige aus Edelstahl (1.4301) verwendet.

In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt „Modularer Entwurf modellbasierter Regelungen“ des SFB 622 durchgeführte Reibkraftuntersuchungen auf einem Reibungsprüfstand haben jedoch gezeigt, dass es geeignetere Materialkombinationen für Wälzkörper und Wälzkörperkäfige gibt [19]. Es wurden verschiedene Kombinationen von Wälzkörperwerkstoffen und Werkstoffen für Wälzkörperkäfigen sowie darüber hinaus auch der Einfluss der Schmierung untersucht. Abbildung 4.4 zeigt die Resultate beispielhaft für langsame Bewegungen mit einer Geschwindigkeit $v = 1 \mu\text{m/s}$.

Es konnte festgestellt werden, dass der Werkstoff des Wälzkörperkäfigs einen größeren Einfluss auf die Reibkraft hat als der Wälzkörperwerkstoff. Deshalb wurden im Rahmen dieser Dissertation Wälzkörperkäfige aus PTFE konstruiert, wobei die verschiedensten, im Teilprojekt „Nanokonstruktion“ des SFB 622 erarbeiteten konstruktiven Aspekte hinsichtlich der Gestaltung [160] berücksichtigt wurden. Abbildung 4.4 zeigt, dass durch den Austausch

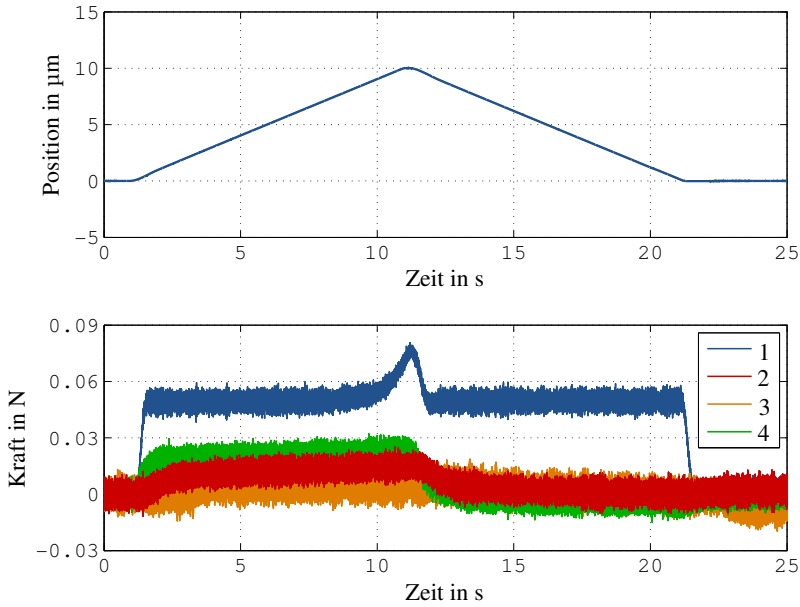


Abbildung 4.4: Reibkraftuntersuchungen bei $v = 1 \mu\text{m/s}$ verschiedener Wälzkörper-Käfig-Kombinationen ohne Schmierung (Wälzkörperwerkstoff zuerst genannt, gefolgt vom Werkstoff des Wälzkörperkäfigs) [321]: 1 Stahl – Messing, 2 Stahl – PTFE, 3 Rubin (Al_2O_3) – PTFE, 4 Siliziumnitrid (SiNi) – PTFE

des Wälzkörperkäfigs aus Messing mit dem aus PTFE unter Beibehaltung der Wälzkörper aus Stahl die Reibkraft signifikant reduziert werden kann.

In Abbildung 4.5 werden Reibkraftuntersuchungen mit Wälzkörperkäfigen aus PTFE bei Variation des Wälzkörperwerkstoffs und des Schmierzustands dargestellt. Als Schmierstoff wurde das vakuumtaugliche Fett Ultratherm 2000 [175] eingesetzt. Bei den Messungen wurde festgestellt, dass Rubin und SiNi nahezu gleiche Reibeigenschaften ohne Schmierung aufweisen. Mit Schmierung werden die Reibkräfte geringfügig erhöht.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden nach dem Abschluss der ersten Tests mit der NPMM-200 die Wälzkörper aus Stahl durch welche aus SiNi ersetzt. Wälzkörper aus SiNi haben zwar eine um den Faktor 1,23 geringere Trag-

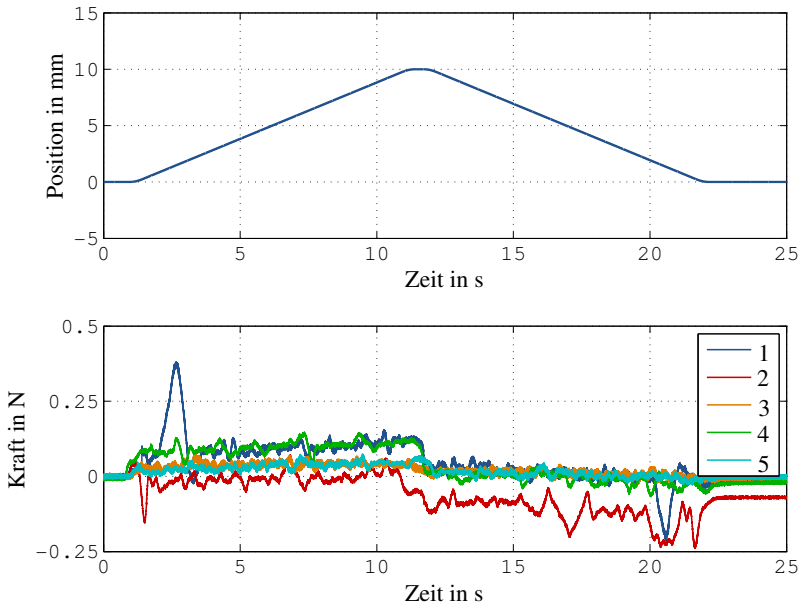


Abbildung 4.5: Reibkraftuntersuchungen mit Wälzkörperkäfig aus PTFE bei $v = 1 \text{ mm/s}$ mit verschiedenen Wälzkörperwerkstoffen ohne und mit Schmierung [321]: 1 Stahl ohne Schmierung, Rubin 2 mit und 3 ohne Schmierung, SiNi 4 mit und 5 ohne Schmierung

zahl im Vergleich zu Stahl, besitzen jedoch nahezu gleiche elastische Deformationseigenschaften [110, 165, 206]. Um erhöhten Verschleiß und Abrieb zu vermeiden, wurden die Führungen geschmiert. Das hat den Vorteil, dass durch die Schmierung die Reibkräfte im Bewegungsverlauf konstanter sind. Allerdings sind sie im Vergleich zum ungeschmierten Zustand leicht erhöht.

Das Stick-Slip-Verhalten ist beim Einsatz von Wälzkörperführungen in der Nanopositioniertechnik generell ein kritisches Problem. Es äußert sich besonders bei Stellwegen von wenigen Nanometern. Um es zu minimieren, wurde das Positioniersystem der NPMM-200 so dimensioniert, dass ein vertikaler Offset zwischen der Antriebsebene und den Führungsebenen für die x- und y-Bewegungen (180,6 mm bzw. 141,6 mm) vorhanden ist. Durch die damit verbundene „endliche“ Steifigkeit des mechanischen Aufbaus wirken

die Antriebskräfte dieser Steifigkeit entgegen und bewirken resultierende Verschiebungen der Spiegelplatte in Nanometergrößenordnung. Dieses Verhalten wurde auch am zweiachsigen Demonstrator für die NPMM-200 beobachtet und kann mit theoretischen Modellen zur Reibkraftabschätzung und -kompensation abgebildet werden [13]. Reibkraftuntersuchungen im Teilprojekt „Tribologische Eigenschaften“ des SFB 622 an einer einzelnen Kugel und ohne Kugelkäfig konnten dieses Reibverhalten bisher nicht nachweisen [87]. Das bekräftigt die These, dass dieses Stick-Slip-Verhalten hauptsächlich durch die Kugelkäfige begründet wird und für Bewegungen im Nanometerbereich durch die Steifigkeit des mechanischen Aufbaus hinreichend kompensiert werden kann.

4.2.2.2 Vertikale Bewegungsachse

Zur Führung der vertikalen Bewegung werden zwei diagonal angeordnete Kugelbuchsenführungen eingesetzt (Abbildung 4.2a). Die Hülsen und die zylindrischen Führungsstangen sind vom Hersteller individuell an die Kugelkäfige angepasst, um das Führungsspiel zu reduzieren. Die Wälzkörper im Käfig sind auf dem Umfang in vertikaler Richtung nicht fluchtend sondern auf einer virtuellen Geraden mit einer Neigung von $1,5^\circ$ zur Führungsachse angeordnet. Dadurch wird eine statistische Lastverteilung erreicht und der Käfig dreht sich während der Bewegung leicht. Somit wird langfristig betrachtet der Bildung von Einlaufspuren auf den Führungsbolzen entgegen gewirkt.

Für die Kugelbuchsenführungen ist die Winkellage zu den Achsen x und y das entscheidende Justierkriterium, da sie möglichst rechtwinklig stehen müssen. Deshalb werden die beiden Wellen an einem monolithischen Bauteil gemeinsam angeschraubt. Die gegenüberliegenden Enden der Wellen werden in zwei individuell angepasste Führungshalter gepresst und so ausgerichtet, dass die z -Plattform mit möglichst wenig spürbarem Bewegungswiderstand auf und ab bewegt werden kann.

4.3 Antriebssystem

Das Antriebssystem zählt zu den aktiven mechanischen Komponenten des Positioniersystems und hat im Allgemeinen die Aufgabe, die Kraft zur Bewegung eines Körpers entlang einer vorgegebenen Bahn zu erzeugen. Ein An-

triebssystem setzt sich aus dem Aktor, der notwendigen Energieversorgung und eventuell einem Übertragungsgetriebe zusammen (vgl. Abbildung 4.1). Ein Aktor besteht grundsätzlich aus den ortsfesten Bauteilen (Stator, Primärteil) und den bewegten Bauteilen (Läufer, Sekundärteil).

In diesem Abschnitt werden zunächst verschiedene Antriebskonzepte (Abschnitt 4.3.1) und -arten (Abschnitt 4.3.2) vorgestellt, die sich für große Bewegungsbereiche (> 100 mm) mit einer Stellauflösung im Nanometerbereich eignen. Danach erfolgen Beschreibungen der realisierten Antriebe in der NPMM-200 (Abschnitt 4.3.3) und von Untersuchungen zur Temperierung der Antriebe (Abschnitt 4.3.4).

4.3.1 Konzepte für Antriebssysteme in der Nanopositioniertechnik

Zur Realisierung eines Antriebs mit großem Stellbereich und einer Positionierauflösung im Nanometerbereich unterscheidet man grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze. Eine Variante ist die Erzeugung einer langen Bewegung mit einem einzigen Antrieb, der eine Stellauflösung im Nanometerbereich besitzt. Der zweite Ansatz ist die Kombination aus einem Großstellantrieb für große Bewegungen mit Mikrometernauflösung und einem Kleinstellantrieb mit Nanometernauflösung bei einem maximalen Verfahrbereich < 1 mm. Zu den verschiedenen möglichen Anordnungen und Konzepten für die Kombination von Groß- und Kleinstellantrieben sind im Rahmen des SFB 622 im Teilprojekt „Nanokonstruktion“ umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Beim Aufbau zweier Demonstratoren wurde sich auf die vertikale Positionierung mit Groß- und Kleinstellantrieb beschränkt [88]. Mit Hilfe dieser Demonstratoren konnte das Konzept für ein kombiniertes Groß-/Kleinstellantriebssystem erfolgreich für Positionieraufgaben mit Nanometernauflösung umgesetzt werden. Jedoch ist noch eine konstruktive Optimierung der Demonstratoren nötig, um Positionieraufösungen im Subnanometerbereich erzielen zu können [88]. Außerdem finden derzeit weitere grundlegende Untersuchungen zur Erweiterung dieses Konzepts auf die lateralen Bewegungsrichtungen statt.

4.3.2 Überblick zu Linearantrieben

Die Vielzahl der Ausführungsformen von Antrieben wird im Folgenden nach dem zugrundeliegenden physikalischen Wirkprinzip geordnet.

4.3.2.1 Elektromagnetische Aktoren, basierend auf Lorentzkraft

Die Lorentzkraft wirkt auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld. Die Kraftwirkung tritt senkrecht zur Stromdichte und zu den Feldlinien des magnetischen Feldes auf, so dass die Wirkrichtung der Lorentzkraft vom Vorzeichen der magnetischen Flussdichte und der Stromdichte abhängig ist [102]. Dieser Effekt wird bei zahlreichen elektromagnetischen Antrieben genutzt. Man kann diese Antriebsgruppe in zwei Unterkategorien einteilen: elektromagnetische Rotationsaktoren mit Übertragungselementen und elektromagnetische Linearaktoren ohne Übertragungselemente.

Elektromagnetische Rotationsaktoren benötigen Übertragungselemente zur Erzeugung linearer Bewegungen. In der Literatur sind hierzu mannigfaltige Ausführungsvarianten und entsprechende Auswahlkriterien zu finden [30, 282]. Grundsätzlich wird zwischen Aktoren mit Kraftpaarung und Formpaarung unterschieden. In der Nanopositioniertechnik sind mehrere Nanopositioniersysteme mit Reibstangengetrieben, d. h. mit Kraftpaarung, als Versuchsmuster aufgebaut worden [207, 289, 291]. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Positionierreproduzierbarkeit über einen Verfahrbereich von 10 mm in der Größenordnung von 20 nm liegt [79]. Aus diesem Grund wird in [147] ein weiteres System vorgestellt, das einen Reibradaktor nur zur Grobpositionierung verwendet. In [290] wurden Untersuchungen zu Temperatureinflüssen durchgeführt, bei denen die in den Aktoren entstehende Abwärme eine thermische Drift von bis zu 100 nm verursacht hat. Aufgrund dieser Erfahrungen kommen elektromagnetische Rotationsaktoren mit Reibstangengetriebe für den Einsatz in der NPMM-200 nicht in Frage.

Elektromagnetische Rotationsaktoren mit Formpaarung hingegen setzen Gewinde- oder Kugelumlaufspindeln zur Übertragung ein. In der Nanopositioniertechnik sind Kugelumlaufspindeln zu bevorzugen, da ca. 90 % der Motorkraft als Antriebskraft genutzt werden kann [92]. Dadurch entsteht weniger Verlustwärme. Die Aktoren mit Gewinde- oder Kugelumlaufspindeln werden mit Kleinstantrieben, meist in Form von Piezoaktoren, kombiniert, um Positionsschritte im Nanometerbereich zu ermöglichen. Das erfordert ein

entsprechendes gekoppeltes Regelungskonzept, welches die kombinierte Bewegung beider Aktoren berücksichtigt [171]. Ein Nachteil dieser elektromagnetischen Rotationsaktoren ist, dass keine hohen Verfahrensgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Positionierauflösung möglich sind, so dass sie für den Einsatz in der NPMM-200 ebenfalls als weniger geeignet erscheinen.

Elektromagnetische Linearaktoren, oft auch als elektromagnetische Direktantriebe bezeichnet, benötigen keine Übertragungselemente und eignen sich daher für die Nanopositioniertechnik in besonderem Maße. Die erzeugte Aktorkraft ist proportional zum Antriebsstrom. Die erreichbare Positionierauflösung wird nicht durch das Wirkprinzip oder Übertragungselemente begrenzt [200, 294]. Da die Aktorbewegung ohne mechanische Umsetzung der Bewegungsrichtung erfolgt, eignen sie sich für Anwendungen, die eine hochpräzise dynamische und zugleich reibungsarme Positionierung erfordern. Elektromagnetische Linearaktoren sind jedoch nicht selbsthemmend, d. h. es ist eine permanente Positionsregelung erforderlich. Eine übliche Ausführungsform elektromagnetischer Linearaktoren sind sogenannte *Tauchspulaktoren*, die auch oft mit dem englischen Ausdruck *voice coil actuators* bezeichnet werden. Charakteristisch für diese Aktoren ist, dass sich die stromdurchflossene Spule im gesamten Bewegungsbereich im Magnetfeld der Permanentmagneten befindet, das sich durch eine konstante Magnetflussdichte und -richtung auszeichnet. Der Bewegungsbereich wird durch die Länge der Spule sowie des Permanentmagneten limitiert. Tauchspulaktoren existieren in zylindrischer Bauform für Bewegungsbereiche bis zu ca. 50 mm und in rechteckiger Bauform für größere Bewegungsbereiche bis zu etwa 100 mm [26]. Je größer der Bewegungsbereich ist, desto höher ist das Gewicht der Permanentmagneten. Folglich stellt das Gewicht eine Begrenzung für Anwendungen in der Nanopositioniertechnik dar, hier insbesondere beim Aufbau mehrachsiger Positioniersysteme mit Hilfe von Tauchspulaktoren [18].

Für Bewegungsbereiche von mehr als 100 mm eignen sich *elektromagnetische Linearaktoren mit Kommutierung*. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetflussrichtung entlang der Bewegungsachse wechselt, indem mehrere Permanentmagnete mit alternierender Flussrichtung auf einem oder mehreren Eisenrückschlüssen angeordnet werden [214]. Die einzelnen Spulen sind über bzw. unter den Magneten angeordnet und in der Größe dem Permanentmagnetabstand angepasst [258]. Man unterscheidet zwei- oder dreiphasige Aktoren, bei denen entweder zwei oder drei Spulen eingesetzt wer-

den. Durch die Bestromung der Spulen kann eine Position eingestellt werden, die wegen der periodischen Magnetanordnung von der Ausgangsposition abhängig ist [92]. Auf diese Weise lassen sich große Positionierwege von mehreren hundert Millimetern realisieren, wobei zur Nutzung des gesamten Bereiches eine zyklische Änderung der Spulenbestromung – eine sogenannte Kommutierung – erforderlich ist.

4.3.2.2 Elektromagnetische Aktoren, basierend auf Reluktanzkraft

Es existieren auch elektromagnetische Aktoren, welche die Reluktanzkraft nutzen, die in einem Magnetfeld auf Grenzflächen unterschiedlicher Permeabilität wirkt und z. B. zur Verringerung eines Luftspalts führt. Im Unterschied zur Lorentzkraft hat die Reluktanzkraft jedoch nur eine unidirektionale Wirkrichtung, und zwar in Richtung minimalen magnetischen Widerstands [102, 252]. Ein bekanntes Beispiel für elektromagnetische Aktoren mit Nutzung der Reluktanzkraft sind Schrittmotoren, die sowohl in rotorischer als auch linearer Bauform existieren [204]. Der Läufer besitzt mehrere Eisenkreise mit Teilungen gleicher Größe. Bei manchen Bauformen von Schrittmotoren sind im Läufer zusätzlich Permanentmagneten angeordnet, die einen dauerhaften magnetischen Fluss erzeugen. Der Stator besitzt mehrere elektrisch aktivierbare magnetische Pole, die ebenfalls eine gleichmäßige Teilung in Bewegungsrichtung aufweisen. Bei Bestromung eines Pols wird der Luftspalt zum nächstgelegenen Pol des Stators minimiert. Ein abwechselndes Aktivieren der Pole bewirkt eine schrittweise Bewegung des Läufers. Eine solche Verschiebung wird als Vollschritt bezeichnet. Durch Anpassung der Stromverteilung können auch Halb-, Viertel- oder Mikroschritte erzeugt werden [103]. Die Teilungsabmessungen limitieren aufgrund der prinzipbedingten Quantisierung der Bewegungsschritte die erzielbare Positionsauflösung. Derzeit sind keine Schrittmotoren bekannt, die Positionsaufösungen im Subnanometerbereich aufweisen. Aus diesem Grund sind sie im Hinblick auf die Anwendung in der NPMM-200 ungeeignet.

4.3.2.3 Piezoelektrische Aktoren

Piezoelektrische Aktoren basieren auf dem inversen piezoelektrischen Effekt, bei dem sich durch Anlegen eines elektrischen Feldes das piezoelektrische Material verformt. Auf diese Weise können relative Auslenkungen von bis

zu 0,2 % der Aktorlänge erreicht werden, wobei gleichzeitig Auflösungen im Subnanometerbereich möglich sind [222]. Im statischen Zustand wird keine Energiezufuhr benötigt, d. h. das Material behält seine Verformung bei. Piezoelektrische Aktoren sind in vielen verschiedenen Ausführungsformen kommerziell erhältlich. Sie finden Anwendung in zahlreichen NPMMs oder Präzisionspositioniertischen als Kleinstellantrieb in Kombination mit Großstellantrieben [70, 186, 286]. Darüber hinaus werden sie auch als Aktoren in aktiven Antastsystemen eingesetzt, bei denen kleine bewegte Massen vorherrschen und hohe Beschleunigungen gefordert werden [151, 283, 306]. Häufige Probleme beim Einsatz von Piezoaktoren sind Hysterese und Kriechen, die aufgrund von mikroskopischen, ferroelektrischen Polarisierungseffekten auftreten können [97]. Deshalb ist für Präzisionsanwendungen eine Positionsregelung mit Hilfe eines Messsystems erforderlich, um die Positionierabweichungen zu minimieren [308]. Um größere Stellwege mit piezoelektrischen Aktoren zu realisieren, sind zwei verschiedene Ansätze verbreitet. Eine Möglichkeit ist der Aufbau von Hebelkonstruktion [48, 49, 192]. Dadurch verschlechtert sich jedoch die Positionierauflösung. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung alternativer piezoelektrischer Aktoren (Trägheitsaktoren, Schreitaktoren und Oberflächenwellenaktoren), die durch Hubaddition sogar Bewegungen im Millimeterbereich ermöglichen, allerdings auch auf Kosten der Positionierauflösung [58, 67, 227]. In [215] wurden deren Einsatzmöglichkeiten für die Anwendung in der NMM-1 untersucht und mit elektromagnetischen Linearaktoren verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass die elektromagnetischen Direktantriebe bessere Positioniereigenschaften aufweisen.

4.3.3 Realisierung in der NPMM-200

Aufgrund des noch experimentellen Status und der mangelnden vorliegenden Erfahrung mit dem Konzept einer Kombination von Groß- und Kleinstellantrieben wurde sich bei der NPMM-200 für elektromagnetische Aktoren entschieden. Das Antriebskonzept ist schematisch in Abbildung 4.6 dargestellt.

4.3.3.1 Antriebe für die laterale Bewegung

Für die laterale Bewegung werden aufgrund des Bewegungsbereiches von 200 mm elektromagnetische, kommutierte Linearmotoren mit zwei Phasen

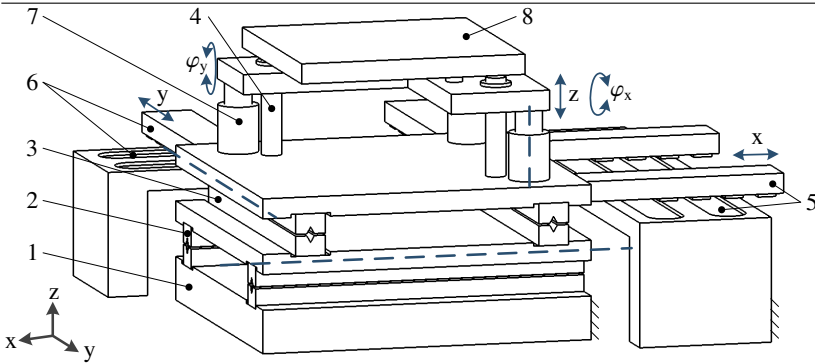


Abbildung 4.6: Antriebskonzept der NPMM-200: 1 Gerätebasis, Führungen der Achsen 2 x, 3 y und 4 z, Aktoren der Achsen 5 x, 6 y und 7 z, 8 Spiegelplatte

eingesetzt. Da keine kommerziell verfügbaren Aktoren die geforderten technischen Parameter und Vakuumtauglichkeit aufweisen, wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gGmbH (IMMS) geeignete Aktoren entwickelt. Die Aktoren für die Achsen x und y sind seitlich außerhalb des Messvolumens angeordnet. Das hat den großen Vorteil, dass die Abwärme der Aktoren keine lokalen thermischen Einflüsse auf das Positioniersystem und die Messstrahlen der Interferometer erzeugt.

Eine Bewegungsachse wird von zwei Spulenbaugruppen und dementsprechend zwei Permanentmagnetreihen angetrieben. Eine Permanentmagnetreihe besteht aus vier Eisenrückschlüssen mit jeweils zwei einzelnen Magneten. Durch den Einsatz zweier Magnetreihen mit einem konstruktiven Abstand von 333 mm ergeben sich folgende Vorteile: einerseits kann dadurch eine höhere Antriebskraft erzeugt und somit mehr Masse bewegt werden. Andererseits kann über die differentielle Bestromung der Magnetreihen eine Winkelregelung um die z-Achse realisiert werden.

Im Entwurfsprozess wurden verschiedene Magnetkrisanordnungen verglichen [243]. Grundsätzlich können entweder die Spulen oder die Permanentmagneten am Gestell, d. h. am Stator, fixiert werden. Wenn man die Magnete am Gestell fixiert, reduziert sich die bewegte Masse deutlich. Allerdings

müssen dann elektrische Anschlussleitungen und Kühlmittelleitungen zu den bewegten Spulen geführt werden. Dies ist mit größerem technischen Aufwand verbunden und hat insbesondere den Nachteil, dass Kabel mit größerem Querschnitt und somit höherer Steifigkeit eingesetzt werden müssen, da durch die Spulen Dauerströme von bis zu 3 A fließen. Deshalb wurde sich bei der NPM-200 dafür entschieden, die Spulen gestellfest anzuordnen und die Permanentmagneten am bewegten Läufer mitzuführen. Auf Basis dieser Festlegung sind verschiedene Anordnungen für die Permanentmagneten möglich (Abbildung 4.7).

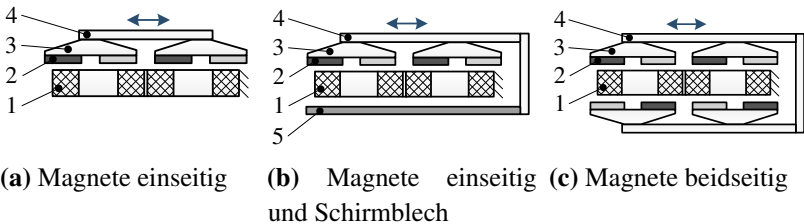


Abbildung 4.7: Magnetkreisarrangements bei gestellfesten Spulen (1): 2 Permanentmagnete, 3 Eisenrückschluss, 4 Magnetbrückenträger aus Aluminium, 5 Schirmblech aus Eisen

Die Anordnung mit Magnetreihen auf einer Seite (oberhalb oder unterhalb) der Spulen (Abbildung 4.7a) ist die günstigste Anordnung hinsichtlich geringer bewegter Massen. Allerdings hat sie den Nachteil, dass der Magnetkreis nicht definiert geschlossen ist und deshalb von den Magneten, die sich nicht im Überdeckungsbereich der Spule befinden, Kräfte auf in der Umgebung befindliche magnetische Bauteile ausgeübt werden können. Bei Anordnung der Magneten oberhalb der Spulen sind die ausgewählten Profilschienenführungen diesbezüglich als kritische Bauteile zu nennen, da sie meist vom Hersteller aus ferromagnetischem Stahl geliefert werden. Eine Spezialausführung aus diamagnetischem Stahl ist erhältlich, jedoch nicht in der erforderlichen Führungsqualität. Deshalb können sogenannte Rastkräfte durch die Führungsschienen parallel und senkrecht zur Längsrichtung der Magneten auftreten. Abschätzungen haben ergeben, dass diese Rastkräfte unterhalb von 0,5 N je Bewegungsachse liegen und deshalb durch die Regelung gut kompensiert werden können [243]. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist es ungünstig, die

Magneten unterhalb der Spulen anzuordnen, da dann beim Messobjektwechsel oder Justagearbeiten magnetische Gegenstände (z. B. Justagewerkzeuge) angezogen werden können.

Abbildung 4.7b zeigt eine weitere Variante, bei der sich ein Schirmblech aus Eisen unterhalb jeder Magnetreihe befindet. Das hat zur Folge, dass die Motorkonstante der Aktoren erhöht und damit die Energieaufnahme bei gleichbleibender Bestromung reduziert wird. Das Schirmblech muss dann ebenfalls mitbewegt werden. Es wurden verschiedene Blechstärken und Luftspaltbreiten zwischen Spule und Schirmblech simuliert [243]. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass durch magnetischen Rückschluss im günstigsten Fall eine um ca. 8 % höhere Aktorkraft generiert werden kann. Diese höhere Aktorkraft kann jedoch nicht genutzt werden, da sie für die Bewegung der Schirmbleche mit einer zusätzlichen Masse von ca. 3,5 kg benötigt wird.

Eine dritte untersuchte Variante ist die symmetrische Anordnung von Magnetreihen auf beiden Seiten der Spulen (Abbildung 4.7c). Diese wird in der Literatur auch als U-Anordnung bezeichnet [144]. Wesentliche Vorteile sind, dass der Magnetkreis bestmöglich geschlossen wird, die Feldlinien gut gerichtet sind und in der Umgebung des Aktors der magnetische Fluss gering ist [282]. Simulationen des Magnetfelds haben dies bestätigt und gezeigt, dass bei beidseitiger Anordnung eine um 16 % höhere Aktorkraft bei gleicher Bestromung der Spulen im Vergleich zur einseitigen Anordnung der Magnetreihen erzielt werden kann [243]. Trotz der hohen Massen der Eisenrückschlüsse und der Magneten, die vom Antriebssystem bewegt werden müssen, reduziert sich damit die Verlustleistung des Antriebssystems um etwa 25 % [243]. Deshalb wurde sich zur Realisierung dieser Ausführungsvariante für die NPMM-200 entschieden.

Die Spulenbaugruppen wurden vom Projektpartner IMMS für den Einsatz im Grobvakuum neu entwickelt. Da die ohmschen Verluste in den Spulenwicklungen zu einer Erwärmung der gesamten Spulenbaugruppe führen, und dadurch unerwünschte lokale Erwärmungen in der Nähe liegender Bauteile auftreten und thermische Spannungen sowie lokale Deformationen eingebracht werden, sollen diese so gering wie möglich gehalten werden. Die Reduktion der lokalen thermischen Einflüsse erfolgt im Hinblick auf die Anwendung im Grobvakuum und die damit sehr geringe thermische Konvektion mit einer aktiven Wasserkühlung der Aktorspulen [31]. Zur Erhöhung der Kühlfläche und damit der Effektivität der Kühlung wurden in Anlehnung an [52]

Kühlelemente in Form von dünnen Kühlblechen entwickelt, die beidseitig auf die Aktorspulen aufgebracht werden. Die Realisierung einer solchen aktiv gekühlten Spulenbaugruppe der NPMM-200 ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

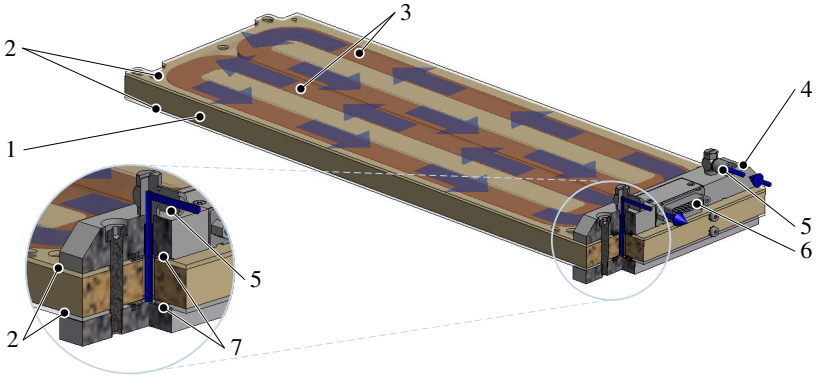


Abbildung 4.8: x- bzw. y-Spulenbaugruppe mit 1 Rahmen aus Aluminium, 2 Kühlkörper, 3 Aktorspulen, 4 Anschlussblock für 5 Kühlmittelzuführung und 6 elektrische Kontaktierung, 7 Dichtungsringe

Eine Spulenbaugruppe besitzt einen Aluminiumrahmen, in dem die zwei Aktorspulen vergossen sind. Von oben und unten werden die Kühlkörper stoffschlüssig aufgebracht. Ein solcher Kühlkörper besteht aus drei einzelnen Kühlblechen, wobei die Dicke des gesamten Kühlkörpers nur ca. 1,6 mm beträgt, um das erzeugte Magnetfeld der Aktorspulen nicht zu sehr abzuschwächen. In das mittlere Kühlblech werden die Kühlkanäle mittels Laserschneiden eingebracht. Das obere und untere Blech werden dann mit dem mittleren Blech mit Hilfe thermischer Fügeprozesse verbunden. Der Verlauf der Kühlkanäle wurde so gewählt, dass sie möglichst über den Spulenwicklungen angeordnet sind, um eine optimale Wärmeleitung zum Temperiermedium zu erreichen. Ziel ist es, dass sich an den Außenflächen einer Spulenbaugruppe eine möglichst homogene Temperaturverteilung einstellt. Eine große Herausforderung beim Fertigungsprozess besteht darin, dass die Bleche aufgrund der beim Fügen eingebrachten Wärme zu Deformationen neigen. Der Luftspalt beträgt konstruktiv 0,5 mm. Die Durchbiegung der Kühlkörper muss demzufolge weniger als 0,1 mm (entspricht 20 % der Luftspaltbreite) über die gesamte Länge betragen. Änderungen der Luftspaltbreite bewirken Schwankun-

gen der Motorkonstante. Am Rand jeder Spulenbaugruppe ist außerhalb des Verfahrbereichs ein Anschlussblock mit Anschlüssen für die Kühlmittelzuleitungen und die elektrische Kontaktierung aufgeschraubt. Er hat außerdem die Funktion, oberes und unteres Kühlblech für die Kühlmittelzuführung zu verbinden. Zur Temperaturüberwachung der einzelnen Spulenbaugruppen in der Ablaufsteuerung der NPMM-200 wurden Pt 100 in den Anschlussblock jeder Baugruppe integriert. Aufgrund der gestellfesten Anordnung sind keine Kühlmittelzuleitungen zu bewegten Teilen erforderlich.

Die Motorkonstante einer Spulenbaugruppe beträgt $8,9 \text{ N/A}$, so dass für eine Bewegungsachse insgesamt eine Kraft von $17,8 \text{ N/A}$ zur Beschleunigung der bewegten Masse zur Verfügung steht. Zur Ansteuerung der zwei Spulen werden zwei Stromphasen benötigt, die sich in regelmäßigen Intervallen des Verfahrbereichs wiederholen. Die Stromphasen werden mit Hilfe von sogenannten Kommutierungsfunktionen angesteuert, die das Verhältnis der Spulenströme einer Baugruppe zueinander festlegen. Das Intervall, nachdem sich die Kommutierungsfunktionen wiederholen, wird auch als Teilungsperiode t bezeichnet und wird von den Abmessungen der Magneten, den Abständen dieser zueinander und den Spulenbreiten bestimmt [242]. Bei den Aktoren für die NPMM-200 beträgt $t = 76 \text{ mm}$.

Als Kommutierungsfunktionen können ideale Sinus- und Cosinus-Funktionen verwendet werden. Als Alternative können auch tabellarisch hinterlegte Funktionen gewählt werden, welche die aus den Magnetfeldberechnungen ermittelten Abweichungen zu Sinus- und Cosinus-Funktionen berücksichtigen. Numerische Abweichungen können durch eine Mittelung der Kennlinie vermieden werden. In Abbildung 4.9 ist die zu erwartende Abweichung auf die Konstanz der Aktorkraft für beide Varianten gegenübergestellt [127]. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass sowohl für die rechte als auch für die linke Spule einer Bewegungsachse identische Werte für die Kommutierung angesetzt werden, welche in einer festen Phasenbeziehung zueinander stehen. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die maximalen Schwankungen der Aktorkraft entlang des Fahrweges bei Verwendung der reinen Sinus-Cosinus-Kommutierung bei ca. 1 % liegen. Durch die Verwendung einer tabellarisch hinterlegten Kommutierungsfunktion reduzieren sich diese Abweichungen auf etwa 0,6 %. Da die realen Abweichungen der Aktorkraft im Gesamtsystem der NPMM-200 zusätzlich durch Toleranzen in den Magnetkennwerten und durch andere magnetische Bauteile in

Antriebsnähe beeinflusst werden, wurde sich für die Umsetzung einer idealen Sinus-Cosinus-Kommutierungsfunktion entschieden. Diese stellt eine sehr gute Annäherung der Kommutierung dar und ist im CS hinsichtlich der minimal benötigten Berechnungsdauer günstiger zu implementieren.

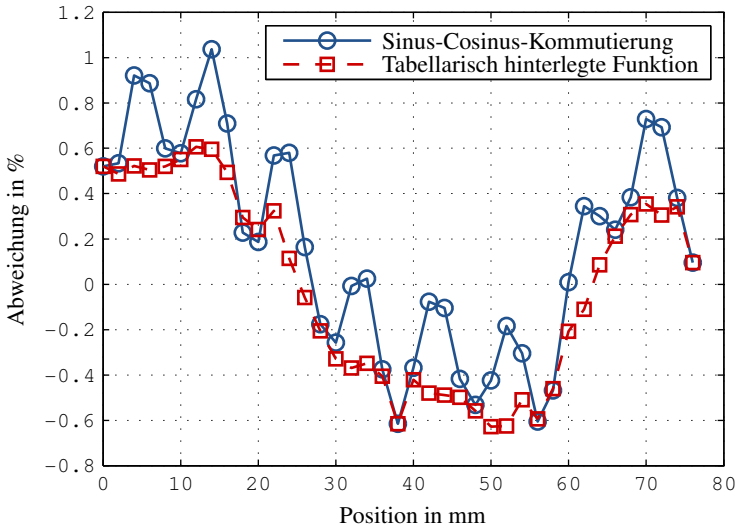


Abbildung 4.9: Prozentuale Abweichung der Aktorkraft in einer Kommutierungsperiode [127]

4.3.3.2 Antriebe für die vertikale Bewegung

Als Aktoren für die vertikale Bewegung werden drei kommerzielle zylindrische Tauchspulaktoren vom Typ LA25-42-000A der Firma *BEI Kimco Magnetics* eingesetzt [27]. Sie besitzen eine Motorkonstante von je 21,35 N/A und ermöglichen somit eine höhere Beschleunigung als in lateraler Richtung, was zur Erhöhung der Messdynamik beiträgt. Aufgrund der Anwendung im Grobvakuum wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner IMMS auch eine Wasserkühlung für diese Aktoren entwickelt (Abbildung 4.10). Das Primärteil wird auf einen vom Medium durchströmten Kühlkörper aufgeschraubt. Der Grundkörper, auf den die Aktorspulen aufgewickelt sind, gewährleistet eine gute Wärmeleitung zum Kühlkörper.

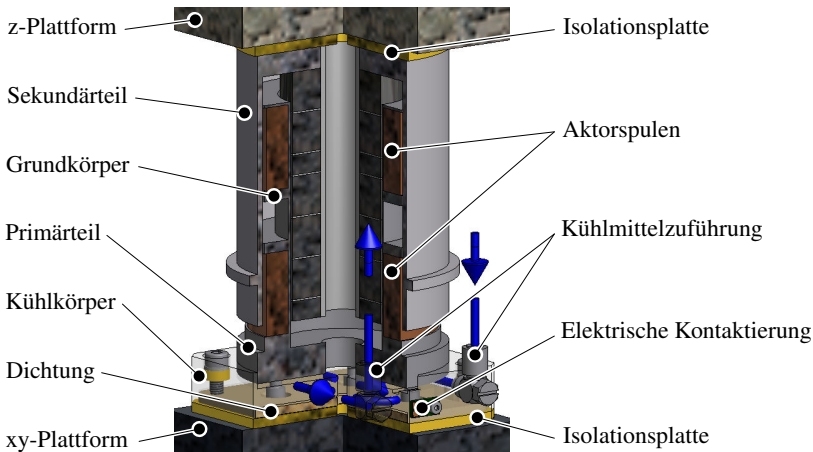


Abbildung 4.10: z-Aktorbaugruppe der NPM-200

Die Kühlmittleitungen üben in Abhängigkeit vom Biegeradius während der Verfahrbewegung eine parasitäre Kraft auf den bewegten Läufer aus. Dieser Einfluss ist nicht systematisch und stellt eine unerwünschte Störgröße für die Positions- und Winkelregelung dar. Deshalb wird das Primärteil des Aktors gemeinsam mit dem Kühlkörper auf der y-Stellplattform angeordnet. Als Konsequenz dessen werden die Zu- und Abführungen des Kühlmediums nur in lateraler Richtung mitbewegt. Das hat den Vorteil, dass deutlich größere Biegeradien realisiert werden können. Die Sekundärteile der Aktoren werden gemeinsam mit der z-Stellplattform in vertikaler Richtung bewegt. Die Masse der Permanentmagnete wird von der GKK kompensiert. Um eine lokale Erwärmung der Stellplattformen zu minimieren, werden die Kühlkörper und die Sekundärteile durch Zwischenplatten aus Zirkoniumdioxid-Keramik (ZrO_2) thermisch gegenüber den Anschraubflächen isoliert.

4.3.4 Untersuchung der Temperierung

Die Wirksamkeit der Temperierung wurde vom Projektpartner IMMS in separaten Versuchsaufbauten untersucht. Für die Spulenbaugruppen der lateralen Antriebe erfolgten Untersuchungen zur Temperaturverteilung an der Spulenoberfläche mit Hilfe einer Thermografiekamera. Hierzu wurden die Spulen

mit verschiedenen Strömen beaufschlagt. Es wurden Vergleichsmessungen mit ein- und ausgeschalteter Kühlung durchgeführt. Abbildung 4.11 zeigt exemplarisch eine Dauermessung mit eingeschalteter Kühlung über einen Zeitraum von 60 Minuten unter Höchstbelastung der Spulenbaugruppe, d. h. bei einer Stromstärke $I = 3 \text{ A}$ und einer Verlustleistung von 45 W , anhand der die Effektivität der Kühlung bewertet werden kann.

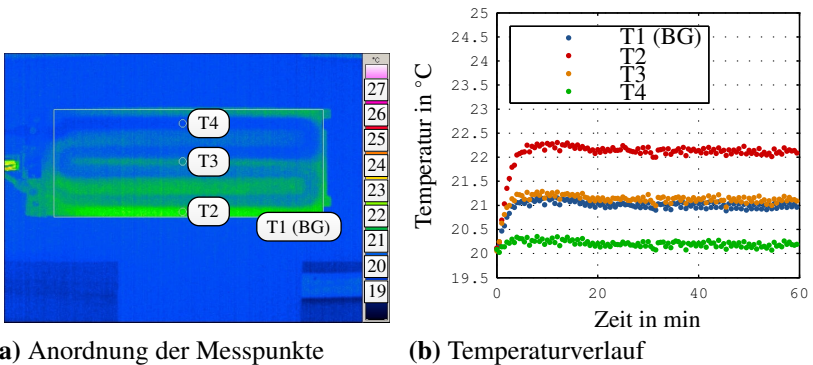


Abbildung 4.11: Untersuchung der Effektivität der Temperierung der x-/y-Aktoren bei $I = 3 \text{ A}$ [104]

An vier Messpunkten (T1 bis T4) wurden die Temperaturmesswerte gespeichert. Diese vier Messpunkte sind auf der Oberfläche der Spulenbaugruppe verteilt (Abbildung 4.11a). Der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abbildung 4.11b dargestellt. Ein Ergebnis der Untersuchung ist, dass sich die gesamte Spulenbaugruppe im Mittel um etwa 1 K erwärmt und somit deutlich oberhalb der Referenztemperatur 20 °C liegt, wobei ein stationärer Zustand schon nach weniger als 5 Minuten erreicht ist. Vergleicht man die Randtemperatur der Spulenbaugruppe (T1 (BG)) und die Temperatur oberhalb einer Wicklung (T3 und T4), so sieht man, dass die Temperaturunterschiede an der Oberseite in der Größenordnung von etwa 2 K liegen [104]. Es ist jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen Spulenunter- und oberseite zu beobachten. Die Messung des Druckunterschieds zwischen Vorlauf und Rücklauf der Spulenbaugruppe hat einen Volumenstrom von ungefähr $0,4 \text{ l/min}$ ergeben. Ist die Kühlung abgeschaltet und erfolgt eine dauerhafte Bestromung mit $I = 3 \text{ A}$, wird bereits nach ca. 7 Minuten eine Temperatur

von bis zu 30 °C an der Spulenseite erreicht. Bezüglich der Temperaturüberwachung mit dem integrierten Pt 100 hat sich gezeigt, dass die von diesem Sensor gemessene Temperatur deutlich von derjenigen im Inneren der Spulenwicklung abweichen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Pt 100 in der Nähe des Vorlaufs aufgeklebt ist. Deshalb ist die Temperatur zur Sicherheitsabschaltung der Aktoren auf einen diesen Verhältnissen angepassten Wert herabgesetzt worden.

An den Aktorbaugruppen für die vertikale Bewegung wurden ähnliche Testreihen durchgeführt [168]. Es wurde jedoch nicht die maximal zulässige Stromstärke $I = 3 \text{ A}$, sondern eine Leistungsaufnahme von 1 W (entspricht $I = 0,64 \text{ A}$) als Last gewählt, da für diese Leistungsaufnahme FEM-Simulationen des thermischen Verhaltens vorliegen und diese mit den Messungen verifiziert werden können. Die Temperaturmessungen erfolgten nicht mit der Thermografiekamera sondern mit vier Pt 100 (Sensor 1 bis Sensor 4). Diese waren an unterschiedlichen Stellen angebracht. Ein Sensor wurde zur Messung der Temperatur im Zwischenraum zwischen Primär- und Sekundärteil platziert (Sensor 1). Ein weiterer war oben auf dem Sekundärteil aufgeklebt, da dies die Schnittstelle zur z-Plattform ist (Sensor 2). Als dritter Temperatursensor wurde der Sensor im Kühlkörper verwendet (Sensor 3) und der vierte Sensor diente zur Aufzeichnung der Umgebungstemperatur (Sensor 4). Die Messergebnisse mit aus- und eingeschalteter Kühlung sind in Abbildung 4.12 für einen Zeitraum von ca. 2,5 h gegenüber gestellt [168].

In den Messungen mit ausgeschalteter Kühlung in Abbildung 4.12a ist zu erkennen, dass nach 2,5 h noch kein stationärer Zustand eingetreten ist. Die höchste gemessene Temperatur lieferte der Temperatursensor im Kühlkörper (Sensor 3), was die These bekräftigt, dass er wirksam zur Temperaturüberwachung der Antriebe eingesetzt werden kann. Nach den 2,5 h liegt die im Kühlkörper gemessene Temperatur etwas mehr als 3 K oberhalb der Umgebungstemperatur (Sensor 4). Bei den Messreihen mit eingeschalteter Temperierung wurde die Vorlaufemperatur gleich der Umgebungstemperatur zu Messbeginn gewählt. Abbildung 4.12b zeigt, dass die Kühlung des Primärteils zu einer Reduzierung der Übertemperatur im stationären Zustand von 3 K auf unter 1 K führt. Die Messwerte des Temperatursensors im Zwischenraum zwischen Primär- und Sekundärteil (Sensor 1) und des Sensors auf dem Sekundärteil (Sensor 2) weichen um 0,1 K voneinander ab. Das deutet auf einen vertikalen Temperaturgradienten im Aktor hin. Weiterhin ist deutlich

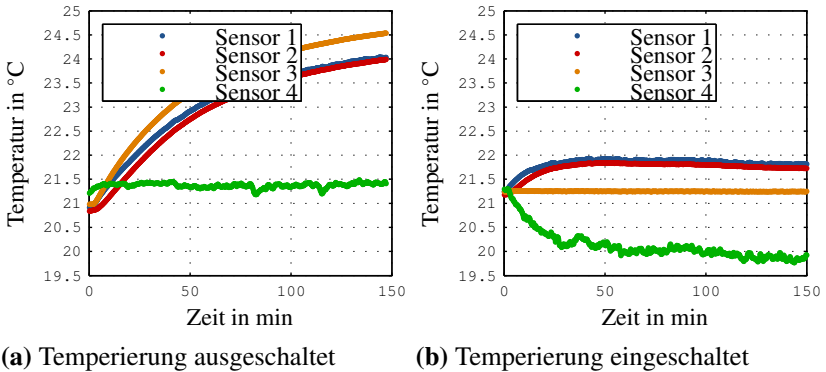


Abbildung 4.12: Untersuchung zur Effektivität der Temperierung der z-Aktoren bei $I = 0,64 \text{ A}$ [168]

zu erkennen, dass ein nahezu stationärer Temperaturzustand im Aktor schon nach knapp 30 min erreicht wird. Es fällt auf, dass sich die Umgebungstemperatur während der in Abbildung 4.12b dargestellten Messung trotz der Klimatisierung des Raums um ca. 1 K verringert hat (Sensor 4) und man deshalb nicht von einem insgesamt stationären Endzustand sprechen kann. Trotzdem sind die getroffenen Aussagen über die Übertemperaturen repräsentativ, denn sie konnten in mehrfachen Wiederholungsmessungen unter ähnlichen Bedingungen bestätigt werden [168]. Darüber hinaus wurden Untersuchungen mit einer Wärmeleitpaste gemacht, die zwischen dem Kühlkörper und dem Primärteil als Übergangsmaterial aufgebracht wurde [236]. Die Wärmeleitpaste hat jedoch keine signifikante Verbesserung hervorgerufen [168].

4.4 Gewichtskraftkompensation

Die Aktoren für die lateralen Bewegungsachsen müssen nur Kräfte zur Beschleunigung der bewegten Masse aufbringen. Die Tauchspulaktoren für die vertikale Bewegung müssen hingegen eine permanente Gegenkraft zur Gewichtskraft der in vertikaler Richtung bewegten Masse und zusätzlich eine Kraft zur Beschleunigung dieser Masse aufbringen. Das erfordert eine dauerhaft hohe Bestromung der Spulen, was zu einer Erhöhung der Verlustleistung

und einer Erwärmung der angrenzenden Baugruppen führt. Um dies zu vermeiden, ist eine Gewichtskraftkompensation (GKK) für die vertikale Bewegungsachse der NPMM-200 unumgänglich.

Die Anforderungen an die GKK sind vielseitig. Zum einen darf sie konsequenterweise keinen zusätzlichen Wärmeeintrag liefern. Weiterhin muss sie möglichst reibungsarm sein und darf weder Stick-Slip- noch Hystereseeffekte aufweisen, damit die Dynamik der Aktoren nicht negativ beeinflusst wird. Außerdem muss die erzeugte Gegenkraft der GKK über den gesamten Bewegungsbereich der Aktoren möglichst konstant sein, um die Positions- und Winkelregelung nicht negativ zu beeinflussen. Eine Anpassung an unterschiedliche Messobjektmassen muss ebenfalls möglich sein [92]. Weiterhin sollen unterschiedliche laterale Positionen der Messobjektschwerpunkte möglichst keinen Einfluss auf die erzeugte Gegenkraft ausüben.

In [92] ist eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik verschiedener GKK-Systeme dargestellt. Bisher ist kein kommerzielles System bekannt, das alle genannten Anforderungen erfüllt. Deshalb wurde auch schon bei der NMM-1 eine Eigenentwicklung vorgenommen [246, 247]. Bei der NPMM-200 hat sich die in vertikaler Richtung bewegte Masse mit ca. 25 kg im Vergleich zur NMM-1 (ca. 0,9 kg) vervielfacht. Die Massenverteilung ist dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Aktoren z_0 und z_2 jeweils 40 % der Gesamtkraft aufbringen müssen, wohingegen auf den Aktor z_1 lediglich 20 % entfallen (Abbildung 4.13).

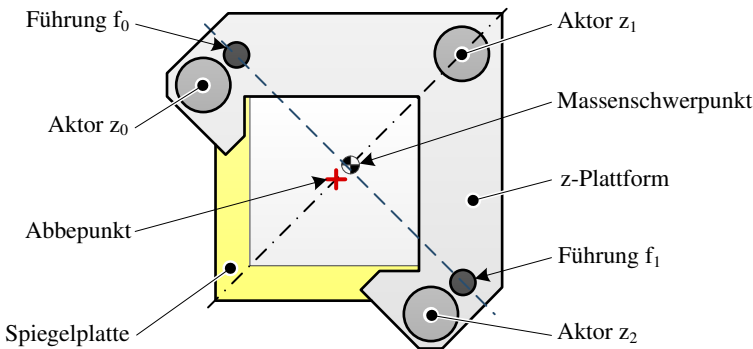


Abbildung 4.13: Massenverteilung bei der z-Plattform der NPMM-200 (Ansicht von unten)

Das technische Prinzip der NMM-1 das auf einer Schenkelfeder basiert, deren genutzte Schenkellänge in Abhängigkeit von der zu kompensierenden Kraft einstellbar ist, kann nicht adaptiert werden, da bei den an die NPMM-200 gestellten Anforderungen und unter Berücksichtigung der Massenverteilung zwei große, individuell angefertigte Schenkelfedern für die Aktoren z_0 und z_2 mit einer freien Schenkellänge von ca. 300 mm erforderlich sind, für die jedoch kein Bauraum vorhanden ist. Aus diesem Grund wurde für die NPMM-200 am IPMS ein neues GKK-System entwickelt und vom Projektpartner Premetec Automation GmbH realisiert [203]. Es ist modular aufgebaut und besteht aus den drei Einheiten z_0 , z_1 (Abbildung 4.14) und z_2 , die den jeweiligen Aktoren zugeordnet sind.

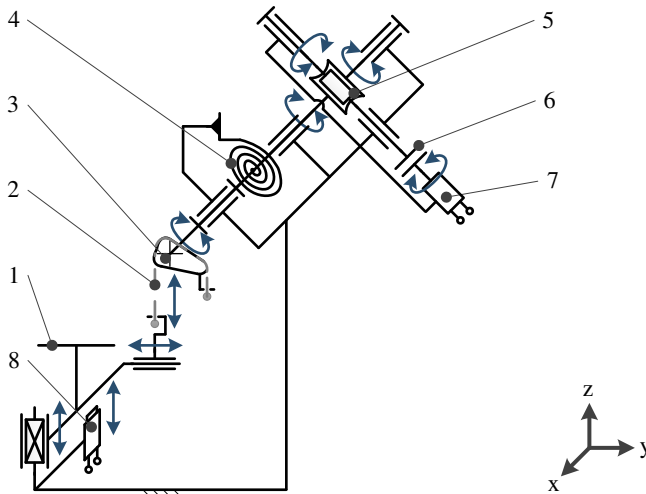


Abbildung 4.14: Funktionsprinzip der GKK-Einheit z_1 : 1 z-Plattform, 2 Stahlband, 3 Formscheibe, 4 Spiralfeder, 5 Schneckenradgetriebe, 6 Motorkupplung, 7 Schrittmotor, 8 Aktor für die z-Plattform

Jede GKK-Einheit besitzt eine Spiralfeder zur Krafterzeugung. In der Einheit z_1 reicht diese Spiralfeder aus, um die notwendige Kraft aufzubringen und dabei die angestrebte Kraftkonstanz $< 5\%$ über den Verfahrbereich einzuhalten. Bei den Einheiten z_0 und z_2 wurde sich für die Kombination der Spiralfeder mit einer zusätzlichen Zugfeder zur Linearisierung entschieden

(Abbildung 4.15). Diese beiden Einheiten sind baugleich dimensioniert und lediglich spiegelverkehrt konstruiert.

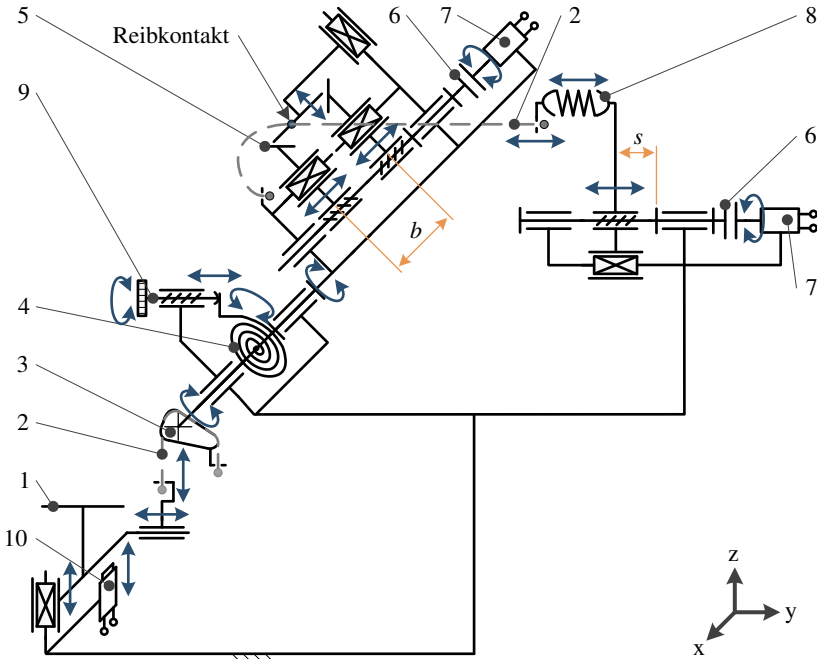


Abbildung 4.15: Funktionsprinzip der GKK-Einheiten z_0 und z_2 : 1 z-Plattform, 2 Stahlband, 3 Formscheibe, 4 Spiralfeder, 5 Keilgetriebe, 6 Motorkupplung, 7 Schrittmotor, 8 Zugfeder, 9 Schraubenge triebe zur Einstellung der Spiralfedervorspannung, 10 Aktor für die z-Plattform

Die Anbindung aller drei GKK-Einheiten an die in z-Richtung bewegliche Stellplattform ist identisch. Für jede Einheit befindet sich an der z-Plattform ein fest montierter Aufnehmer, an dem ein Stahlband (Dicke $50 \mu\text{m}$) axial beweglich eingespannt wird. Dieses Stahlband rollt über eine Formscheibe ab und wird an deren Ende fest geklemmt. Die Formscheibe besitzt einen veränderlichen Radius und ist mit einer Welle fest verbunden. Sie dreht sich bei Bewegung in z-Richtung. In Abhängigkeit vom Drehwinkel der Welle ändert sich das über den wirksamen Radius der Formscheibe in die Welle eingeleitete Drehmoment. Letzteres wird durch die gesamte Gewichtskraft erzeugt,

die auf die jeweilige Kompensationseinheit wirkt. An der drehbar gelagerten Welle ist das bewegliche Ende der Spiralfeder eingeklemmt. Die Spiralfeder besitzt eine lineare Drehmomentkennlinie. Der Radius der Formscheibe ist auf die Federkennlinie so abgestimmt, dass die erzeugte Kraft über den Verfahrbereich bestmöglich konstant gehalten wird.

Die Funktionsprinzipien beider Typen von GKK-Einheiten unterscheiden sich hinsichtlich der Abstützung der Spiralfeder am Gestell, d. h. der y-Plattform. Bei der Einheit z_1 ist der Führungsdorn der Feder über ein Schneckengetriebe, das von einem Schrittmotor angetrieben wird, in einem Winkelbereich von ca. 120° drehbar. Somit ist der Vorspannwinkel der Spiralfeder einstellbar. Das ist erforderlich, da die Linearisierung der eingeleiteten Kraft, welche durch die Dimensionierung der Formscheibe erreicht wird, nur für einen Lastfall gilt. Wenn sich die Messobjektmasse ändert, ist die konstruktive Linearisierung nicht mehr gegeben und es kann über die Änderung des Vorspannwinkels der Spiralfeder eine Anpassung vorgenommen werden. Auf diese Weise wird theoretisch eine Kraftkonstanz von $< 3,5\%$ über den gesamten Hub erreicht.

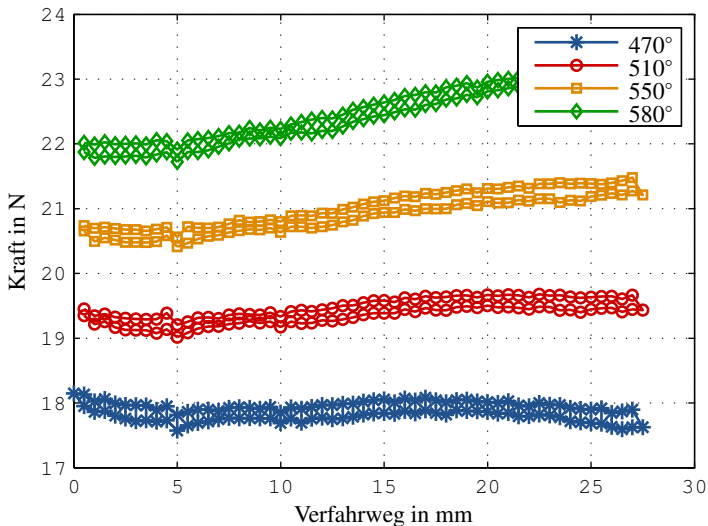


Abbildung 4.16: Kraft-Weg-Kennlinie der GKK-Einheit z_1 bei verschiedenen Vorspannwinkeln [203]

Dies konnte bei der experimentellen Verifikation auf einem Prüfstand weitestgehend bestätigt werden (Abbildung 4.16) [203]. Die Kraftlinearisierung gelingt für einen vordefinierten Lastfall (Vorspannwinkel 510°) sehr gut. Ist bei anderer Last eine Anpassung über die Einstellung des Vorspannwinkels erforderlich, nimmt die Kraftabweichung über den Verfahrbereich mit größer werdendem Vorspannwinkel zu. Die experimentell ermittelte Abweichung liegt im ungünstigsten Fall knapp über 1 N. Daraus resultiert eine mittlere Verlustleistung von ca. 7 mW über den gesamten Verfahrbereich. Die geringfügigen Abweichungen zwischen den Simulationen und den Messergebnissen sind hauptsächlich auf die Fertigungstoleranzen der Spiralfedern hinsichtlich Federrate und Qualität der Windungen zurückzuführen.

Bei allen Messungen hat sich eine Krafthysterese zwischen Hoch- und Abwärtsbewegung gezeigt. Da die eingesetzten Spiralfedern mit einer Federsteigung und einem daraus resultierenden Windungsabstand individuell angefertigt wurden und darüber hinaus der Betrag der Hysterese nahezu unabhängig vom Vorspannwinkel ist, kann Reibung zwischen den einzelnen Windungen als Ursache weitestgehend ausgeschlossen werden. Weitere Untersuchungen zu möglichen Ursachen wurden nicht durchgeführt, da die Inbetriebnahme des NPMM-200-Gesamtsystems im Vordergrund stand.

Bei der GKK-Einheit z_0 bzw. z_2 ist der Vorspannwinkel der Spiralfeder hingegen nicht variabel mit einem Schneckengetriebe einstellbar. Er wird einmalig beim Aufbau der NPMM-200 über Gewindestifte justiert und ist im Betrieb unveränderlich. Aufgrund der deutlich größeren Gegenkraft, die von z_0 bzw. z_2 aufgebracht werden muss, reicht eine Änderung des Vorspannwinkels zur Linearisierung bei Laständerung nicht aus. Deshalb wird ein zweites Drehmoment, hervorgerufen von einer Zugfeder, zu dem Moment der Spiralfeder parallel geschaltet. Hierzu befindet sich am freien Ende der drehbar gelagerten Welle ein Keilgetriebe, das von einem Schrittmotor angetrieben wird. Über die Keile wird ein weiteres Stahlband (Dicke $50 \mu\text{m}$) geführt, das an der Welle fest eingespannt ist. Es dient zur Anbindung der Zugfedereinheit. Das bewegliche Ende der Zugfeder ist mit dem Stahlband über einen Aufnehmer verbunden. Das feste Ende der Zugfeder ist an einem in einer Achse beweglichen Schlitten angebunden. Der Schlitten besitzt eine Kugelumlauführung und wird entlang einer Profilschiene mit V-Nuten geführt. Die Verstellung erfolgt über eine Gewindespindel, die von einem Schrittmotor angetrieben wird. Ungefähr zwei Drittel der gesamten Kraft werden von der Spiralfeder und ein

Drittel von der Zugfeder aufgebracht. Die Adaption an die individuelle Messobjektmasse vor Beginn einer Messung erfolgt dann zweistufig. Mit Hilfe des Keilgetriebes kann der wirksame Radius und damit das Drehmoment verändert werden, welches die Zugfeder über das Stahlband auf die Welle einleitet. Das Keilgetriebe ändert also die Übersetzung zwischen Spiral- und Zugfeder. Anschließend kann über die Verstellung des Schlittens die Federlänge im unbelasteten Zustand, d. h. die Vorspannung der Zugfeder, eingestellt werden. Diese Verstellmöglichkeiten mittels Keilgetriebe und Zugfeder wurden experimentell an der Einheit z_2 exemplarisch untersucht (Abbildung 4.17).

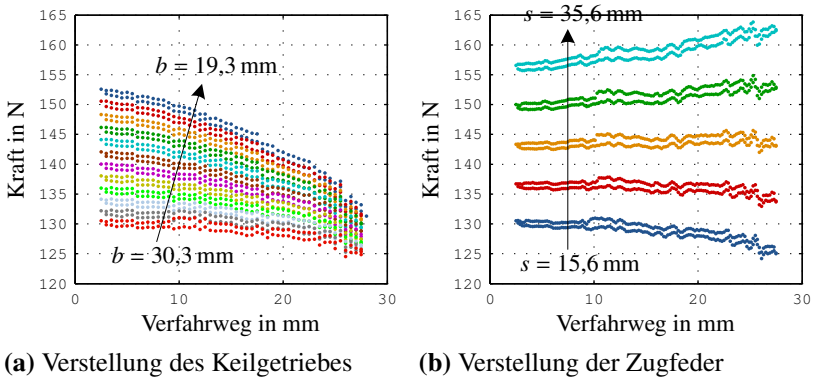


Abbildung 4.17: Kraft-Weg-Kennlinien der GKK-Einheit z_2 bei alleiniger Verstellung von Keilgetriebe oder Zugfeder [203]

In Abbildung 4.17a ist die Kompensationskraft über den Verfahrweg h der z -Plattform aufgetragen, wobei der Abstand b der beiden Keile (Abbildung 4.15) in Schritten von 1 mm reduziert wurde. Es ist zu erkennen, dass durch die Verringerung des Keilabstands der Abrollradius des Stahlbands größer wird und damit auch das Drehmoment respektive die Kompensationskraft zunehmen. Es fällt auf, dass die Kennlinien bei Verstellung des Keilgetriebes über den Verstellbereich degressiv verlaufen. Diese Degression macht die Wirksamkeit der Änderung des Übersetzungsverhältnisses deutlich.

Die Zugfeder zeigt in Abhängigkeit von ihrer Vorspannung s einen progressiven Verlauf (Abbildung 4.17b). Je höher die Vorspannung ist, desto größer ist die aufgebrauchte Kraft. Lediglich bei geringer Vorspannung ist der Verlauf degressiv. Die experimentelle Verifikation des Gesamtsystems, also die kom-

binierte Kraftwirkung von Spiral- und Zugfeder, ist ebenfalls am Beispiel der GKK-Einheit z_2 für vier Lastfälle bei optimal eingestellten Parametern des Keilgetriebes und der Zugfedervorspannung in Abbildung 4.18 dargestellt.

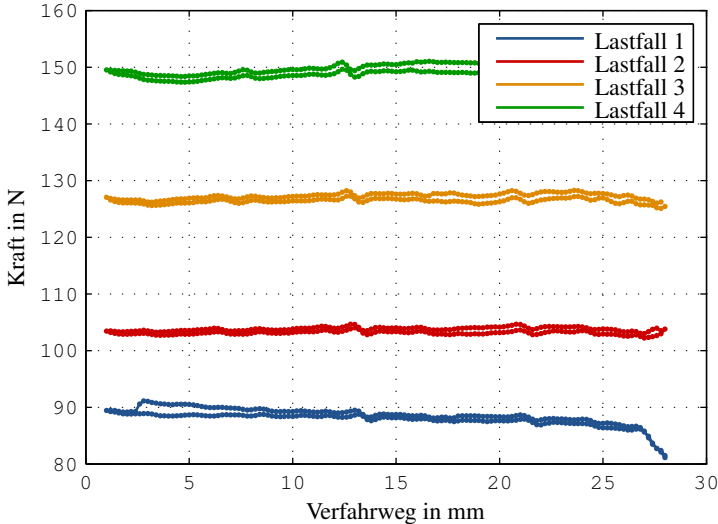


Abbildung 4.18: Resultierende Kraft-Weg-Kennlinien der Gewichtskraftkompensationseinheit z_2 für vier Lastfälle bei optimal eingestellten Parametern

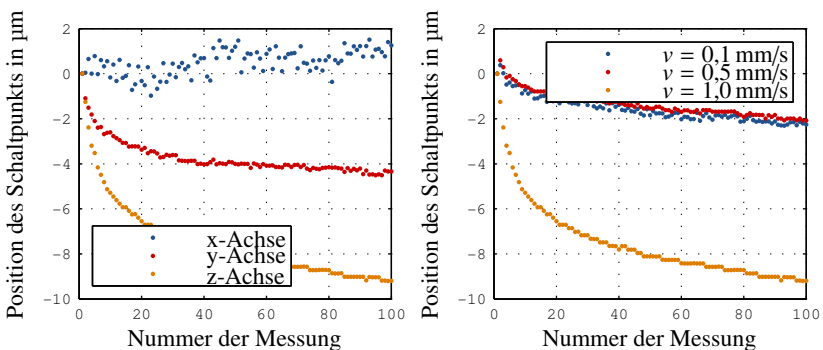
Die Messergebnisse belegen, dass die resultierende Kompensationskraft nahezu konstant über den Verfahrbereich der NPMM-200 von 25 mm verläuft und die Abweichungen nach Abzug der Steigung durchschnittlich $< 0,6\%$ groß sind. Es tritt eine geringe Hysterese auf. In den Randbereichen des Verfahrbereichs sind bei geringen Kompensationskräften darüber hinaus auch Nichtlinearitäten zu beobachten. Bezogen auf das Gesamtsystem der GKK bestehend aus allen drei Einheiten zeigen die Ergebnisse, dass bei maximaler Last von ca. 275 N eine von der Höhe der z-Stellplattform abhängige Restkraft von ca. 1 bis 2 % (d. h. ≈ 3 N) verbleibt, die von den Aktoren aufgebracht werden muss. Damit kann eine Reduktion des Leistungsbedarfs der drei Aktoren auf weniger als 5 mW erreicht werden. In Zukunft kann zur Optimierung noch die nichtlineare Aktorkennlinie in die Dimensionierung der GKK miteinbezogen werden.

4.5 Endlagenschalter

An jeder Bewegungsachse sind Endlagenschalter angeordnet. Beim Auslösen der Endlagenschalter bremsst das Positioniersystem mit Hilfe der Aktoren ab und stoppt die Bewegung. Ungefähr 0,5 mm nach dem Schaltpunkt der Endlagenschalter werden die mechanischen Endanschläge der Stellplattformen erreicht. Hauptauswahlkriterien für die Endlagenschalter sind, dass sie möglichst wenig Bauraum beanspruchen, wenig elektrische Signale benötigen und eine geringe Leistungsaufnahme besitzen.

4.5.1 Schaltende Taster

Bei der NMM-1 und dem Demonstrator für die NPMM-200 kommen schaltende Taster zur Endlagendetektion zum Einsatz [318]. Sie benötigen nur 3 Signalleitungen, haben eine geringe Leistungsaufnahme $< 50 \text{ mW}$ und sind preiswert. Die Taster weisen ein Driften der Schaltposition von bis zu 0,1 mm auf. Aus Versuchen zum wiederholten Anfahren der Schaltpositionen mit einer Geschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/s}$ wurde nach Abzug der Driften eine Standardabweichung von weniger als $1 \mu\text{m}$ ermittelt [92] (vgl. Abbildung 4.19). Diese setzt sich aus der Unsicherheit der Schaltposition und der durch die Samplingfrequenz f_s begrenzten Auflösung während der Bewegung ($\Delta s/f_s = 1 \text{ mm/s}/6,25 \text{ kHz} = 160 \text{ nm}$) zusammen [92].



(a) Vergleich der Bewegungsachsen (b) Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit für $v = 1 \text{ mm/s}$

Abbildung 4.19: Wiederholtes Anfahren der Schaltpositionen in der NMM-1

Diese in Relation zur Auflösung der Interferometer große Standardabweichung der Schaltposition (ca. Faktor 1000) ist für den Anwender nachteilig. Schwankungen im Mikrometerbereich bewirken, dass nach dem Aktivieren des Antriebssystems die Messobjektposition stets neu eingemessen werden muss. Dieses Auffinden des Messobjekts im Messvolumen ist mit großem Zeitaufwand verbunden. Eindeutige Artefakte oder Referenzmarken auf dem Messobjekt können dies erleichtern. Methoden zur schnellen Positionsbestimmung (z. B. Übersichtskameras oder Übersichtsscans, Datensegmentierung und Identifizierung von interessierenden Strukturen, Nutzung von Vorinformationen aus anderen Messverfahren) befinden sich derzeit noch in der Entwicklungsphase und sind bisher nicht in die NPMM-200 integriert [177, 230].

4.5.2 Berührungslose Sensoren

Um die taktile Detektion der Endlage und das damit verbundene Driften der Schaltposition zu reduzieren, existieren verschiedene Sensorprinzipien zur berührungslosen Messung, die in der Literatur unter dem Oberbegriff Näherungsschalter bekannt sind [119, 140].

Ein mögliches Prinzip sind *induktive Sensoren*, die auf dem Wirbelstromprinzip basieren. Eine Spule im Sensorkopf erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, dessen Feldlinien aus der Sensorebene austreten, das elektrisch leitfähige Messobjekt passieren, und sich wieder schließen (Abbildung 4.20a). Das magnetische Wechselfeld generiert im Messobjekt Wirbelströme, die Joulsche Verluste zur Folge haben, d. h. dem Schwingkreis wird Energie entzogen. Diese Wirbelstromverluste im Objekt nehmen mit geringerem Abstand zu. Auf der Eingangsseite der Sensorspule wird diese Auskopplung der Wirbelstromverluste nach dem Faradayschen Induktionsgesetz über die Änderung der Eingangsimpedanz messtechnisch ausgewertet und ein abstandsproportionales Ausgangssignal gebildet [240]. Das Ausgangssignal und dessen Linearität sind vom Werkstoff des bewegten Objekts abhängig, was eine individuelle Kalibrierung erforderlich macht [119]. Darüber hinaus sind derartige Wirbelströme während der Bewegung für die Anwendung in einer NPMM unerwünscht, da sie einen sehr geringen zusätzlichen Widerstand bei der Bewegung darstellen können.

Sensoren nach NAMUR (Normenarbeitsgemeinschaft für Mess- und Regeltechnik in der Chemischen Industrie) gehören ebenfalls zur Gruppe induk-

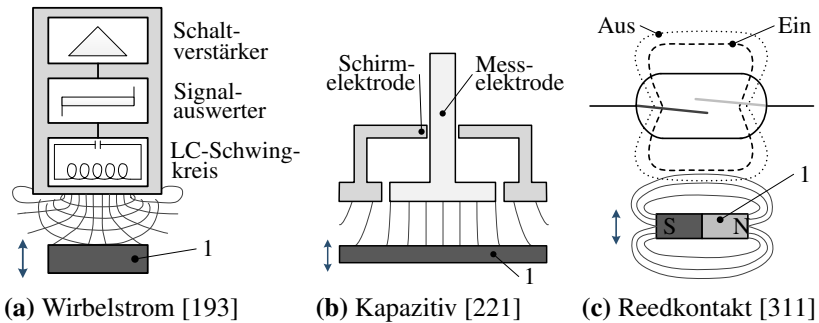


Abbildung 4.20: Sensorprinzipien zur berührungslosen Endlagendetektion: 1 bewegte Fläche

tiver Sensoren, nutzen jedoch ein anderes Wirkprinzip. Sie bestehen aus einem Oszillator mit gedämpfter Spule und einem Demodulator. Wenn sich der Abstand zwischen Messobjekt und Sensor ändert, variiert der aufgenommene Strom des Sensors, was vom Verstärker in ein bistabiles Signal umgewandelt wird. Insgesamt gibt es vier Zustände, so dass auch die Fehlerfälle durch eine analoge Auswerteeinheit erkannt werden können. Der große Vorteil im Vergleich zu Wirbelstromsensoren ist, dass der Ausgangsstrombereich genau definiert ist und entweder 1,2 mA (Sensor bedämpft) oder 2,1 mA (Sensor unbedämpft) beträgt. Die Umschalthyterese ist ebenfalls definiert und wird mit 0,2 mA beziffert. Nachteilig ist jedoch, dass NAMUR-Sensoren einen zusätzlichen Verstärker benötigen und somit mehr aktive Elemente in das Positioniersystem einer NPM einbringen, was zu lokalen thermischen Erwärmungen führt. Letzteres soll jedoch vermieden werden.

In der konventionellen Koordinatenmesstechnik sind *kapazitive Sensoren* weit verbreitet [140]. Sie basieren auf der Wirkungsweise des idealen Plattenkondensators (Abbildung 4.20b). Die beiden Plattenelektroden werden durch den Sensor und das gegenüberliegende Messobjekt gebildet, wobei das Messobjekt metallisch oder nichtmetallisch sein kann und keine elektrische Kontaktierung benötigt. Durchfließt ein Wechselstrom mit konstanter Amplitude den Sensorkondensator, so ist die Amplitude der Wechselspannung am Sensor dem Abstand der Kondensatorelektroden proportional. Die Wechselspannung wird demoduliert und zum Beispiel als Analogsignal ausgegeben [221]. Die

Schirmelektrode vermindert externe Störungen des Messfeldes. Dieser Sensortyp ist für den Einsatz in der NPMM-200 ungeeignet, da externe Verstärker sowie eine angepasste Auswerteelektronik erforderlich sind. Ein weiterer Nachteil ist, dass lange Signalleitungen erforderlich sind, da die Elektronik-einheit der NPMM-200 modular ist und nicht direkt neben dem Messgerät aufgestellt wird. Das stellt ein zusätzliches Problem dar, da die Kabelkapazität einen Einfluss auf die Signalqualität hat. Darüber hinaus spielen Umwelteinflüsse, die sich in Form von dielektrischen Veränderungen zwischen den zwei Kondensatorplatten äußern, eine große Rolle. Ebenso wie bei den Wirbelstromsensoren ist eine individuelle Kalibrierung erforderlich.

Reedkontakte bestehen aus zwei nahe beieinander liegenden magnetisierten Federkontakten, die in einen Glaskörper eingebracht sind, und sich bei Annäherung eines äußeren Magnetfelds sprunghaft schließen (Abbildung 4.20c). Sie schalten berührungslos, jedoch verschleißt die inneren Kontakte ähnlich wie bei taktilen Schaltern. Meist existieren aufgrund von magnetischen Nebefeldern mehrere Schaltpunkte.

Eine weitere Möglichkeit zur berührungslosen Detektion der Endlage ist der Einsatz von *Halleffektsensoren* (Abbildung 4.21a). Sie basieren auf dem Halleffekt, der auftritt, wenn auf einen stromdurchflossenen Leiter senkrecht ein externes Magnetfeld, beispielsweise das eines Permanentmagneten, einwirkt [138]. Dann entsteht die sogenannte Hallspannung U_H , die proportional zur Stromdichte J_x und zur magnetischen Flussdichte B_z in senkrechter Richtung ist [281]:

$$U_H = \frac{b}{n \cdot e_0} J_x \cdot B_z \quad (4.1)$$

Dabei ist n die Dichte der Ladungsträger, e_0 die Elementarladung und b die Breite des stromdurchflossenen Leiters. Halleffektsensoren haben den Vorteil, dass am bewegten Teil keine zusätzliche elektrische Kontaktierung erforderlich ist, wodurch der apparative Aufwand reduziert und parasitäre Einflüsse minimiert werden [54]. Sie benötigen nur eine geringe Betriebsspannung.

4.5.3 Realisierung in der NPMM-200

Der vorherige Abschnitt hat gezeigt, dass Halleffektsensoren die preisgünstigste und – vom technischen Aufwand betrachtet – einfachste Variante zur

Endlagendetektion in der NPMM-200 darstellen. Es werden Halleffektsensoren vom Typ A 3340 der Firma Allegro Microsystems Inc. eingesetzt [5]. Sie zeichnen sich durch eine sehr geringe Leistungsaufnahme aus und sie wurden für den Einsatz im Grobvakuum getestet. Der einfache technische Aufbau ermöglicht kleine äußere Gehäuseabmessungen, d. h. der Sensor ist in einem SOT-23W-Gehäuse kommerziell als Massenware erhältlich. Zur elektrischen Anbindung wurde eine universelle Trägerplatte entwickelt, auf welcher der Hallsensor inklusive eines Pull-Up-Widerstands und des Beipass-Kondensators zur Rauschunterdrückung aufgelötet werden (Abbildung 4.21b). Als Schaltsignal wird ein Signal mit Transistor-Transistor-Logik (TTL) ausgegeben.

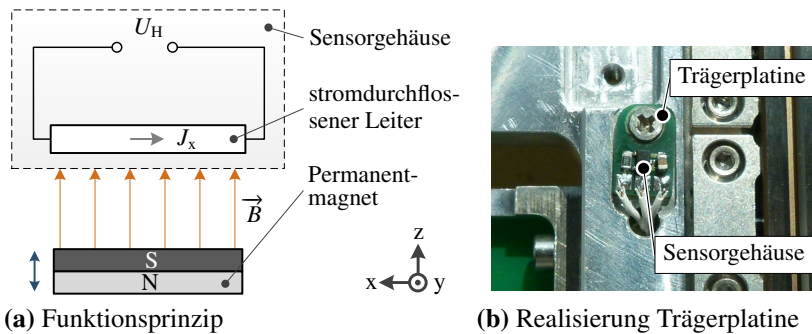
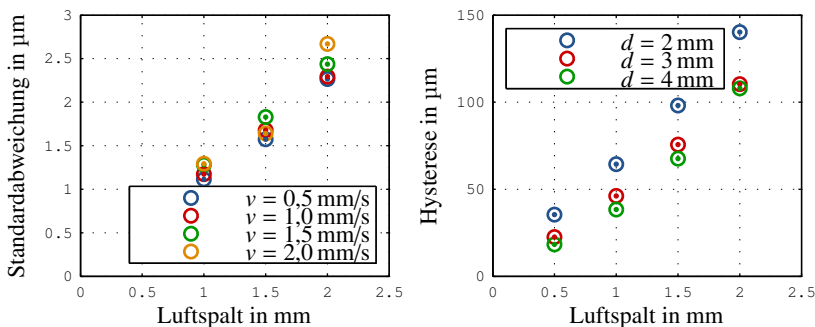


Abbildung 4.21: Halleffektsensoren in der NPMM-200

Vor dem Einbau in die NPMM-200 wurden Untersuchungen zum Schaltverhalten des Halleffektsensors durchgeführt. Hierzu wurde die NMM-1 genutzt und der Halleffektsensor als Antastsystem integriert. Der Permanentmagnet wurde auf der NMM-1-Spiegelecke befestigt. Es wurden Experimente mit verschiedenen Verfahrensgeschwindigkeiten und Luftspaltbreiten zwischen dem bewegten Permanentmagneten und dem Halleffektsensor durchgeführt. Außerdem wurden unterschiedlich große zylinderförmige Neodym-Permanentmagneten verglichen. Eine Messreihe bestand aus jeweils 250 Einzelmessungen. In Abbildung 4.22a ist die Standardabweichung des Schaltpunkts in Abhängigkeit von Verfahrensgeschwindigkeit v und Luftspaltbreite b für einen Permanentmagneten mit Durchmesser $d = 2$ mm dargestellt.



(a) Standardabweichung des Schaltpunkts für einen Permanentmagneten mit $d = 2 \text{ mm}$ (b) Hysterese in Abhängigkeit von Luftspalt und Durchmesser des Permanentmagneten

Abbildung 4.22: Untersuchung des Schaltverhaltens der Halleffektsensoren

Bei den einzelnen Messreihen konnte keine Drift der Schaltposition festgestellt werden. Es ist ersichtlich, dass die Verfahrensgeschwindigkeit einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Standardabweichung des Schaltpunkts hat. Die vorhandenen, nahezu konstanten Abweichungen von $0,3 \mu\text{m}$ können auf die durch die Samplingfrequenz begrenzte Auflösung während der Bewegung zurückgeführt werden (Abbildung 4.22a). Einen großen Einflussfaktor stellt die Luftspaltbreite dar. Mit größerem Luftspalt zwischen Permanentmagnet und Hallsensor steigt die Standardabweichung des Schaltpunkts annähernd exponentiell an. Bei den Messreihen, in denen der Durchmesser des Permanentmagneten variiert wurde, konnte kein Einfluss auf die Streuung des Schaltpunkts festgestellt werden.

Es ist vom Hersteller explizit eine Hysterese zwischen dem Übergang vom *Low*- zum *High*-Pegel und dem Übergang vom *High*- zum *Low*-Pegel integriert [5]. Diese soll die Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Vibrationen und Signalrauschen verbessern. Die Größe des Permanentmagneten hat einen Einfluss auf die Hysterese des Schaltpunkts (Abbildung 4.22b). Die Hysterese wird mit zunehmender Magnetgröße kleiner. Bei den durchgeführten Messungen konnte darüber hinaus beobachtet werden, dass die Hysterese auch eine Abhängigkeit von der Luftspaltbreite zeigt. Je kleiner der Luftspalt ist, desto geringer ist die Hysterese. Die Hysterese muss in der Ablaufsteuerung

nung der NPMM-200 berücksichtigt werden. Nach dem Auslösen eines Endlagenschalters muss das Positioniersystem in dieser Achse in entgegengesetzter Bewegungsrichtung mindestens $150\ \mu\text{m}$ verfahren werden, damit sichergestellt ist, dass das Ausgangssignal des Halleffektsensors wieder den *Low*-Pegel erreicht. Andernfalls kann aus sicherheitstechnischen Gründen kein neuer Positionierbefehl ausgeführt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine Luftspaltbreite von $0,5\ \text{mm}$ für die Endlagenschalter der NPMM-200 vorgesehen. Sie wird mit Abweichungen von bis zu $\pm 0,1\ \text{mm}$ mittels Distanzstücken eingestellt. Es werden Zylindermagnete mit einem Durchmesser von $2\ \text{mm}$ und einer Höhe von $1\ \text{mm}$ eingesetzt. In diesem Fall beträgt die Messunsicherheit der Schaltposition $78,78\ \text{nm}$ ($k = 2$).

4.6 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgte die detaillierte Beschreibung des Positioniersystems der NPMM-200. Dabei wurde ein ausführlicher Überblick über in Frage kommende Führungen und Aktoren gegeben und die Auswahl geeigneter Komponenten für die NPMM-200 dargelegt. Das realisierte Positioniersystem (Abbildung 4.23) wurde detailliert beschrieben und einige Untersuchungen zum Temperierverhalten der Aktoren präsentiert. Für die vertikale Bewegungsachse ist eine GKK unumgänglich, um die in den Aktoren entstehende Verlustwärme auf ein Minimum zu reduzieren. Das technische Prinzip wurde vorgestellt und grundlegende Untersuchungsergebnisse gezeigt. Darüber hinaus wurde in diesem Kapitel eine Übersicht über mögliche Prinzipien zur berührungslosen Detektion der Endlagen gegeben. Das Schaltverhalten der ausgewählten Hallsensoren wurde mittels der NMM-1 untersucht mit dem Ziel, die Reproduzierbarkeit in Abhängigkeit verschiedener konstruktiver Parameter (Luftspaltbreite, Größe der Permanentmagneten) zu ermitteln.

Das Positioniersystem bildet aus konstruktiver Sicht die Grundlage für die 3-D-Nanopositionierung. Die Regelung von fünf Freiheitsgraden der Spiegelplatte wird ermöglicht, so dass deren Verkippungen kompensiert werden können, die unvermeidlich aus den Unzulänglichkeiten der mechanischen Fertigung aller Komponenten der Stellplattformen und den Wälzkörpern resultieren. Maßgebend für die Präzision der NPMM-200 ist daher die Qualität der Regelung, die wiederum maßgeblich durch die eingesetzte Elektronik zur

Informations- und Signalverarbeitung sowie die verwendeten Längen- und Winkelmesssysteme bestimmt wird.

Die Reproduzierbarkeit des Schaltpunkts der ausgewählten Endlagenschalter auf Basis des Halleffekts liegt im Submikrometerbereich. Mit dem Ziel, eine höhere Reproduzierbarkeit des Nullpunkts der interferometrischen Längenmesssysteme und demzufolge des Ursprungs des Messgerätekoordinatensystems zu erreichen, werden im nächsten Kapitel nun mögliche Nullpunktensoren erörtert und die ausgewählten Sensoren messtechnisch untersucht.

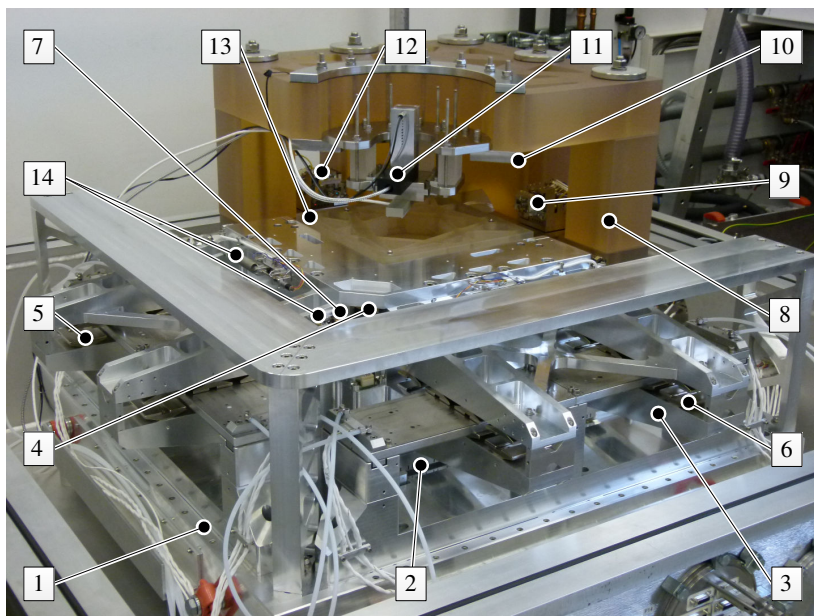


Abbildung 4.23: Positioniersystem der NPMM-200: 1 Gerätebasis, Führungen der 2 x-, 3 y- und 4 z-Achse, Antriebe der 5 x-, 6 y-Achse und 7 z-Achse, 8 metrologischer Rahmen, 9 x-Interferometer, 10 Befestigungspunkte für das Antastsystem, 11 Fixfokusensoren (raumfest), 12 y-Interferometer, 13 Spiegelplatte (verdeckt das z-Interferometer), 14 GKK

5 Nullpunktsensoren

Für die interferometrische Längenmessung sind zusätzliche Nullpunktsensoren erforderlich, um die Zähler der Interferometer an einer definierten Position im Messvolumen zu nullen. Diese Position stellt den Ursprung des Messgerätekoordinatensystems der NPMM-200 dar und wird deshalb auch als Referenzposition bezeichnet. Beim Aktivieren des Messgeräts muss zunächst die sogenannte Referenzfahrt durchgeführt werden, bei der die Referenzposition ermittelt und die Interferometer genullt werden.

In der NMM-1 werden die mechanischen Endlagenschalter des Positioniersystems auch als Nullpunktsensoren genutzt. Die Streuung der Schaltposition liegt im Mikrometerbereich (vgl. Abschnitt 4.5.1) und führt dazu, dass bei einer Deaktivierung der Antriebssysteme im Fehlerfall die Messobjektposition nach der Referenzfahrt neu eingemessen werden muss. Aufgrund des großen Messvolumens der NPMM-200 wird eine Positionsreferenz mit einer Unsicherheit im Nanometerbereich angestrebt. Dazu wird in der NPMM-200 eine Funktionentrennung vorgenommen. Hallsensoren werden als mechanische Endlagenschalter für das Positioniersystem eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.5.3) und es werden zusätzliche Nullpunktsensoren für die interferometrische Längenmessung mit einer angestrebten Reproduzierbarkeit im Nanometerbereich in den mechanisch-optischen Grundaufbau integriert. Diese Nullpunktsensoren werden nur während der Referenzfahrt benötigt und müssen nur in einem kleinen Bereich in der Nähe des Ursprungs des NPMM-200-Gerätekoordinatensystems ein gültiges Messsignal liefern. Der technische Zusatzaufwand zur Ermittlung der Nullposition soll so gering wie möglich gehalten werden.

Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der Referenzpositionsbestimmung mit Nanometerunsicherheit ist, dass die Totstrecken der Interferometer und die Unsicherheit bei deren Bestimmung einen Beitrag zur Messunsicherheit der interferometrischen Längenmessung unter atmosphärischen Bedingungen liefern. Dies hat eine Messunsicherheitsanalyse in [92] gezeigt. In [96] wurde gezeigt, dass die Länge der Totstrecke l_t je nach Umgebungsbedingungen mit

einer maximalen Messunsicherheit $< 9 \mu\text{m}$ bekannt sein oder auf Null justiert werden muss, damit ein Beitrag zum Messunsicherheitsbudget für eine Messung entlang der Raumdiagonalen der NPM-200 $< 1 \text{ nm}$ erreicht wird. Eine Bestimmung der Totstrecke aus den geometrischen Abmessungen der Bauteile ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und erfüllt diese geforderten Grenzwerte nicht [92]. Eine exakte Totstreckenbestimmung kann nur durch interferometrische Absolutmessung mit derselben optischen Anordnung erfolgen. Hierzu ist die Einkopplung von Strahlung mit unterschiedlichen Wellenlängen erforderlich. Das stellt jedoch einen zu großen Aufwand dar, insbesondere hinsichtlich der Einkopplung in das Interferometer und der wellenlängenselektiven Interferenzsignalauswertung [92]. Deshalb ist es eine gute Alternative, die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Nullposition und damit der Totstrecke mittels externer Sensoren zu verringern.

5.1 Übersicht zu möglichen Sensorprinzipien

5.1.1 Lichtschrankenprinzip

Eine Möglichkeit, zusätzliche Nullpunktsensoren in das Positioniersystem zu integrieren, sind Lichtschranken in Kombination mit Schlitzblenden (siehe Abbildung 5.1a). Das Licht einer LED-Lichtquelle wird durch eine Schlitzblende auf einen Fotoempfänger projiziert. Die Breite der Blendenöffnung ist dabei maßgeblich für die Sensitivität des Fotoempfängers. Letzterer kann ein oder zwei fotosensitive Bereiche besitzen. Dementsprechend kann dann entweder die Stelle des Intensitätsmaximums (Fotodiode) oder der Nulldurchgang des Differenzsignals (Doppeldiode) als Positionsreferenz genutzt werden (Abbildung 5.1b).

In dem zweiachsigen Demonstrator für die NPM-200 kommen solche Lichtschranken zur Positionsreferenz zum Einsatz [146]. Es wird für jede Endlage eine Doppeldiode verwendet und das jeweilige Differenzsignal zur Bestimmung der Nullposition normiert. Das hat den Vorteil, dass Drift und Alterungserscheinungen der optoelektronischen Bauelemente keinen Einfluss auf die Detektion der Nullposition haben. Versuche zur Reproduzierbarkeit dieser Nullposition haben gezeigt, dass die Wiederholstandardabweichung bei 100 Messungen in der Größenordnung von $135,3 \text{ nm}$ liegt. Die maximalen Streuungen betragen weniger als $1 \mu\text{m}$. Es hat sich keine Abhängigkeit

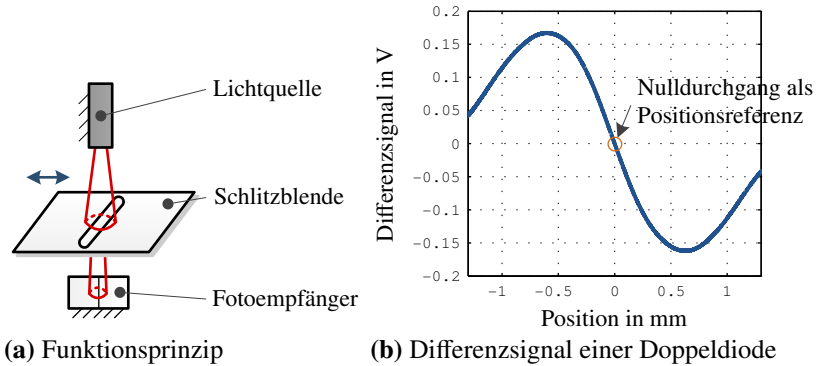


Abbildung 5.1: Lichtschranke als Nullpunktsensor

von der Verfahrensgeschwindigkeit gezeigt (siehe Abbildung 5.2). Die Reproduzierbarkeit wird hauptsächlich von thermischen Faktoren beeinflusst, da die Schutzhaube des Demonstrators nicht temperiert ist und die Verlustwärme der Aktoren im Dauerbetrieb die Temperatur in der geschlossenen Haube erhöht.

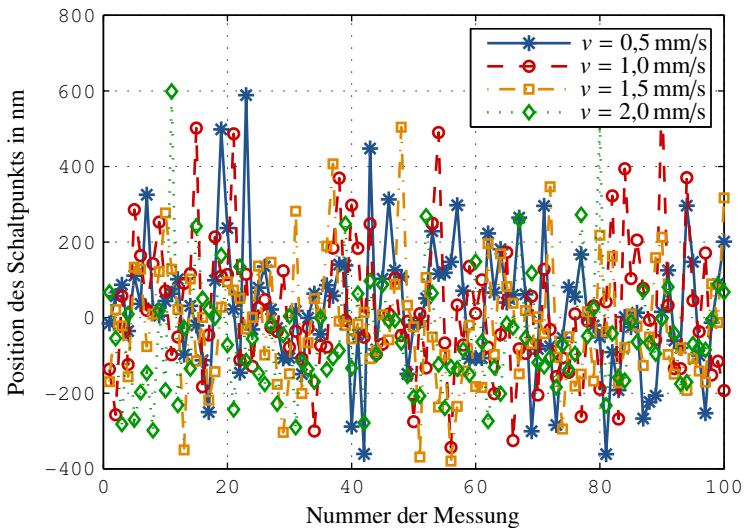


Abbildung 5.2: Reproduzierbarkeit der Nullposition am Beispiel der Lichtschranke an der x-Achse des zweiachsigen NPMM-200-Demonstrators

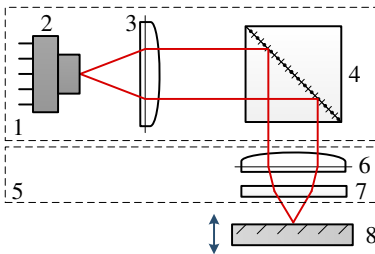
Der Hauptnachteil von Lichtschranken mit Schlitzblende ist, dass sie nur Bewegungen in der Blendenebene ermöglichen und somit nur an einem planar bewegten Läufer angewendet werden können. Für ein dreiachsiges Positioniersystem müssen sie an den einzelnen Bewegungsachsen angeordnet werden. Das führt in Bezug auf den Ursprung des Messgerätekoordinatensystems zu zusätzlichen Messabweichungen erster Ordnung, die durch den Abstand zu den Interferometermessstrahlen zustande kommen. Die Zielstellung besteht jedoch darin, hohe Reproduzierbarkeiten und eine geringe Drift aufgrund von thermischen Ausdehnungen zu erreichen. Deshalb ist es zweckmäßig, die Nullpunktsensoren gemeinsam mit den Interferometern am metrologischen Rahmen der NPMM-200 zu befestigen. Als Messfläche bieten sich die verspiegelten Flächen der Spiegelplatte an, welche gleichzeitig die Messspiegel für die Interferometer darstellen. Allerdings dürfen dann in keinem Fall taktile Sensoren eingesetzt werden. Die Antastkräfte können plastische Verformungen der Spiegeloberfläche im Nanometerbereich hervorrufen, was sich nachteilig auf die interferometrische Positionsbestimmung auswirkt – insbesondere im Hinblick auf zusätzliche Messabweichungen in Bezug auf die hinterlegten Topographiedaten, die zur Korrektur eingesetzt werden. Deshalb wurde sich bei der weiteren Recherche nach geeigneten Sensorprinzipien auf berührungslos messende Sensoren beschränkt.

5.1.2 Ultraschall

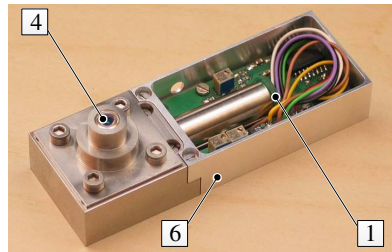
Eine Literaturrecherche hat ergeben, dass in der *Sub-Atomic Measuring Machine* Ultraschallsensoren als Nullpunktsensoren eingesetzt werden [115]. Sie werten die Reflexion eines Ultraschalls an einem Hindernis aus, was prinzipiell auch auf den verspiegelten Außenflächen der Spiegelplatte funktioniert. Für die Anwendung in der NPMM-200 mit der angestrebten Reproduzierbarkeit im Submikrometerbereich eignen sie sich jedoch nicht. Zum einen wird die Auflösung handelsüblicher Ultraschallsensoren mit $< 0,5$ mm angegeben und liegt somit deutlich oberhalb der gewünschten Reproduzierbarkeit [21]. Zum anderen liegt die Verlustleistung aufgrund der Vielzahl aktiver Bauelemente in der Größenordnung von $0,4$ W [21]. Eine zusätzliche gezielte Abführung mit einer Wasserkühlung ist erforderlich, um thermische Einflüsse auf den metrologischen Rahmen und die Interferometer zu reduzieren.

5.1.3 Fokusverfahren

Ein optisches Messverfahren, das ein Auflösungsvermögen entlang der optischen Achse im Subnanometerbereich besitzt, ist das Fokusverfahren, dessen Funktionsprinzip in Abbildung 5.3a dargestellt ist. Das divergente Licht einer Laserdiode, die in der Hologramm-Laser-Einheit integriert ist und eine Wellenlänge von 650 nm aufweist, wird mit Hilfe einer Linse kollimiert. Dann wird es mit Hilfe der Fokussierlinse auf den Messspiegel fokussiert. Der reflektierte Strahl wird von derselben Optik zur Hologramm-Laser-Einheit zurückgeführt und dort auf die Fotoempfänger abgelenkt. Zur Fokuspunkt detektion wird sowohl das Differenz- als auch das Summensignal genutzt [187].



(a) Funktionsprinzip



(b) Fokussensor der Firma SIOS Meßtechnik GmbH

Abbildung 5.3: Fokusverfahren [187]: 1 Gehäuse, 2 Hologramm-Laser-Einheit, 3 Kollimationslinse, 4 polarisierender Strahlteilerwürfel, 5 Objektiv, 6 Fokussierlinse, 7 Kompensationsplatte, 8 Messspiegel

Auf Basis dieses Verfahrens wurde am IPMS ein Fokussensor zur Messung von Nanostrukturen entwickelt und in die NMM-1 integriert [181, 188]. Aufgrund seiner guten messtechnischen Eigenschaften wird er seit einigen Jahren als kommerzielles Produkt der Firma SIOS Meßtechnik GmbH angeboten (Abbildung 5.3b).

Dieser Fokussensor kann durch geringfügige konstruktive Anpassungen des Gehäuses am metrologischen Rahmen der NPMM-200 montiert und als Nullpunktsensor eingesetzt werden. Da die Hologramm-Laser-Einheit eine elektrische Leistung in der Größenordnung von 100 mW umsetzt [265], ist eine gezielte Abführung der Wärme erforderlich oder der Sensor muss einen großen horizontalen Abstand zu den Interferometern besitzen, um die thermi-

schen Einflüsse möglichst gering zu halten. Dieser mögliche Abstand wird jedoch durch die Abmessungen der Spiegelplatte limitiert.

5.1.4 Konfokales Messprinzip

Um den Nachteil einer zusätzlichen Wärmequelle in der Nähe der Interferometer zu vermeiden, ist es sinnvoll, den Nullpunktsensor fasergekoppelt aufzubauen. Das hat den Vorteil, dass die Lichtquelle dann in der NPMM-200-Elektronikeinheit platziert werden kann und somit keine Zusatzwärme in den Messaufbau einbringt. Hierfür eignet sich das konfokale Messprinzip besonders, da es mit vergleichsweise geringer Systemkomplexität realisierbar ist.

Das einfachste konfokale Verfahren ist der konfokale Punktensensor, der in den 1950er Jahren von Marvin Minsky patentiert wurde [261], und eine breitbandige Lichtquelle kombiniert mit Lochblenden verwendet. Aus der Literatur sind mehrere Sensoren bekannt, welche dieses Prinzip mit einer Faserkopplung realisieren [55, 264, 295, 317]. Diese Sensoren erfüllen jedoch nicht die gewünschten Anforderungen insbesondere hinsichtlich Vakuumtauglichkeit, Abtastfrequenz (83,3 kHz) und geringen Kosten. Außerdem sind aus der Literatur mikrooptische, chromatisch konfokale Sensoren bekannt, die mehr als zwei Wellenlängen nutzen [176, 194, 224]. Das Funktionsprinzip basiert auf den Eigenschaften dispersiver Optiken, weißes Licht nicht in einem Punkt zu fokussieren, sondern nach Wellenlänge separiert in unterschiedlichen Entfernungen. Dadurch wird eine chromatische Kodierung der Abstandsinformation möglich. Allerdings sind solche chromatisch konfokalen Sensoren für den Einsatz als Nullpunktsensor technisch zu aufwändig, da eine spektrale Detektoreinheit zur Auswertung erforderlich ist. Außerdem stellt die Faserkopplung polychromatischer Lichtquellen ein Problem dar [176].

Deswegen wurde ein neuer konfokaler fasergekoppelter Punktensensor mit nur einer Wellenlänge mit dem Ziel entwickelt, ihn zur Nullpunktdetektion in der NPMM-200 einzusetzen. Dabei wurde insbesondere darauf Wert gelegt, dass er sich ohne Schwierigkeiten in das DAS integrieren lässt. Deshalb ist die Elektronik des Sensors einfach aufgebaut und verwendet Komponenten aus der klassischen Nachrichtentechnik. Das Funktionsprinzip des Sensors ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Der Sensorkopf und die Elektronik mit den Send- und Empfangsmodulen sind über einen Singlemode-LWL mit 9,3 μm Kerndurchmesser verbunden.

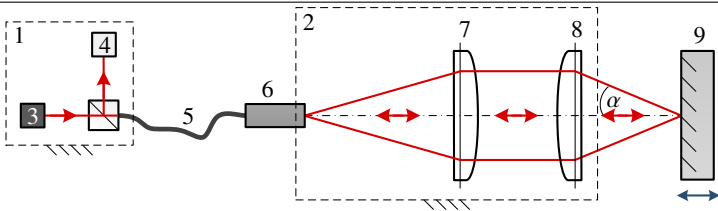
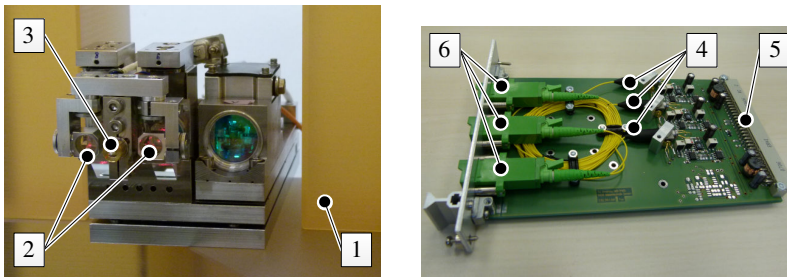


Abbildung 5.4: Funktionsprinzip des fasergekoppelten, monochromatischen Nullpunktsensors basierend auf dem konfokalen Prinzip: 1 Sender- und Empfängermodul, 2 Sensorkopf, 3 Laserlichtquelle, 4 Fotoempfänger, 5 LWL, 6 LWL-Stecker, 7 Kollimationslinse, 8 Fokussierlinse, 9 Messspiegel

Der Sensorkopf enthält eine Linse zur Kollimation des Laserstrahls, der divergent aus dem LWL austritt, und eine weitere zur Fokussierung des Strahls auf die Messobjektoberfläche. Das vom Objekt reflektierte Licht wird durch dieselben Linsen zum LWL und dann zur Elektronikeinheit zurück übertragen. Somit wirkt das Ende des LWL als Beleuchtungs- und Auswertebende entsprechend des konfokalen Prinzips. Das optische System wurde hinsichtlich kleinen äußeren Abmessungen so optimiert, dass eine Anordnung zwischen den Messstrahlen der Interferometer möglich wird (vgl. Abbildung 5.5a). Dadurch lässt sich der Abbeoffset auf ein Minimum reduzieren.

Die Dimensionierung des optischen Systems wird in [86] beschrieben. An dieser Stelle sei zusammenfassend erwähnt, dass die ausgewählte Fokussierlinse eine Brennweite von 4,6 mm besitzt und eine laterale Auflösung von ca. 4 μm ermöglicht. Beugungsbedingt ist eine theoretische laterale Auflösung von 1,1 μm möglich. Jedoch wurde das optische System so dimensioniert, dass der Durchmesser des Laserstrahls in der Fokusebene im Vergleich zur theoretisch möglichen Auflösung um Faktor 4 größer ist, damit z. B. lokale Verschmutzungen der Spiegelfläche möglichst wenig Einfluss auf das Messsignal des Sensors haben. Das Auflösungsvermögen in Richtung der optischen Achse entspricht dem der interferometrischen Längenmessung, da die Messwerte simultan im DAS erfasst werden.

Die für den Sensor erforderliche Elektronikeinheit basiert auf einem kleinen, kompakten bidirektionalen Sender- und Empfängermodul vom Typ PB13H09 der Firma Laser Components GmbH [164] und einer Auswerteschaltung, die am IPMS entwickelt wurde [17]. Die Wellenlänge des Sender-



(a) Integration des Nullpunktsensors am Beispiel des y -Interferometers (b) Leiterkarte mit Sender- und Empfangsmodulen

Abbildung 5.5: Konfokalen Nullpunktsensoren für die NPMM-200: 1 metrologischer Rahmen, 2 Messstrahlen des Interferometers, 3 Sensorkopf des Nullpunktsensors, 4 Sender- und Empfängermodule, 5 Anschluss für die Backplane, 6 LWL-Ausgänge der Leiterkarte

moduls beträgt 1330 nm und die Ausgangsleistung kann 1 mW erreichen. Als Empfänger kommt eine rauscharme InGaAs-PIN Fotodiode zum Einsatz, deren Bandbreite mit bis zu 1,5 GHz angegeben wird [164]. Zusätzlich ist eine Monitordiode in dem Modul integriert, die zur Überwachung der Laserleistung dient und deshalb zu deren Regelung auf konstante Leistung eingesetzt wird. Die zwei großen Vorteile dieses Moduls sind, dass es sehr kompakt aufgebaut ist und nicht viel Bauraum beansprucht sowie, dass kein zusätzlicher Aufwand erforderlich ist, um Sender und Empfänger miteinander zu koppeln. Auf der am IPMS entworfenen Auswerteschaltung sind für jedes Sender- und Empfängermodul drei Potentiometer integriert. Eines dient dazu, einmalig vor Inbetriebnahme der Referenzsensoren die Leistung der Sendediode einzustellen. Mit Hilfe der anderen zwei Potentiometer können der Offset und die Verstärkung des Empfängersignals eingestellt werden, um die insgesamt drei Referenzsensoren untereinander abzustimmen und auf annähernd gleiche Intensität einstellen zu können. Für jeden der drei Nullpunktsensoren wird eine solche Schaltung und ein Sender- und Empfängermodul benötigt. Aufgrund der kompakten Außenabmessungen der elektronischen Komponenten ist es möglich, die Einheiten aller drei Referenzsensoren auf einer Leiterkarte zu integrieren (Abbildung 5.5b).

5.2 Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften

Mit dem Ziel, die messtechnische Leistungsfähigkeit zu ermitteln, wurde der entwickelte monochromatische Nullpunktsensor als Antastsystem in die NMM-1 integriert [17]. Als Messobjekt wurde ein Würfel aus Zerodur[®] mit verspiegelten Seitenflächen (Oberflächenqualität $\lambda/10$) verwendet. Ein prinzipieller Signalverlauf bei Verschiebung des Messobjekts entlang der optischen Achse des Sensors ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

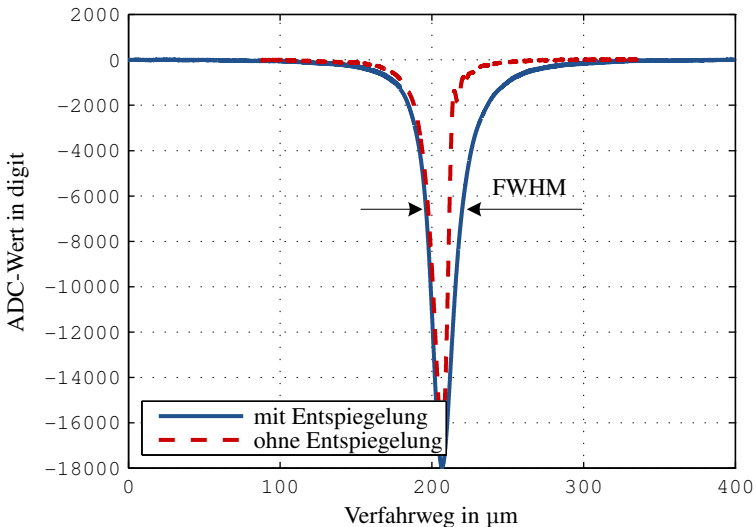


Abbildung 5.6: Prinzipieller Kennlinienverlauf des monochromatischen konfokalen Sensors

Die maximale Intensität wird detektiert, wenn sich die Spiegelfläche in der Fokusebene befindet. Dieser Punkt soll als Nullpunkt für die interferometrische Längenmessung in der NPMM-200 dienen. Bei ersten Tests waren starke Störinterferenzen auf dem Signal des konfokalen Sensors zu beobachten, die sich in Form von Unregelmäßigkeiten und Unsymmetrien auf der rechten Flankenseite äußerten (Abbildung 5.6). Diese Effekte waren auf eine fehlende Verspiegelung der eingesetzten Linsen im genutzten Wellenlängenbereich

zurück zu führen, so dass ein Teil des einfallenden Lichtes an der Linsenoberfläche reflektierte und sich dem Messsignal überlagerte. Durch den Austausch der Linsen konnten die Störinterferenzen beseitigt werden. Außerdem haben sich auch die Symmetrie der Intensitätskurve verbessert und das FWHM vergrößert. Mit Entspiegelung der Linsen beträgt letzteres ca. $18 \mu\text{m}$.

Die Position des Intensitätsmaximums kann aus dem aufgezeichneten Datensatz mit verschiedenen Algorithmen berechnet werden. In [17] wurden die Einpassung eines Polynoms und einer Gauß-Kurve sowie die Verwendung eines Filter-Vektors verglichen. Dabei hat letzterer die besten Resultate gezeigt. Aus einer Messreihe bestehend aus 500 Einzelmessungen konnte für den Punkt maximaler Intensität eine Standardunsicherheit von $3,51 \text{ nm}$ mit Hilfe der NMM-1 ermittelt werden [17]. Es hat sich keine signifikante Richtungs- oder Geschwindigkeitsabhängigkeit gezeigt. Diese Versuche zur Reproduzierbarkeit wurden in der NPMM-200 nach dem Einbau als Referenzsensor wiederholt (Abbildung 5.7).

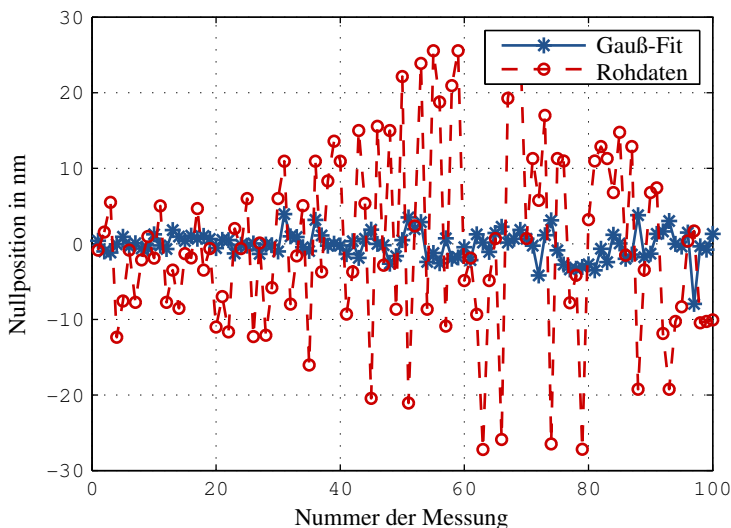


Abbildung 5.7: Reproduzierbarkeit der NPMM-200-Nullpunktsensoren am Beispiel des Sensors für die x-Achse bei Berechnung der Nullposition aus den Rohdaten und der Gauß-Kurve

Die Intensitätskurve des Sensors wurde während der Referenzfahrt aufgenommen. Insgesamt wurden 100 Wiederholungsmessungen gemacht. Derzeit wird in der Nachverarbeitung der Messdaten allerdings kein Filter-Vektor berechnet, sondern es wird oberhalb eines zuvor festgelegten Schwellwerts von 25 % der maximalen Intensität eine Gauß-Kurve in die Kennlinie eingepasst. An der zum Intensitätsmaximum gehörenden Position wird der Interferometerzähler der jeweiligen Messachse genullt. In Abbildung 5.7 sind die berechneten Referenzpositionen aus den Rohdaten und der Gauß-Kurve gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die aus der Gauß-Kurve berechneten Nullpositionen deutlich geringere Streuungen aufweisen. Die Standardabweichung aus 100 Einzelmessungen beträgt 5,06 nm im Vergleich zu 12,11 nm, wenn man die Referenzposition aus den Rohdaten ermittelt. Wenn man die ermittelten Standardabweichungen in Bezug zu den Ergebnissen aus den Vorversuchen mit der NMM-1 setzt, ist zu erkennen, dass sich die Standardabweichung um ca. 1,5 nm verschlechtert hat. Die Hauptursache hierfür ist die schlechtere thermische Stabilität im Laborraum im Vergleich zu dem der NMM-1. Aufgrunddessen ist die thermisch bedingte Drift des Sensors größer, die in [17] hauptsächlich auf eine Temperaturempfindlichkeit der Sender- und Empfängermodule zurückgeführt werden konnte.

Bei Verwendung von Sender- und Empfangsmodulen mit einer Wellenlänge ist es nicht möglich, eine Richtungserkennung während der Referenzfahrt durchzuführen, da die Intensitätskurve keinen eindeutigen Verlauf hat. In wenigen Extremfällen, wenn die Aktoren der NPMM-200 nach Überschreiten der Nullposition, d. h. nahe der mechanischen Endanschläge, aktiviert werden, ist es nicht möglich, die Referenzposition zu finden, da der Intensitätsverlauf kein Maximum aufweist und die Berechnung fehlschlägt. Dann muss die Spiegelplatte zunächst in positiver Achsrichtung manuell bewegt werden, um anschließend eine neue Referenzfahrt beginnen zu können. Als Alternative bietet sich eine automatische Referenzfahrt mit Suche in umgekehrter Bewegungsrichtung an. Diese ist jedoch derzeit nicht implementiert.

Eine weitere Alternative besteht darin, den Nullpunktsensor mit zwei Wellenlängen zu betreiben und das Differenzsignal als Kennlinie für die Nullpunktdetektion zu verwenden. Zur Erzeugung der Differenzkennlinie wird der physikalische Effekt der chromatischen Längsaberration der Fokussierlinse ausgenutzt. Die chromatische Längsaberration wird dadurch verursacht, dass die Brechzahl n jedes Materials auf nichtlineare Weise von der Wellenlänge

λ des einfallenden Lichtes abhängt. Dieser Effekt führt dazu, dass die beiden verwendeten Wellenlängen unterschiedliche Fokusebenen besitzen. Der entstehende Versatz der Intensitätsschwerpunkte der einzelnen Sensorkennlinien beeinflusst den Anstieg der Differenzkennlinie. In diesem Fall ist eine Richtungserkennung möglich und man kann dann die Richtung der Referenzfahrt je nach Kennliniensteigung wählen. In einem Testaufbau konnte diese prinzipielle Funktionsweise nachgewiesen werden [266]. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde dann ein solcher bichromatischer Nullpunktsensor realisiert. Zur praktischen Umsetzung muss die Elektronik angepasst werden und ein Y-Koppler als LWL verwendet werden (Abbildung 5.8). Das optische System des Sensorkopfs erfordert keine Anpassungen.

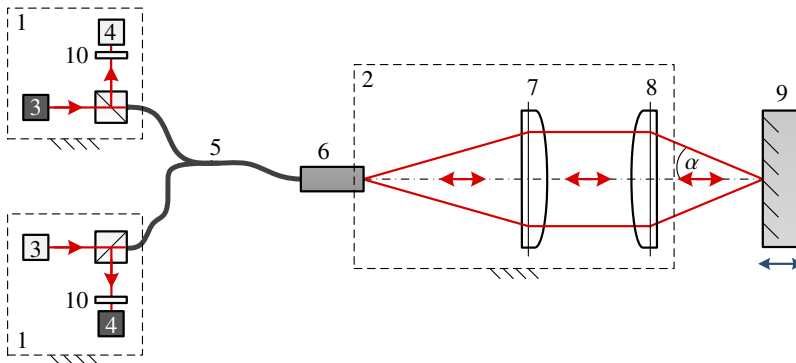


Abbildung 5.8: Funktionsprinzip des fasergekoppelten, bichromatischen Nullpunktsensors: 1 Sender- und Empfängermodul, 2 Sensorkopf, 3 Laserlichtquelle, 4 Fotoempfänger, 5 LWL, 6 LWL-Stecker, 7 Kollimationslinse, 8 Fokussierlinse, 9 Messspiegel, 10 wellenlängenselektiver Filter

Das zuvor eingesetzte bidirektionale Sender-Empfängermodul muss durch zwei andere mit unterschiedlichen Wellenlängen ersetzt werden. Es wurden die Module PW13M11 und PW15M09 der Firma Laser Components GmbH [164] ausgewählt. Letztere besitzen eine wellenlängenselektive Empfangsdiode. Durch einen Filter wird im Empfängermodul die jeweilige Senderwellenlänge ausgeblendet. Dadurch wird erreicht, dass der Störabstand, welcher das Verhältnis von Signalstärke zur Rauschstärke ausdrückt, größer ist. Ein Funktionsnachweis und die Untersuchung der metrologischen Eigenschaften

erfolgten mit der NMM-1 auf gleiche Weise. Ein beispielhafter Kennlinienverlauf ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

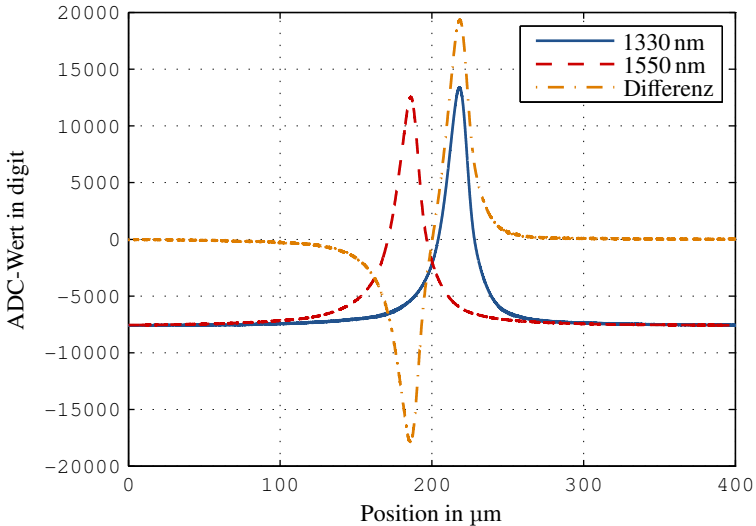


Abbildung 5.9: Prinzipieller Kennlinienverlauf des bichromatischen konfokalen Sensors

In [86] wurden umfangreiche Untersuchungen zu den metrologischen Eigenschaften des bichromatischen Nullpunktsensors angestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Nulldurchgang des Differenzsignals, welcher als Nullposition für die interferometrische Längenmessung in der NPMM-200 genutzt werden soll, eine Standardabweichung von 3,7 nm aufweist. Dies ist vergleichbar gut wie bei der monochromatischen Variante. Somit eignet sich der bichromatische konfokale Sensor in gleicher Weise als Nullpunktsensor und erlaubt im Vergleich zum monochromatischen Sensor sogar eine Richtungserkennung. Aufgrund dieser Eigenschaft eignet sich der bichromatische Sensor auch als Antastsystem in einer NPMM [16]. Das hat den bedeutenden Vorteil, dass aufgrund der Faserkopplung keine zusätzlichen Wärmequellen in den Messaufbau eingebracht werden.

5.3 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Sensorprinzipien zur Nullpunktdetektion für die interferometrische Längenmessung gegenüber gestellt. Im Ergebnis wurde sich für das konfokale Messprinzip zur berührungslosen Nullpunktdetektion entschieden. Da kein kommerziell verfügbarer Sensor alle gewünschten Anforderungen erfüllt, wurde auf Basis von handelsüblichen Sender- und Empfängermodulen aus der Nachrichtentechnik ein monochromatischer konfokaler Nullpunktsensor entwickelt. Die Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften hat ergeben, dass dadurch die Standardabweichung des Nullpunkts des Messgerätekoordinatensystems auf etwa 3,5 nm reduziert werden kann. Im folgenden Kapitel werden nun die grundlegenden Positioniereigenschaften der NPMM-200 analysiert.

6 Analyse der Positioniereigenschaften

6.1 Positions- und Winkelrauschen

Die Konstruktions- und Arbeitsweise der NPMM-200 sieht vor, dass eine kontinuierliche Positions- und Winkelregelung der Spiegelplatte während der Verfahrbewegung und der Messung erfolgt. Das ist dadurch bedingt, dass nicht selbsthemmende Aktoren eingesetzt werden. Zum Zeitpunkt der Messwertaufnahme müssen das Positions- und das Winkelrauschen sehr gering sein, da sie zufällige Messabweichungen verursachen und somit einen großen Einfluss auf die erreichbare Messunsicherheit besitzen. Das Winkelrauschen verursacht zusätzliche Längenmessabweichungen. Diese können nachträglich durch eine rechnerische Korrektur berücksichtigt werden. Verbleibende Regelabweichungen oder Schleppfehler während der Bewegung sind weitere Einflussfaktoren und werden in Abschnitt 6.4 betrachtet.

Das Positions- und das Winkelrauschen müssen aufgrund der Arbeitsweise der NPMM-200 für deaktivierte Aktoren (statischer Zustand) und aktivierte Aktoren (dynamischer Zustand) getrennt untersucht werden, um den Einfluss des Regelungssystems ermitteln zu können [91]. Die Zahlenwerte für das Rauschen bei deaktivierten Aktoren werden nachfolgend mit Hilfe der Standardabweichung s der Messwerte angegeben. Bei aktivierten Aktoren, d. h. wenn auf einen vorgegebenen Sollwert geregelt wird, wird das Rauschen mit Hilfe des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) quantifiziert. Für die Positionsregelung werden in der Signal- und Datenverarbeitungseinheit (SDPU) die Messwerte der Hauptstrahlen der Interferometer (x_0 , y_0 , z_0) verwendet. Deshalb werden nachfolgend nur diese betrachtet. In umfangreichen Voruntersuchungen im Rahmen dieser Dissertation wurde verifiziert, dass kein signifikanter Unterschied in der Signalqualität zwischen den Haupt- und den Nebenstrahlen der Interferometer existiert.

6.1.1 Statischer Zustand

Im statischen Zustand sind die Aktoren ausgeschaltet. In lateraler Richtung kann die Spiegelplatte frei im Raum positioniert werden. In vertikaler Richtung wird die Stellplattform mit der Spiegelplatte aufgrund der Gewichtskraft in die unteren mechanischen Endanschläge gedruck und ruht somit auf den in lateraler Richtung bewegten Plattformen. Unter diesen Bedingungen kann das permanente Signalrauschen ermittelt werden, das vorwiegend durch Vibrationen des mechanischen und optischen Grundaufbaus verursacht wird [91]. Letztere werden durch die Aufstellbedingungen (siehe Abschnitt 3.8), die Kabelführung der elektrischen und fluidischen Zuleitungen usw. beeinflusst.

Zur Ermittlung des Positions- und Winkelrauschens wurden mehrfach Wiederholungsmessungen durchgeführt und statistisch ausgewertet. In Abbildung 6.1 ist das Positionsrauschen der Langemesssignale über einen Zeitraum von 10 s für eine repräsentative Messung unter atmosphärischen Bedingungen und bei deaktivierter Raumklimatisierung dargestellt. Zwischen den einzelnen Langemesssignalen ist rechnerisch ein Offset dazu addiert, um alle drei Signale in einem Diagramm darstellen zu können.

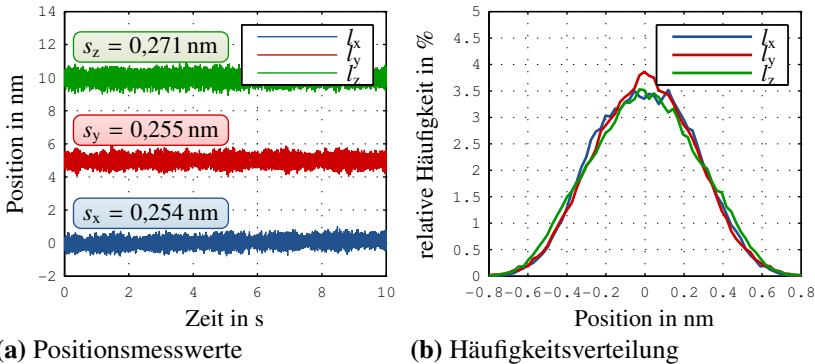


Abbildung 6.1: Positionsrauschen bei deaktivierten Aktoren

Außer dem Positionsrauschen ist auch eine dauerhafte Positionsänderung in x - und y -Richtung erkennbar. Da die Aktoren nicht selbsthemmend sind und keine Positionsregelung erfolgt, können sich die Stellplattformen lateral frei bewegen. Die Wegmessauflosung der Interferometer von 5 pm ist nicht erkennbar, da das permanente Positionsrauschen deutlich darüber liegt. Vor der

Ermittlung der Parameter für das Positions- und Winkelrauschen wurden die Driften durch Regressionen korrigiert. Anschließend weist das Positionsrauschen eine Spannweite von maximal ± 1 nm auf. Die Standardabweichungen der Positionsmesswerte betragen für alle Interferometerachsen weniger als 0,3 nm.

In Abbildung 6.2 sind die im selben Zeitraum aufgezeichneten Winkelmesswerte der Interferometer dargestellt. Es sind ebenfalls langsame zeitliche Änderungen erkennbar. Außerdem fällt auf, dass das Winkelrauschen um die z-Achse signifikant kleiner ist als um die x- bzw. y-Achse. Das ist mit der konstruktiven Ausführung des Positioniersystems zu erklären, da die Steifigkeit für die Drehung um die z-Achse erheblich größer ist (vgl. Abschnitt 4.2).

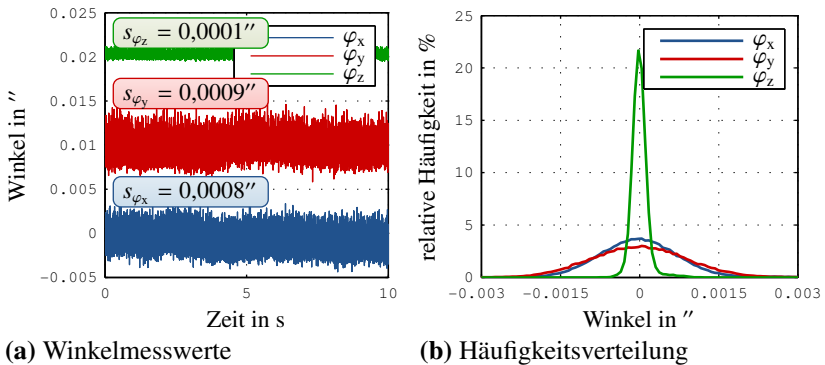


Abbildung 6.2: Rauschen der interferometrischen Winkelmessung bei deaktivierten Aktoren

Die Rauschmessungen wurden an unterschiedlichen lateralen Positionen im Messvolumen wiederholt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Länge der Messstrecke der Interferometer keinen signifikanten Einfluss auf das Positionsrauschen hat. Darüber hinaus wurde untersucht, inwiefern die Abschaltung des schwingungs isolierten Fundaments einen Einfluss auf das Rauschen bei deaktivierten Aktoren hat. Nach der Abschaltung und dem Entlüften der Dämpfer stützt sich das Fundament an jedem der vier Ausleger mit einem Metallfuß auf dem Laborboden ab. Es hat sich gezeigt, dass sich das Positionsrauschen dann um Faktor 12 und das Winkelrauschen um Faktor 8 verschlechtern.

In Tabelle 6.1 sind das Positions- und Winkelrauschen verschiedener im SFB 622 verfügbarer Nanopositioniersysteme mit lateralen Bewegungsbereichen > 50 mm gegenübergestellt. Die neben der NPMM-200 aufgeführten Systeme besitzen elektromagnetische Linearantriebe und die Position der Spiegelecke wird mit Laserinterferometern der Serie SP von der Firma SIOS Meßtechnik GmbH mit $0,1$ nm Auflösung gemessen [268]. Das System PMS-100 wird aerostatisch geführt, wohingegen in der NPMM-200 und dem NPMM-200-Demonstrator Wälzkörperführungen zum Einsatz kommen. Es wird deutlich, dass die NPMM-200 ein geringeres permanentes Positions- und Winkelrauschen aufweist als die anderen zwei Nanopositioniersysteme. Hierbei zeigt sich die Wirksamkeit des speziell für die NPMM-200 angepassten und optimierten, schwingungsgedämpften Fundaments im Laborraum (vgl. Abschnitt 3.8.2).

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung des Positions- und Winkelrauschens bei deaktivierten Antriebssystemen

Messgerät	s_x in nm	s_y in nm	s_z in nm	s_{φ_x} in "	s_{φ_y} in "	s_{φ_z} in "
PMS-100 [108]	0,41	0,33	0,36	–	–	0,0013
NPMM-200 Demonstrator	3,549	2,181	–	–	0,0137	0,0162
NPMM-200	0,254	0,255	0,271	0,0008	0,0009	0,0001

6.1.2 Dynamischer Zustand

Im dynamischen Zustand sind die Aktoren eingeschaltet und es erfolgt eine permanente Positions- und Winkelregelung der Spiegelplatte. Zur Untersuchung des Positions- und Winkelrauschens wurde als Sollposition für die Positionsregelung die Mitte des Messbereichs der NPMM-200 ($x = y = 100$ mm, $z = 12,5$ mm) vorgegeben. Abbildung 6.3 zeigt das Positionsruschen über einen Zeitraum von 10 s für eine repräsentative Messung unter atmosphärischen Bedingungen bei deaktivierter Laborklimatisierung.

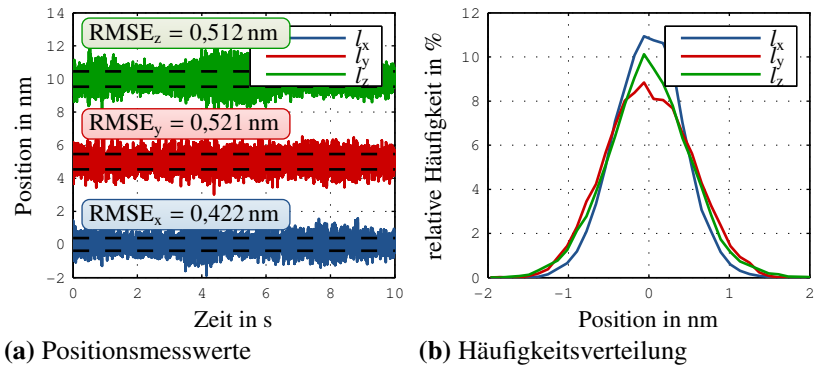


Abbildung 6.3: Positionsrauschen bei aktivierten Aktoren

Die RMSE-Werte aller drei Achsen liegen unterhalb von 1 nm. Im Vergleich zum statischen Zustand fällt auf, dass bei aktivierten Aktoren das Positionsrauschen ungefähr um Faktor 2 zunimmt. Es wird also durch die Qualität der Regelung beeinflusst. Die zeitgleich aufgezeichneten Winkelmesswerte sind in Abbildung 6.4 dargestellt.

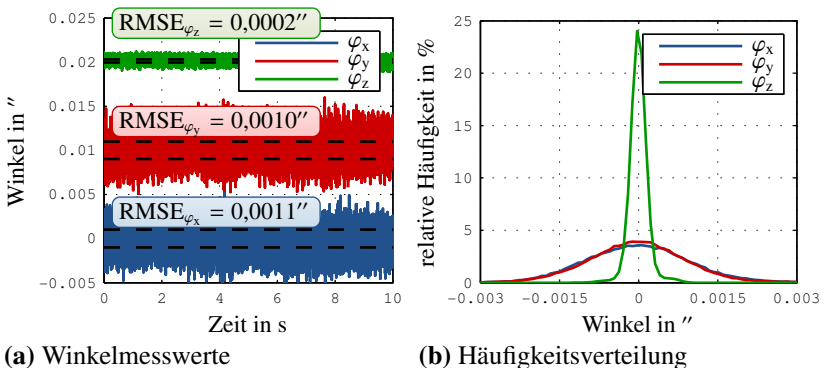


Abbildung 6.4: Rauschen der interferometrischen Winkelmessung bei aktivierten Aktoren

Tabelle 6.2 zeigt eine Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den anderen, im SFB 622 verfügbaren Nanopositioniersystemen. Es wird deut-

lich, dass die NPMM-200 ein um etwa 0,1 nm größeres Positions- und Winkelrauschen im dynamischen Zustand aufweist als die anderen zwei Nanopositioniersysteme. Vergleicht man die Werte mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.1.1, so ist die Ursache für das höhere Positionsrauschen auf die Einflüsse der Positions- und Winkelregelung sowie die Mechanik des Positioniersystems zurückzuführen.

Tabelle 6.2: Gegenüberstellung des Positions- und Winkelrauschens bei aktivierten Antriebssystemen

Messgerät	RMSE _x in nm	RMSE _y in nm	RMSE _z in nm	RMSE _{φ_x} in ″	RMSE _{φ_y} in ″	RMSE _{φ_z} in ″
PMS-100 [108]	0,33	0,45	0,45	–	–	0,0005
NPMM-200 Demonstrator	0,379	0,568	–	–	0,0144	0,0165
NPMM-200	0,422	0,521	0,512	0,0011	0,0010	0,0002

Die in Tabelle 6.2 gezeigten Werte wurden an einer Position im Messvolumen aufgezeichnet. Für die NPMM-200 wurde darüber hinaus das Positionsrauschen im dynamischen Zustand im gesamten Messvolumen charakterisiert. Hierzu wurde das Messvolumen lateral mit einem Raster von 2 mm unterteilt. Im Ursprung des Messgerätekoordinatensystems der NPMM-200 startend, wurden die einzelnen lateralen Positionen mäanderförmig angefahren. Nach einer kurzen Wartezeit von 1 s erfolgte die Datenspeicherung für 4 s. Die Messzeit für eine Ebene betrug etwa 23 h. Für jede Position wurde der RMSE der x-, y- und z-Positionsmesswerte berechnet. In Ergänzung wurde der resultierende RMSE_{xyz} berechnet:

$$\text{RMSE}_{xyz} = \sqrt{\text{RMSE}_x^2 + \text{RMSE}_y^2 + \text{RMSE}_z^2} \quad (6.1)$$

Diese Messungen wurden auf mehreren z-Positionen im Abstand von 5 mm zueinander wiederholt. Abbildung 6.5 zeigt die grafische Darstellung des RMSE_{xyz} exemplarisch für die Ebene z = 5 mm. Man erkennt, dass die mitt-

leren RMSE_{xyz} -Werte zwischen 0,9 nm und 1,5 nm liegen. Über den gesamten lateralen Bereich verteilt sind einzelne Ausreißer mit Spitzenwerten von bis zu 7 nm zu beobachten. Diese sind überwiegend auf zufällige Störeinflüsse aus der Umgebung zurückzuführen. Es fällt jedoch auf, dass in den Randbereichen des Messvolumens die RMSE_{xyz} -Werte prinzipiell etwas größer sind. Dies ist auf Winkelverkipnungen zurückzuführen und zeigt, dass ein geringes, parasitäres Übersprechen zwischen Positions- und Winkelregelung existiert. Außerdem ist zu beobachten, dass ab etwa 150 mm Entfernung zum Ursprung des Gerätekoordinatensystems das Positionsrauschen signifikant zunimmt, ebenfalls aufgrund von Verkipnungen der Spiegelplatte. Der Mittelwert aller RMSE_{xyz} -Werte beträgt 2,08 nm. Diesen Zahlenwert kann man auch als mittleres 3-D-Positionsrauschen der NPM-200 interpretieren.

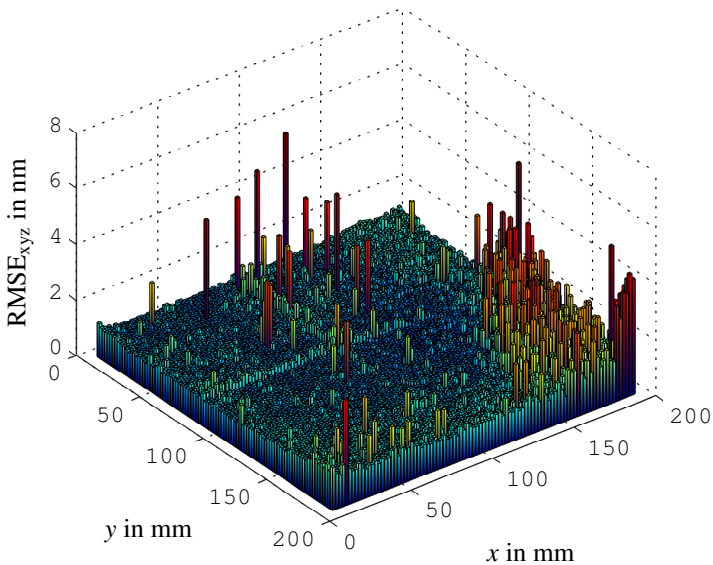


Abbildung 6.5: Ortsabhängiges Positionsrauschen RMSE_{xyz} bei $z = 5$ mm

6.2 Positionsauflösung

Die Positionsauflösung des Antriebssystems ist von den Eigenschaften der verwendeten Führungen, der Längen- und Winkelmesssysteme sowie des Regelungssystems abhängig. Um die Auflösung zu ermitteln, wurden in den einzelnen Achsen Positionsänderungen mit Schrittweiten von 1 nm bis 10 nm vorgegeben und die Längen- sowie Winkelmesssignale aufgezeichnet. Es erfolgte eine Winkelregelung um die Achsen x und y . In Abbildung 6.6 sind für die drei Achsen die Schritte und die Sollwerte in positiver Bewegungsrichtung und nachfolgend in negativer Richtung am Beispiel von 10 nm Schrittweite dargestellt.

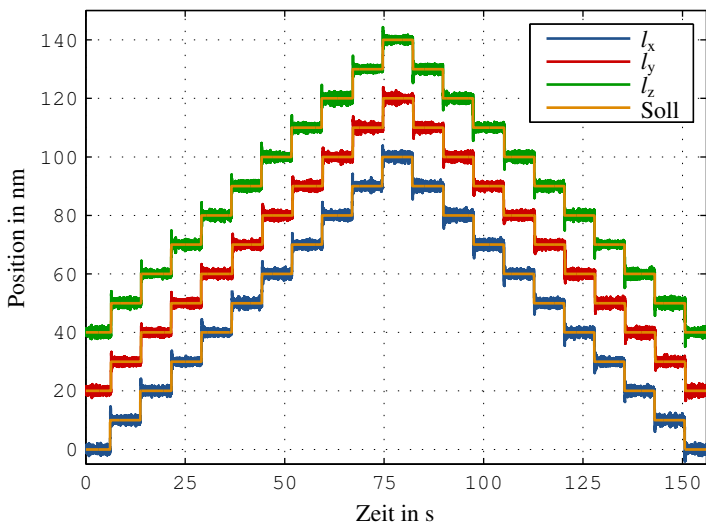


Abbildung 6.6: Positionsmeßwerte bei Vorgabe von Positionen mit Schrittweite 10 nm

Alle drei Achsen wurden gleichzeitig bewegt. Nach der Ausführung eines Schritts wird ca. 5 Sekunden auf diese Position geregelt und es tritt das zuvor untersuchte Positionsrauschen im dynamischen Zustand auf (vgl. Abschnitt 6.1.2). Abbildung 6.7 zeigt die Meßwerte bei Positionsänderungen von 2,5 nm, welche ebenfalls in den Rohmeßdaten ohne Filterung gut erkennbar sind.

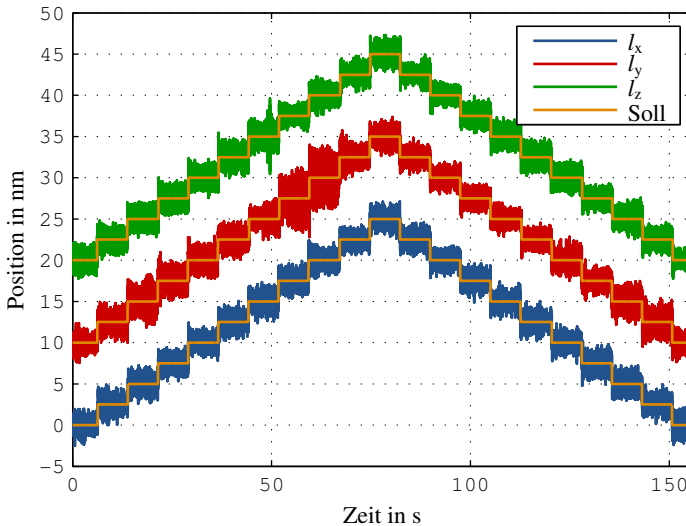


Abbildung 6.7: Positionsmesswerte bei Vorgabe von Positionen mit Schrittweite 2,5 nm

Des Weiteren wurden Messungen mit einer Schrittweite von 1 nm durchgeführt. Die kleineren Schritte können wegen des Positionsrauschens bei aktivierten Aktoren nur durch eine nachträgliche Filterung der Messdaten sichtbar gemacht werden (Abbildung 6.8). Ein gleitender Mittelwertbildner über 300 Messwerte wurde als Filter verwendet. Es ist zu bemerken, dass in den gefilterten Daten die Positionsauflösung der z-Achse etwas höher als die der lateralen Bewegungsachsen erscheint. Das ist im Hinblick auf typische Messaufgaben von Vorteil, da in der Regel für Scanmessungen die vertikale Achse als bevorzugte Messachse gewählt wird, weil sie eine deutlich geringere bewegte Masse besitzt. Die Sollposition dieser Achse wird dann entsprechend der Antastsystemsignale geregelt bzw. nachgeführt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle drei Achsen ein ähnliches Verhalten zeigen. Um die Positionierauflösung der NPMM-200 zu reduzieren, muss das permanente Positionsrauschen im statischen Zustand signifikant reduziert werden. Dann kann das Regelungssystem kleinere Schrittweiten realisieren. Die Auflösung der Interferometer beträgt 5 pm. Sie liegt

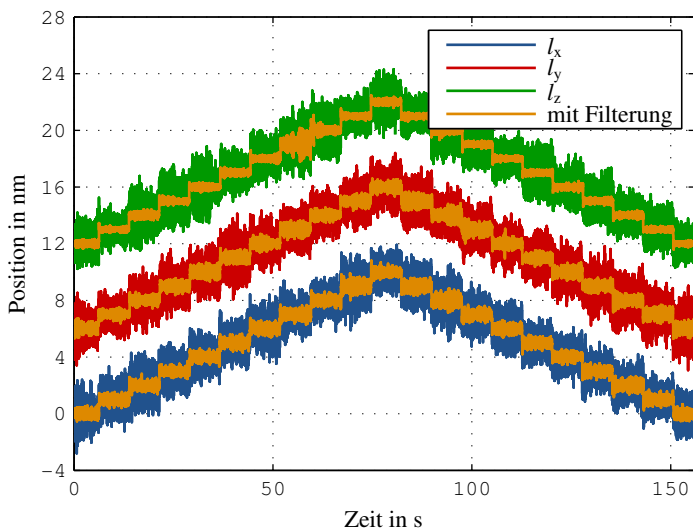


Abbildung 6.8: Gefilterte Positionsmesswerte bei Vorgabe von Positionen mit Schrittweite 1 nm

damit deutlich unterhalb des Positionsrauschens und stellt somit keine Limitierung dar.

6.3 Positionierreproduzierbarkeit

Zur Charakterisierung der Positionierreproduzierbarkeit wurden die Messungen zum Positionsrauschen im dynamischen Zustand im gesamten Messvolumen herangezogen (Abschnitt 6.1.2). Als Positionierreproduzierbarkeit wird die Wiederholbarkeit einer vorgegebenen Sollposition im Messvolumen bezeichnet. Sie wird somit von der Qualität der Regelung bestimmt. Zur Ermittlung der Positionierreproduzierbarkeit wurden an jeder Messposition des Punkterasters zusätzlich die Sollwerte bzw. Führungsgrößen, d. h. die Ausgänge der Positions- und Winkelregler, ausgewertet. Abbildung 6.9 zeigt exemplarisch für die Linie in y-Richtung von 0 mm bis 200 mm mit den Sollpositionen $x = 100$ mm und $z = 5$ mm den Verlauf der gemittelten Sollpositionen und die Spannweite der tatsächlichen Positionsmesswerte.

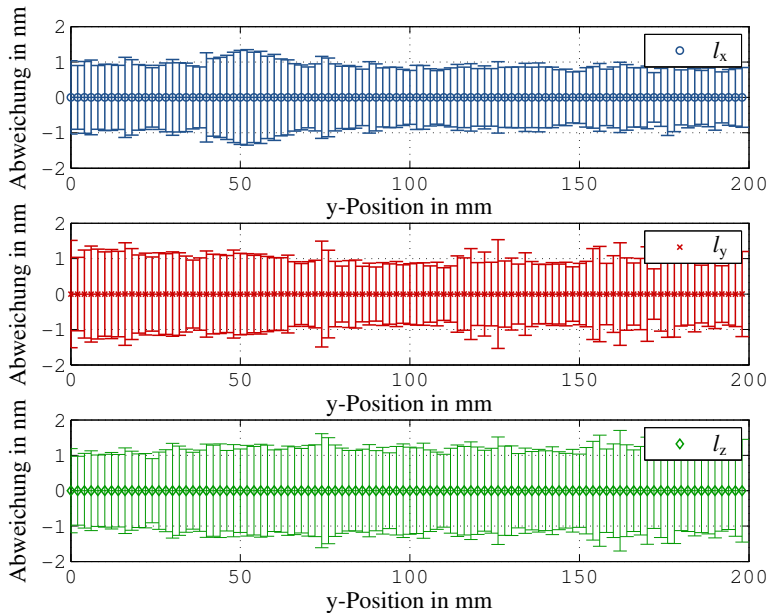


Abbildung 6.9: Positionierreproduzierbarkeit

Die Standardabweichungen der Sollpositionen betragen für alle Achsen an jeder untersuchten Position im Messvolumen $< 0,03$ nm. In diesem Beispiel weisen die tatsächlichen Positionsmesswerte maximale Streuungen von $\pm 1,6$ nm auf. Bei Messaufgaben mit höchsten Anforderungen an die Präzision ist es üblich, Messdaten an einem Punkt im Stillstand aufzuzeichnen und hinterher eine Mittelwertbildung über wenige Sekunden vorzunehmen. Für diesen Fall kann das Entwicklungsziel, eine Positionierreproduzierbarkeit < 1 nm zu realisieren, damit als erreicht betrachtet werden. Im nächsten Abschnitt wird nun untersucht, wie groß die Positionsabweichungen während der Bewegung ausfallen, also für die Anwendung der NPM-200 im Scanning-Messbetrieb.

6.4 Positionier- und Messdynamik

Um die Messdynamik zu erhöhen, geht der Trend dahin, Scanmessungen durchzuführen und Messpunkte während der Bewegung aufzuzeichnen. Die Bewegungsdynamik der NPMM-200 wird aus konstruktiver Sicht maßgeblich durch die bewegten Massen limitiert. Sie setzen sich aus den Massen der Stellplattformen, der mitbewegten Führungs- und Aktorelemente (insbesondere den Permanentmagneten) und der an das vergrößerte Messvolumen angepassten Spiegelplatte zusammen. Die lateralen Aktoren sind so dimensioniert, dass bei einem zulässigen Dauerstrom von $I = 3 \text{ A}$ eine maximale Beschleunigung von $0,445 \text{ m/s}^2$ erreicht werden kann. In vertikaler Richtung kann bei gleicher Bestromung und der Kompensation der Messobjektmasse mit Hilfe der GKK eine Beschleunigung von $5,3 \text{ m/s}^2$ erzielt werden.

Aus Sicht der Informations- und Signalverarbeitung sind das implementierte Regelungssystem und der Bahnplaner entscheidend (Abschnitt 3.6). Der Bahngenerator im CS gibt für die Bewegungen die Führungsgrößen der Positions- und Winkelregler vor und überträgt die entsprechenden Stellgrößen an die Antriebsverstärker. Der Anwender kann Grenzwerte für die Geschwindigkeit v , die Beschleunigung a und den Ruck j vorgeben. Diese Maximalgeschwindigkeit wird dann vektoriell entsprechend der Wege der einzelnen Achsen aufgeteilt. Die Grenzwerte müssen vom Anwender so gewählt werden, dass die Regler und das Positioniersystem den Führungsgrößen folgen können. Bei zu großen oder nicht aufeinander abgestimmten Werten treten große Positionsabweichungen von der Solltrajektorie auf.

Im Folgenden werden nun die erzielbaren Positioniereigenschaften des Gesamtsystems bei ein- und mehrdimensionalen Bewegungen untersucht. Dabei wird zwischen verschiedenen typischen Bewegungsprofilen unterschieden. Zur Grobpositionierung, für optische Scanmessungen, etc. müssen schnelle Großstellbewegungen mit Geschwindigkeiten $\geq 1 \text{ mm/s}$ und Wegstrecken üblicherweise $> 10 \text{ mm}$ realisiert werden (Abschnitt 6.4.1). Antastvorgänge oder Scanmessungen mit Rastersondenverfahren (z. B. AFM-Messungen) erfolgen meist in Richtung der Achsen des Gerätekoordinatensystems und erfordern hingegen langsame Bewegungen mit Maximalgeschwindigkeiten $< 100 \text{ }\mu\text{m/s}$ und Wegstrecken typischerweise $< 1 \text{ mm}$ (Abschnitt 6.4.2). Taktile Scanmessungen mit 3-D-Mikrotastern werden ebenfalls bei Geschwindigkeiten $< 100 \text{ }\mu\text{m/s}$ ausgeführt, jedoch kann sich die Bewegungsrichtung häu-

fig ändern, insbesondere bei Freiform-Scanmessungen. Um die Positioniereigenschaften für dieses Anwendungsfeld zu charakterisieren, werden abschließend in Abschnitt 6.4.3 Kreisbewegungen mit unterschiedlichen Radien und Verfahrensgeschwindigkeiten verglichen.

6.4.1 Schnelle Großstellbewegungen

Bei schnellen Bewegungen sind die größten Winkelabweichungen der Spiegelplatte zu erwarten. Solche Winkelabweichungen sind kritisch, weil sie zu Längenmessabweichungen der Interferometer führen können. Darüber hinaus muss der Kippwinkel während der Bewegung $< 1'$ betragen, da ansonsten die interferenzoptische Auswertung unterbrochen wird (siehe Abschnitt 3.4.2). Zum Erfassen der im Betrieb auftretenden maximalen Winkelabweichungen wurden Messungen mit Bewegungen entlang der einzelnen Koordinatenachsen und mit gleichzeitiger Bewegung aller drei Achsen durchgeführt. In lateraler Richtung wurden Positionsänderungen von $\Delta s = 180$ mm und in vertikaler Richtung von $\Delta s = 24$ mm vorgegeben. In Abbildung 6.10 sind die Positions- und die zeitgleich aufgezeichneten Winkelmesswerte bei gleichzeitiger Bewegung aller drei Achsen am Beispiel von $v = 1$ mm/s dargestellt.

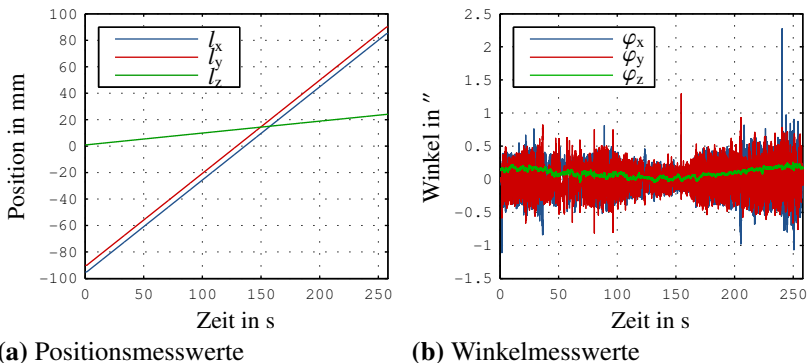


Abbildung 6.10: Positions- und Winkelmesswerte bei Bewegung aller drei Achsen mit $v = 1$ mm/s

Die Messungen wurden mehrfach wiederholt, wobei immer die gleiche Startposition angefahren wurde. Die maximale Geschwindigkeit v variierte

in Grenzen von 0,5 mm/s bis 6 mm/s. Der Messpunktabstand wurde bei allen Messungen mit 1 μm angegeben. Die maximalen Abweichungen der gegebenen Winkel um die Achsen x und y liegen bei diesen Experimenten während der Verfahrbewegung mit $\pm 1''$ deutlich unterhalb der zulässigen Grenzen und beeinflussen die interferenzoptische Auswertung somit nicht. Die RMSE der Winkelregelungsabweichungen betragen am Beispiel der in Abbildung 6.10 dargestellten Messung 0,209'' für den Kippwinkel um die x -Achse und 0,212'' um die y -Achse. Die Drehung φ_z wird nicht geregelt. Deshalb ändert sich der Drehwinkel entsprechend den Führungsabweichungen. Da das Positioniersystem in dieser Richtung eine deutlich höhere Steifigkeit aufweist, ist die Standardabweichung von φ_z ungefähr 3fach kleiner und beträgt 0,062''. Bei den Wiederholungsmessungen wurden ähnliche Verläufe der Winkelabweichungen festgestellt, sodass sie auf systematische Abweichungen der Führungen zurückzuführen sind. Abbildung 6.11 zeigt die Positionierabweichung während dieser dreiachsigen Bewegung.

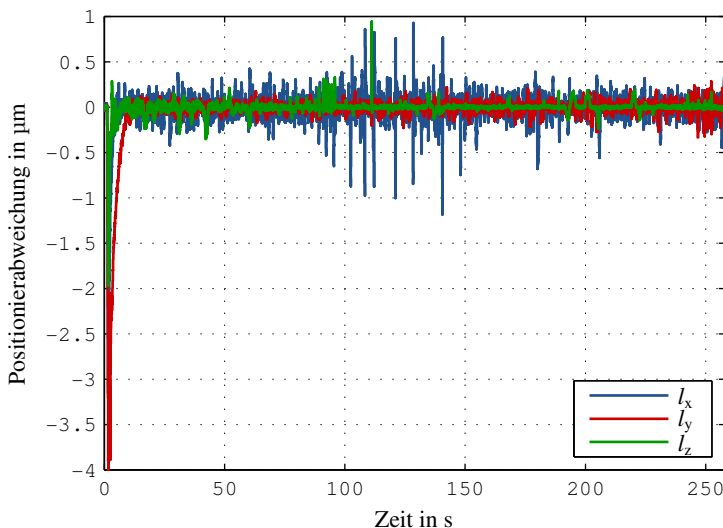


Abbildung 6.11: Positionierabweichungen in den drei Achsen ($v = 1 \text{ mm/s}$)

Zu Beginn der Bewegung treten in allen drei Achsen Abweichungen von mehreren Mikrometern in negativer Richtung auf. Diese sind sogenannte Schleppefehler und sie werden durch die Trägheit der Stellplattformen und

durch Reibungseffekte verursacht. Trotz der im Regelungskonzept integrierten Störgrößenbeobachter, die speziell auf die Kompensation dieser nicht-linearen Reibungseffekte ausgelegt sind, gelingt es nicht, diese Schleppfehler vollständig zu reduzieren. Nach diesem Anfahren erfolgt eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit. Dann gelingt es dem Regelungssystem gut, die auftretenden Positionsabweichungen auszugleichen. Abgesehen von wenigen Ausreißern, die durch Verunreinigungen des Führungssystems oder äußere Einflüsse bedingt sind, betragen die maximalen Positionsabweichungen während der Verfahrbewegung ± 300 nm. Die mittleren Bahnabweichungen können mit weniger als 150 nm angegeben werden. Für Scanmessungen mit optischen Sensoren, die derzeit typischerweise bei $v \approx 1$ mm/s erfolgen, ist dies akzeptabel, da die Positionierabweichungen unterhalb der lateralen Auflösungsgrenze der meisten optischen Sensoren liegen.

Der Schleppfehler zu Beginn der Bewegung lässt sich nur durch Reduzierung der Beschleunigung auf etwa $1/5$ des theoretisch berechneten Werts auf weniger als 500 nm reduzieren. Dann dauert jedoch die Phase bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit sowie der Abbremsvorgang und somit die ganze Bewegung deutlich länger. Außerdem können dann Bahnabweichungen während der Bewegung nicht so dynamisch ausgeregelt werden und die mittleren Bahnabweichungen sind während aller Phasen der Bewegung größer als 400 nm. Deshalb ist ein Kompromiss zu finden zwischen den vom Benutzer tolerierbaren Bahnabweichungen zu Beginn und während der Bewegung. In den meisten Fällen sollte die Beschleunigung jedoch für schnelle Großstellbewegungen während einer Messung möglichst hoch gewählt werden, um die benötigte Zeit für die Bewegung zu reduzieren.

Anhand der durchgeführten Messreihen lässt sich darüber hinaus untersuchen, inwiefern die Positionierabweichungen von der Verfahrgeschwindigkeit abhängen. Hierzu wird der RMSE in den einzelnen Verfahrachsen unter der Randbedingung berechnet, dass die Bewegung mit einer hohen Beschleunigung erfolgt. Die Schleppfehler zu Beginn der Bewegung werden in die Berechnung der RMSE bei allen Messungen mit einbezogen. Abbildung 6.12a zeigt die RMSE aller drei Achsen bei alleiniger Bewegung in x-Richtung. In Abbildung 6.12b wurde die Bewegungsrichtung um 90° gedreht, d. h. es wurde in y-Richtung verfahren. Die Ergebnisse für die ausschließliche Bewegung in z-Richtung sind nicht dargestellt, da in dieser Achse eine signifikant kürzere Wegstrecke zur Verfügung steht und deshalb nur deutlich weniger

Messpunkte aufgezeichnet werden können. Dann sind die RMSE nicht unmittelbar vergleichbar mit denen der lateralen Bewegungsachsen. Ein weiterer Grund ist, dass bei typischen Messaufgaben in der Regel nur schnelle Großstellbewegungen in lateraler Richtung erfolgen. Sollte auch eine vertikale Richtungskomponente enthalten sind, beträgt die Geschwindigkeit in der vertikalen Achse meist < 1 mm/s aufgrund der vektoriellen Aufteilung im Bahngenerator der vom Benutzer vorgegebenen Maximalgeschwindigkeit.

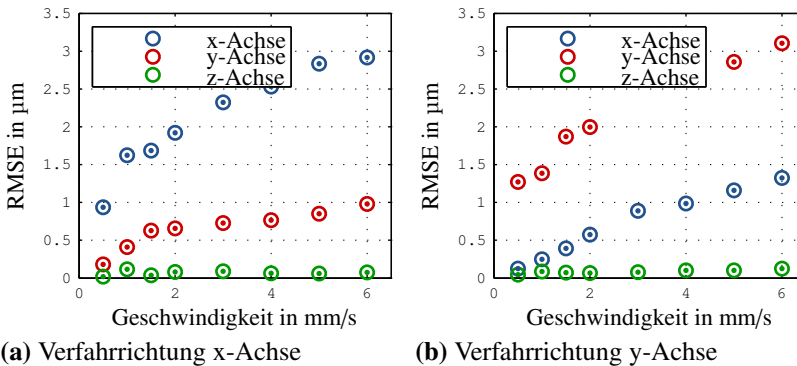


Abbildung 6.12: RMSE der Positioniersabweichungen der lateralen Bewegungsachsen in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

Es wird deutlich, dass das Regelungssystem aufgrund der begrenzten Dynamik durch die Trägheit der Stellplattformen nicht in der Lage ist, bei zunehmender Geschwindigkeit die Positionier- und auch die Winkelabweichungen vollständig auszuregulieren. Deshalb steigen die RMSE an. In der lateralen Bewegungsachse jeweils senkrecht zur Verfahrenrichtung ist dieser Anstieg ebenfalls in abgeschwächter Form zu beobachten. Das deutet auf eine gegenseitige Beeinflussung der lateralen Bewegungsachsen in geringem Maße hin. Dies wurde jedoch nicht detailliert untersucht, da die Auswirkungen auf typische Messaufgaben mit optischen Sensoren bei z. B. mäanderförmigen Scanbewegungen mit $v \approx 1$ mm/s vernachlässigbar sind. In der z-Achse tritt unabhängig von der lateralen Bewegungsrichtung kein Anstieg der RMSE auf.

Bei der Durchführung und dem Vergleich dieser Messreihen muss auch der Einfluss der Abtastfrequenz f berücksichtigt werden. Der minimale Abstand

zwischen zwei Messpunkten Δs hängt von f und der Verfahrgeschwindigkeit v ab:

$$\Delta s = \frac{v}{f} \quad (6.2)$$

Eine feinere Ortsauflösung ist in Bewegungsrichtung nicht möglich. Demzufolge stellt die Abtastfrequenz eine Limitierung für die Qualität der Positions- und Winkelregelung dar. Das CS führt die Positionsregelung derzeit mit 8,3 kHz aus. Dann beträgt bei einer Verfahrgeschwindigkeit von bis zu 6,0 mm/s, wie sie für optische Scanmessungen gebräuchlich ist [187], der minimale Messpunkt Abstand 720 nm. Eine Erhöhung des Regeltakts kann zu einer Verbesserung der Reglerqualität beitragen, denn dadurch reduziert sich der minimale Wegpunkt Abstand zwischen der Erfassung zweier Messpunkte während einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 6.13). Als Konsequenz verringern sich auch die mittleren Regelabweichungen.

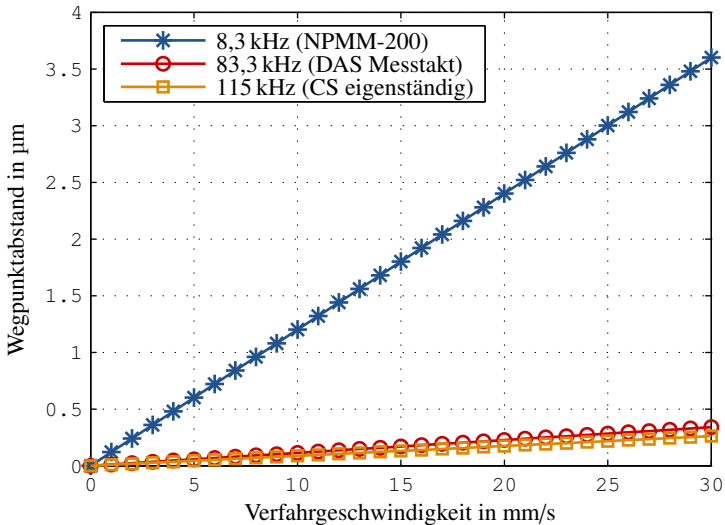


Abbildung 6.13: Minimal möglicher Abstand zwischen zwei Messpunkten in Abhängigkeit von der Regelfrequenz (siehe Gleichung 6.2)

Die aktuelle Struktur der Informations- und Signalverarbeitung der NPMM-200 bedingt, dass die Leistungsfähigkeit der Messdatenerfassung

im DAS, die mit 83,3 kHz erfolgt, bei weitem nicht ausgeschöpft wird. Es wird nur jeder zehnte Wert an das CS zur Positionsregelung übertragen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die derzeitige Implementierung des Regelungssystems auf dem CS im eigenständigen Betrieb eine Regelungsfrequenz von maximal 115 kHz erreichen kann [322], was den Wegpunktabstand bei $v = 6 \text{ mm/s}$ auf 52 nm verringert. In Abbildung 6.13 ist der minimal mögliche Messpunktabstand bis zu der angestrebten Verfahrensgeschwindigkeit von 30 mm/s für den derzeitigen Regeltakt der NPMM-200 (8,3 kHz), den Messtakt im DAS (83,3 kHz) und die maximale Regelungsfrequenz aus [322] (115 kHz) dargestellt.

6.4.2 Langsame Bewegungen

Langsame Bewegungsvorgänge treten typischerweise beim Antasten der Messobjektoberfläche und bei Scanmessungen auf. Bei Antastvorgängen werden in der Regel keine Messdaten gespeichert. Bei Scanmessungen hingegen werden die Messpunkte während der Bewegung aufgezeichnet, so dass die Regelungseigenschaften dann entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse haben. Beim Einsatz der NPMM-200 als Bearbeitungsmaschine spielen diese örtlichen Regelungsabweichungen ebenfalls eine überaus wichtige Rolle, da sie die Reproduzierbarkeit und die Form der aufgebrachten bzw. manipulierten Strukturen bestimmen. Deshalb müssen die Regelungsabweichungen so gering wie möglich sein, um eine hohe Reproduzierbarkeit und dementsprechend kleine Messunsicherheiten zu erhalten. Um das Positionierverhalten diesbezüglich zu charakterisieren, wurden Messungen mit Geschwindigkeiten von $0,25 \text{ }\mu\text{m/s}$ bis $50 \text{ }\mu\text{m/s}$ entlang der einzelnen Koordinatenachsen und mit gleichzeitiger Bewegung aller drei Achsen durchgeführt. Die vorgegebene Positionsänderung betrug $\Delta s = 100 \text{ }\mu\text{m}$. Die Messdatenaufzeichnung umfasste Hin- und Rückbewegung.

In Abbildung 6.14 sind die aufgezeichneten Positionsmesswerte am Beispiel einer Bewegung mit einer Geschwindigkeit von $5 \text{ }\mu\text{m/s}$ entlang der x-Achse dargestellt. Die maximalen Regelungsabweichungen der Positionsmesswerte der senkrecht zur Verfahrriichtung liegenden Achsen betragen etwa $\pm 15 \text{ nm}$ für die y-Achse und ca. $\pm 8 \text{ nm}$ für die z-Achse. Die mittleren Positionierabweichungen in Verfahrriichtung betragen $\text{RMSE}_x = 10,91 \text{ nm}$. Die RMSE in y- und z-Richtung sind um etwa Faktor 2 bzw. Faktor 4 kleiner.

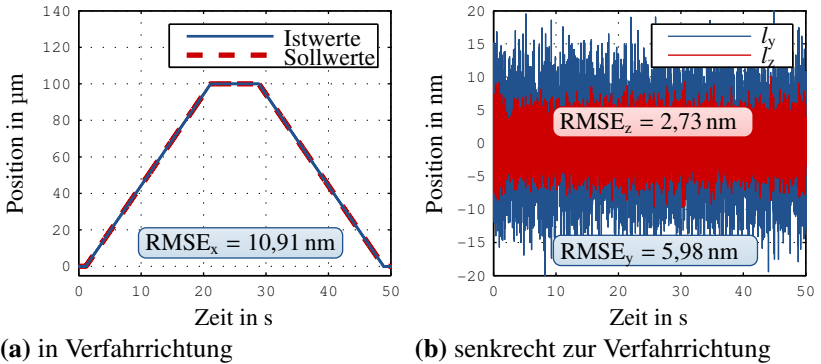


Abbildung 6.14: Positionsmesswerte bei einer Bewegung entlang der x-Achse mit $v = 5 \mu\text{m/s}$

Die simultan aufgezeichneten Winkelmesswerte zeigt Abbildung 6.15. Es ist ersichtlich, dass die Winkelabweichungen um die Achsen x und y bei kleinen Geschwindigkeiten gut ausgegletzt werden. Die RMSE betragen für φ_x

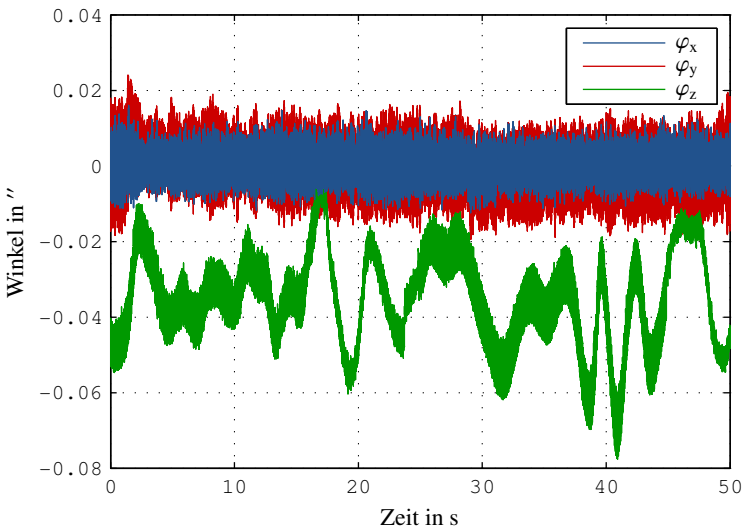


Abbildung 6.15: Winkelmesswerte bei einer Bewegung entlang der x-Achse mit $v = 5 \mu\text{m/s}$

etwa $0,0049''$ und für φ_y ca. $0,0069''$. Sie sind kleiner als die Standardabweichung der Winkelmesswerte φ_z , die $0,0104''$ beträgt. Das ist darauf zurückzuführen, dass keine Winkelregelung um die z-Achse erfolgt. Diese Winkelabweichungen sind für die Abschätzung der Messunsicherheiten der NPM-200 relevant, da sie die Längenmesswerte direkt beeinflussen.

Bei langsamen Bewegungen kommen die Störgrößenbeobachter auf Kalman-Filter-Basis während des Anfahrvorgangs besonders zum Tragen. Dies wird deutlich, wenn man die bisher diskutierten Messungen mit variierender Geschwindigkeit und Positionsänderungen von $\Delta s = 100 \mu\text{m}$ bei vorübergehend deaktivierten Störgrößenbeobachtern in allen drei Verfahrachsen wiederholt. Abbildung 6.16a vergleicht die Positionierabweichungen bei aktivierten und deaktivierten Störgrößenbeobachtern am Beispiel einer Verfahrbewegung in x-Richtung mit $v = 5 \mu\text{m/s}$. Es zeigt sich, dass die Kalman-Filter das nichtlineare Stick-Slip-Verhalten und die Trägheitseffekte sehr gut kompensieren können.

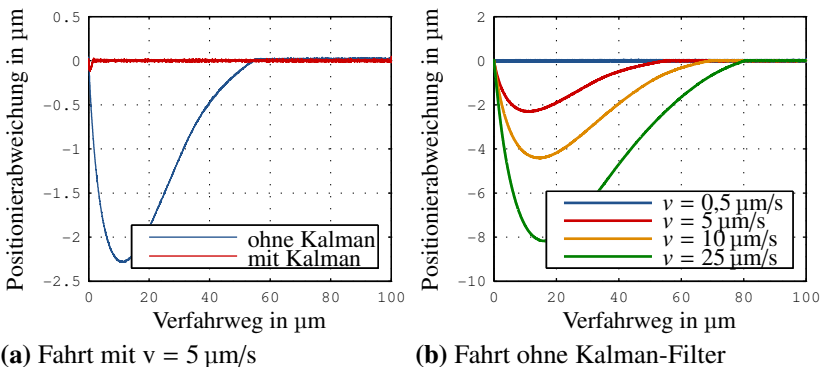


Abbildung 6.16: Positionierabweichungen in Verfahrrichtung (positive x-Richtung) mit deaktivierten und aktivierten Störgrößenbeobachtern

In Abbildung 6.16b sind die Positionierabweichungen bei Fahrt ohne Störgrößenbeobachter für verschiedene Geschwindigkeiten dargestellt. Dabei fällt auf, dass der Betrag der maximalen Positionierabweichungen mit steigender Geschwindigkeit signifikant zunimmt. Außerdem steigt auch die zurückgelegte Wegstrecke an, die zur Ausregelung des anfänglichen Schleppfehlers benötigt wird. Ergänzend zeigen die Darstellungen in Abbildung 6.17 einen

Vergleich der RMSE-Werte für Fahrten in x-, y- und z-Richtung. Im Endergebnis bleibt festzuhalten, dass alle drei Achsen ein ähnliches Regelungsverhalten zeigen. Die Störgrößenbeobachter auf Kalman-Filter-Basis kompensieren die nichtlinearen Reibungs- und Trägheitseffekte über einen großen Geschwindigkeitsbereich gut und sind für Messaufgaben unbedingt zu aktivieren. Die dann erzielbaren Positioneigenschaften mit RMSE-Werten $< 50 \text{ nm}$ bei Verfahrgeschwindigkeiten in der Größenordnung von $\approx 15 \mu\text{m/s}$ erfüllen die heutigen, an die NPMM-200 gestellten Anforderungen als Mess- und Bearbeitungsgerät. Vergleichsmessungen mit einem Probekörper mit einer Masse von 500 g auf der Spiegelplatte, was typischen Messobjektmassen entspricht, zeigen keine negative Beeinflussung des Regelungsverhaltens.

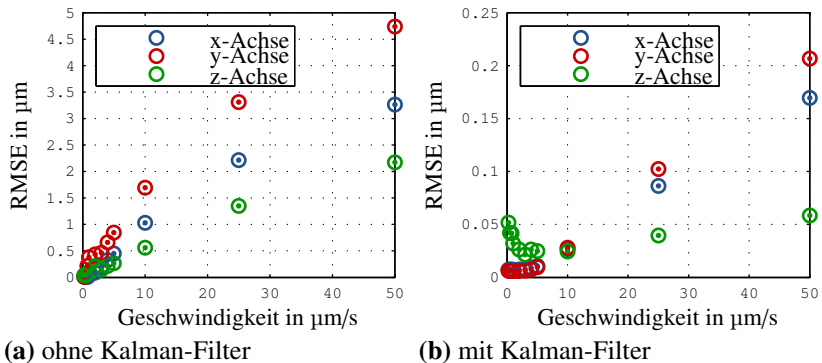


Abbildung 6.17: RMSE in Verfahrrichtung bei Fahrt in x-, y- oder z-Richtung

6.4.3 Kreisbewegung

Mit dem Ziel, die Positioneigenschaften der NPMM-200 für Trajektorien mit sich stetig änderndem Bewegungsvektor (bspw. taktile oder optische Freiform-Scannmessungen an gekrümmten Oberflächen) zu charakterisieren, werden in diesem Abschnitt Experimente mit Kreisbewegungen analysiert. Kreisförmige Trajektorien eignen sich deshalb, weil sie vom Bahngenerator gut berechnet werden können und sie dadurch gekennzeichnet sind, dass sich die Richtung des Bewegungsvektors während der Bewegung stetig ändert.

Dadurch treten kontinuierlich Querschleunigungen auf. Bei den durchgeführten Experimenten handelt es sich um das Abfahren von Kreisbögen mit 720° in der xy -Ebene mit unterschiedlichen Radien von 20 nm bis 90 mm und angepassten Verfahrgeschwindigkeiten zwischen 5 nm/s und 3 mm/s. Für die z -Position wurde 10 mm vorgegeben. Für jede Messung werden zur Bewertung der Reglergüte die RMSE in x -, y - und z -Richtung sowie der kombinierte $RMSE_{xyz}$ (nach Gleichung 6.1) berechnet. Abbildung 6.18 zeigt beispielhaft die Positionsmesswerte und Positionierabweichungen für eine makroskopische kreisförmige Bewegung mit einem Radius $r = 50$ mm bei einer Geschwindigkeit $v = 3$ mm/s.

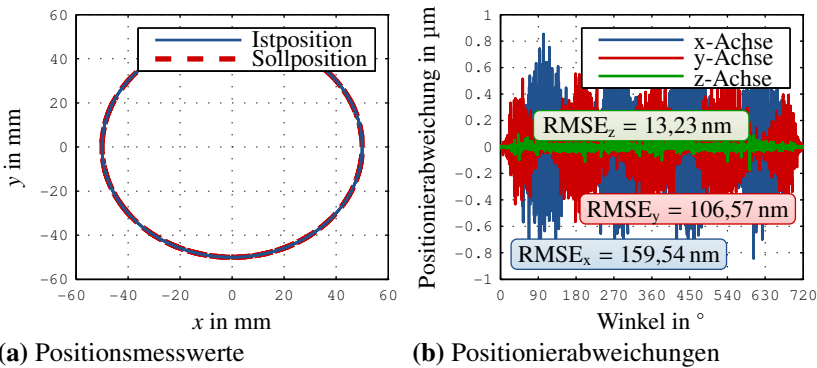


Abbildung 6.18: Kreisförmige Bewegung mit $r = 50$ mm bei $v = 3$ mm/s

Die maximalen Positionierabweichungen treten an Kurvenorten auf, wo eine der Achsen die Bewegungsrichtung umkehren muss. Sie betragen bis zu ± 800 nm. Der $RMSE_{xyz}$ ist mit 192,32 nm in Anbetracht des Kreisdurchmessers und der Verfahrgeschwindigkeit als klein einzustufen. In Ergänzung hierzu zeigt Abbildung 6.19 kreisförmige Bewegungen auf Nanometerebene am Beispiel eines Kreises mit einem vorgegebenen Radius von $r = 100$ nm und einer maximalen Verfahrgeschwindigkeit von 100 nm/s. Eine Übersicht der berechneten mittleren Bahnabweichungen $RMSE_{xyz}$ aller untersuchten Kreisbewegungen in Abhängigkeit von der logarithmisch aufgetragenen Verfahrgeschwindigkeit v zeigt Abbildung 6.20. Die Bahnabweichungen steigen bei konstantem Kreisbogenradius r an, je höher die maximale Verfahrgeschwindigkeit ist. Das ist mit einem Anstieg der Querschleunigung zu erklären.

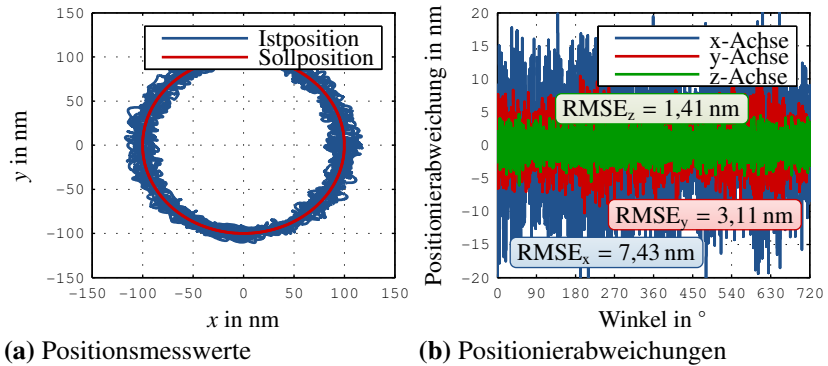


Abbildung 6.19: Kreisförmige Bewegung mit $r = 100 \text{ nm}$ bei $v = 100 \text{ nm/s}$

Außerdem ist zu erkennen, dass die $RMSE_{xyz}$ allgemein anwachsen, je höher die gewählte Bahngeschwindigkeit ist. Für Geschwindigkeiten $< 2 \text{ mm/s}$ beträgt die mittlere Bahnabweichung weniger als 150 nm . Vergleicht man diese

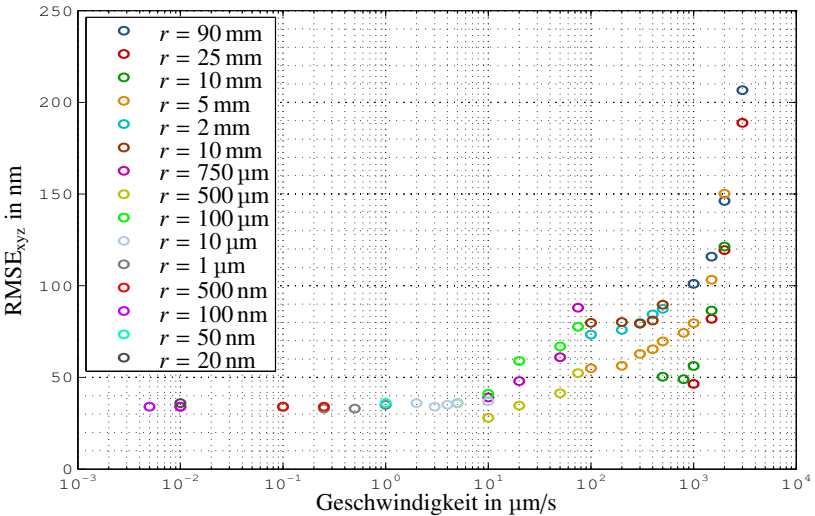
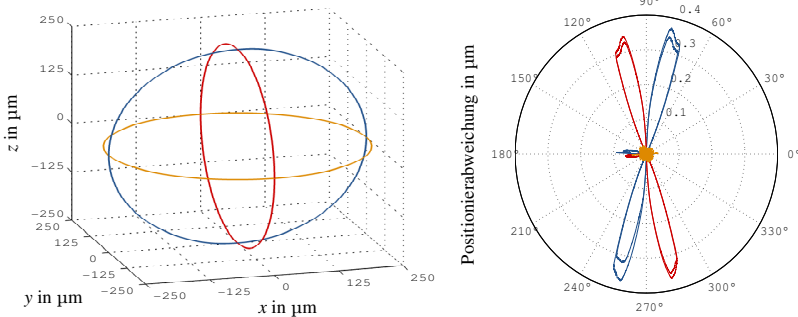


Abbildung 6.20: Positionierabweichungen bei kreisförmiger Bewegung in Abhängigkeit von Kreisradius r und Geschwindigkeit v

Ergebnisse mit den mittleren Bahnabweichungen bei schnellen, geradlinigen Bewegungen entlang einer Koordinatenachse (Abschnitt 6.4.1), stehen diese auf den ersten Blick im Widerspruch, da bei geradliniger Bewegung mit $v > 1 \text{ mm/s}$ die RMSE in Verfahrrichtung im Mikrometerbereich liegen. Bedenkt man jedoch, dass bei den geradlinigen Bewegungen die durch Reibeffekte bedingten Bahnabweichungen beim Anfahren mit in die Berechnung einfließen und wertet für die Berechnung des RMSE nur die Bewegungsphase mit annähernd konstanter Verfahrsgeschwindigkeit aus, zeigen die erzielten Ergebnisse bei geradliniger und kreisförmiger Bewegung eine gute Übereinstimmung.

Die bisherigen Betrachtungen beschränkten sich auf 2-D-Kreise in der xy -Ebene. Deshalb wurden identische Messreihen in den anderen Hauptebenen des Gerätekoordinatensystems, also der yz - und der xz -Ebene, durchgeführt, um auch das Positionierverhalten der z -Achse bei kreisförmigen Bewegungen beurteilen zu können. In Abbildung 6.21 sind die gemessenen Positionswerte die zugehörigen Positionierabweichungen in Abhängigkeit vom Winkel auf der Kreisbahn dargestellt.



(a) Positionsmesswerte

(b) Positionierabweichungen

Abbildung 6.21: Kreisförmige Bewegungen ($r = 250 \mu\text{m}$, $v = 50 \mu\text{m/s}$) in den Ebenen des Gerätekoordinatensystems: rot – xz -Ebene, blau – yz -Ebene und gelb – xy -Ebene

Im Vergleich zu den vorhergehenden Betrachtungen lässt sich ein anderes Positionierverhalten beobachten. Bei der Bewegungsumkehr in z -Richtung bei etwa 90° bzw. 270° sind signifikante Positionierabweichungen zu beob-

achten. Bei Betrachtung der Verfahrrichtung fällt auf, dass diese Schleppfehler nach der Bewegungsumkehr auftreten, d. h. nachdem die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung nahe Null war. Mit Hilfe einer Parameteroptimierung des Positionsreglers und des Störgrößenbeobachters der z-Achse konnten die maximalen Positionierabweichungen in diesem Fall um den Faktor 4 auf ca. 350 nm reduziert werden. Als Hauptursache für dieses Verhalten werden nichtlineare Reibungseffekte in den GKK-Einheiten vermutet, die in Einzelmessungen nachgewiesen werden konnten. Eine Analyse der Ursachen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Zum Abschluss der Untersuchungen wurden Kreisbögen mit 720° bei simultaner Bewegung aller drei Bewegungsachsen abgefahren (Abbildung 6.22). Das geschilderte Regelungsverhalten konnte auch bei diesen Messreihen beobachtet werden. Ergänzende Messungen mit einer Zusatzmasse von 500 g, welche auf die Spiegelplatte in die mittige Aussparung gelegt wurde, haben gezeigt, dass die maximalen Positionierabweichungen bei 3-D-Kreisbahnen trotzdem weniger als 400 nm betragen.

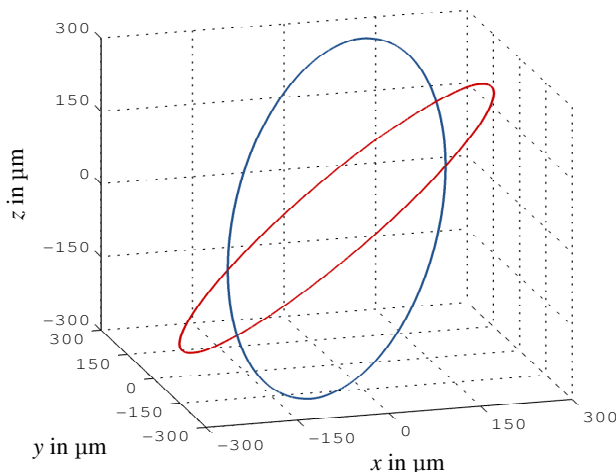


Abbildung 6.22: Dreiachsige Kreisbewegung: blau – Normalenvektor der Kreisebene ist $(-1,1,0)$, rot – Normalenvektor der Kreisebene ist $(-1,1,1)$

6.5 Reproduzierbarkeit der Zentrierposition

In der NPMM-200 werden elektromagnetische, kommutierte Linearmotoren mit zwei Phasen für die lateralen Bewegungsachsen eingesetzt. Nach dem Einschalten des Messgeräts wird eine Referenzfahrt durchgeführt, bei der die Zähler der interferometrischen Längenmesssysteme mit Hilfe der konfokalen Nullpunktsensoren initialisiert werden und somit der Bezug zum Gerätekoordinatensystem hergestellt wird. Vor dem Beginn der Referenzfahrt sind jedoch die gegenwärtigen Positionen der Spiegelplatte respektive der Stellplattformen der einzelnen Bewegungsachsen unbekannt. Es kann sogar vorkommen, dass aufgrund von Verkipnungen der Spiegelplatte die zulässigen Winkeltoleranzen für die interferometrischen Längenmesssysteme überschritten sind und keine interferenzoptische Auswertung möglich ist.

Deshalb wird die Spiegelplatte vor Beginn der Referenzfahrt zunächst in vertikaler Richtung mit einem Strom $I = 2 \text{ A}$ in die unteren mechanischen Endanschlüsse gedrückt. Dadurch werden anfängliche Verkipnungen aufgehoben und die interferenzoptische Längenmessung wird ermöglicht. In den Achsen x und y sind aufgrund der Kommutierungs- bzw. Teilungsperiode $t = 76 \text{ mm}$ (Abschnitt 4.3.3.1), die kleiner als die Messlänge l_{ges} ist und sich somit mehrfach wiederholt, keine eindeutigen Positionseinstellungen durch Vorgabe eines Stroms möglich. Deshalb werden jeweils beide Aktorspulen einer Spulenbaugruppe wechselsinnig bis zu einem festgelegten Maximalstrom, dem sogenannten Zentrierstrom I_z , bestromt. Die resultierende Kraftwirkung sorgt dafür, dass die x - und y -Stellplattformen jeweils in eine der drei Übergangsstellen der Kommutierungsfunktionen, auch als Zentrier- oder Rastpositionen bezeichnet, bewegt werden (Abbildung 6.23). Diese befinden sich ausgehend von einem Koordinatensystem mit einem Verfahrbereich von $\pm 100 \text{ mm}$, also der Mittelposition des Gerätekoordinatensystems der NPMM-200, bei den Positionen 0 mm und $\pm 76 \text{ mm}$. Von einer solchen Rastposition ausgehend kann dann die Positionsregelung und somit die Kommutierung der Aktorströme aktiviert und die Referenzfahrt zur Suche des Ursprungs des Gerätekoordinatensystems begonnen werden.

Es stellt sich nun die Frage, inwiefern die Höhe des Zentrierstroms I_z die Reproduzierbarkeit der Zentrierposition beeinflusst. Hierzu wurden Messreihen durchgeführt, bei denen der Zentrierstrom I_z in einem Intervall von $0,5 \text{ A}$ bis 3 A in Schritten von $0,5 \text{ A}$ für eine laterale Bewegungsachse vorgege-

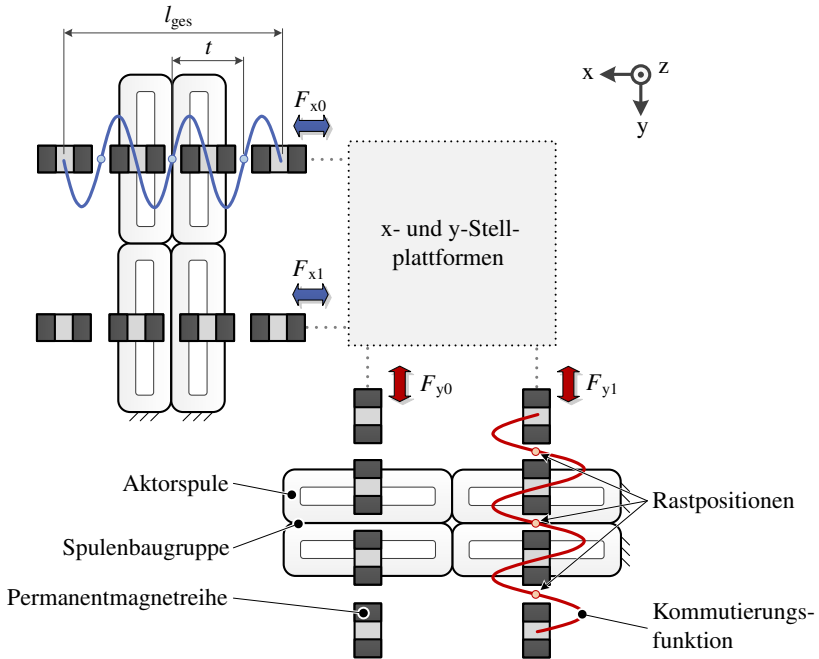


Abbildung 6.23: Anordnung der Aktoren und Lage der Zentrierpositionen

ben und die andere Achse jeweils mit einem Maximalstrom von 3 A beaufschlagt wurde, so dass eine annähernd einachsige Bewegung erfolgte. Zeitgleich wurden die Positionsmesswerte für 15 s nach dem Erreichen des vorgegebenen Zentrierstroms aufgezeichnet und dann gemittelt. Anschließend wurde $I_z = 0$ A gesetzt und die jeweilige Stellplattform von Hand ca. 5 mm aus der Rastposition herausbewegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.24 am Beispiel der Messwerte für die x-Achse zusammengefasst.

Die Messergebnisse zeigen, dass es gelingt, mit einem Zentrierstrom von $I_z = 2$ A die Rastposition mit einer Reproduzierbarkeit $< 0,3 \mu\text{m}$ zu erreichen. Das ist für den Beginn der Kommutierung der Aktorströme für die Positionsregelung während der Referenzfahrt ausreichend.

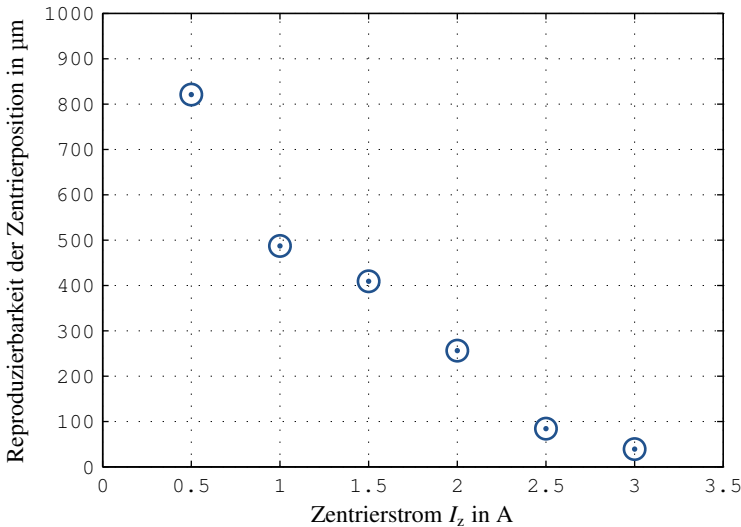


Abbildung 6.24: Reproduzierbarkeit der Zentrierposition in Abhängigkeit vom Zentrierstrom am Beispiel der x-Achse

6.6 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu den Positioniereigenschaften der NPMM-200 durchgeführt. Bei der Positionsregelung auf eine vorgegebene Sollposition konnte ein mittlerer RMSE von 2,08 nm im gesamten Messvolumen erreicht werden. Die Positionierauflösung liegt im Nanometerbereich oder gar darunter, wenn man die aufgezeichneten Messdaten nachträglich filtert. Dies konnte am Beispiel von sprungförmigen Bewegungen mit einer Amplitude von 1 nm gezeigt werden. Darüber hinaus zeigte die Analyse verschiedener üblicher Bewegungsformen, dass die mittleren Bahnabweichungen für $v < 1$ mm/s unter 100 nm liegen.

Auf Basis der erzielten Positioniereigenschaften lässt sich konstatieren, dass die NPMM-200 gut für taktile oder optische Scanmessungen mit Auflösungen im Nanometerbereich geeignet ist. Somit kann der metrologische Nachweis begonnen werden. Im nächsten Kapitel werden nun die hierzu eingesetzten Antastsysteme beschrieben.

7 Antast- und Bearbeitungssysteme

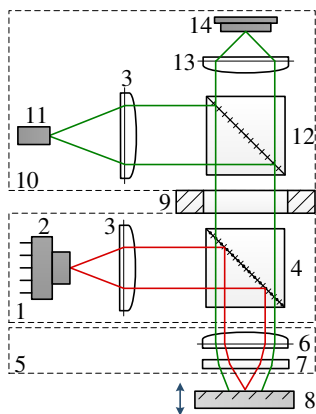
Die NPMM-200 wird erst durch den Einsatz eines Antastsystems für Messaufgaben an Nanostrukturen qualifiziert. Das Antastsystem tritt in Wechselwirkung mit dem Messobjekt und stellt somit die gewünschte Messfunktionalität zur Verfügung. In der Mikro- und Nanomesstechnik existiert eine Vielfalt unterschiedlicher Messaufgaben und eine entsprechend große Anzahl verschiedener Antastsysteme. Mögliche Einteilungskriterien und Unterscheidungsmerkmale von Antastsystemen sind in [92] ausführlich diskutiert. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass derzeit jedoch kein universelles Antastsystem existiert, mit dem eine vollständige Vermessung komplexer 3-D-Bauteile möglich ist [118].

Deshalb werden aufwendige Multisensorik-Ansätze verfolgt und es ist fundamental wichtig, dass die NPMM-200 eine universelle Antastsystemschnittstelle besitzt, über die verschiedenste Antastsysteme integriert werden können [182]. Das metrologische Konzept der NPMM-200 bedingt, dass ein Antastsystem als Nullindikator arbeitet. Das Antastsystem wird mechanisch über einen Schwalbenschwanz integriert, und es benötigt nur einen kleinen Messbereich, da die NPMM-200 das Messobjekt nachführt. Als elektrische Schnittstelle stehen am DAS acht A/D-Umsetzer zur Verfügung. Nachfolgend werden nun die Antastsysteme vorgestellt, die für den metrologischen Nachweis in die NPMM-200 integriert wurden.

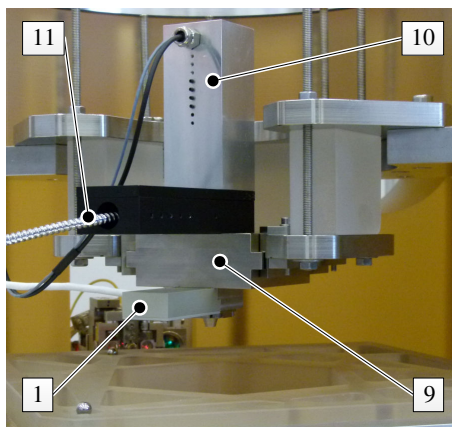
7.1 Fokussensor

Am IPMS wurde vor einigen Jahren ein Fokussensor zur optischen, berührungslosen Messung von Nanostrukturen entwickelt und in die NMM-1 integriert, der auf dem in Abschnitt 5.1.3 erläuterten Fokusverfahren basiert [181, 188]. Für Messaufgaben an Nanostrukturen ist der Fokussensor zur Orientierung auf der Probe um ein Kamerasystem erweitert worden [189]. Das Funktionsprinzip und der in die NPMM-200 eingebaute Sensor sind in Abbil-

dung 7.1 dargestellt. Dieser Fokussensor wird in Kombination mit dem Kameramikroskop seit einigen Jahren von der Firma SIOS Meßtechnik GmbH als kommerzielles Produkt angeboten. Es können Messobjekte mit hohen Geschwindigkeiten $> 1 \text{ mm/s}$ gemessen werden. Steigungswinkel am Messobjekt von bis zu 20° sind dabei zulässig [92].



(a) Funktionsprinzip



(b) Fokussensor in NPMM-200

Abbildung 7.1: Fokussensor [187]: 1 Fokussensor (mit 2 Hologramm-Laser-Einheit, 3 Kollimationslinse, 4 polarisierender Strahlteilerwürfel), 5 Objektiv (mit 6 Fokussierlinse und 7 Kompensationsplatte), 8 Messobjekt, 9 Trägerplatte, 10 Kameramikroskop (mit 11 Beleuchtungs-LWL, 12 polarisationsneutraler Strahlteilerwürfel, 13 Tubuslinse, 14 CCD-Kamera)

Der Fokussensor kann mit verschiedenen Objektiven kombiniert werden. Für den Einsatz in der NPMM-200 steht derzeit ein Fokussensor mit einem Objektiv mit fester Brennweite ($f = 1,8 \text{ mm}$) zur Verfügung. Für die Anwendung im Vakuum wurde der Fokussensor von der Firma SIOS Meßtechnik GmbH dahingehend angepasst, dass das Gehäuse vakuumtauglich ausgeführt ist. Außerdem wurden die elektronischen Komponenten, insbesondere die Hologramm-Laser-Einheit, in Voruntersuchungen in einer kleinen Vakuumkammer auf Vakuumtauglichkeit getestet.

Für Scanmessungen wird der Messfleck des Fokussensors über die Messobjektoberfläche mittels lateraler Bewegung des Messobjekts geführt. In ver-

tikaler Richtung wird das Messobjekt entsprechend der Abstandsregelung auf den Arbeitspunkt geregelt. Somit wird die maximal mögliche Scangeschwindigkeit von den Strukturhöhen auf der Probe und der Dynamik der z-Achse der NPMM-200 beeinflusst. Letztere ist deutlich geringer als die der NMM-1 sodass die in [187] angegebenen möglichen Scangeschwindigkeiten nicht erreicht werden können. Für Oberflächenmessungen mit der NPMM-200 können Geschwindigkeiten bis maximal 500 $\mu\text{m/s}$ erreicht werden.

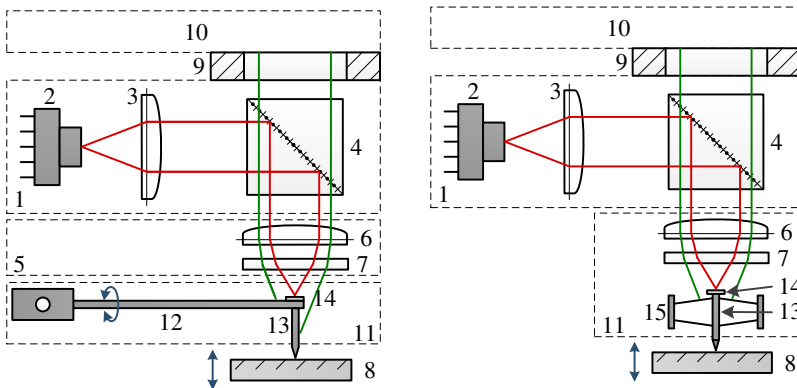
7.2 Tastschnittsensor

Der beschriebene Fokussensor zur optischen Antastung eines Messobjekts zeichnet sich durch einen einfachen und modularen Aufbau aus. In [187] wurde gezeigt, dass er auch mit verschiedenen taktilen Antastverfahren kombiniert werden kann, in dem er als sekundäres Abstandsmesssystem genutzt wird. Deshalb wurde am IPMS eine Multisensor-Konzept für NPMMs entwickelt, das auf dem Fokussensor als Abstandsmesssystem basiert und verschiedene Antastsensoren in einem kommerziellen Mikroskoprevolver aufnimmt [183, 184]. Neben dem in Abschnitt 7.1 beschriebenen Objektiv mit Festbrennweite sind ein Weißlichtinterferenzmikroskop, ein AFM und ein Tastschnittsensor integriert.

Der derzeit verwendete Tastschnittvorsatz für den Fokussensor basiert auf einem kommerziell verfügbaren Taster MFW 1250 der Firma Mahr GmbH [179]. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 7.2a dargestellt. Der Taster wird über einen drehbar gelagerten Hebel geführt und die Auslenkung mit Hilfe des Fokussensors detektiert. Hierzu wird ein kleiner Siliziumspiegel auf die Rückseite des Hebels ohne lateralen Versatz zur Tastnadel geklebt und der Laserstrahl des Fokussensors auf den Spiegel fokussiert. Der Nachteil dieses Tastschnittsensors sind die großen äußeren Abmessungen, resultierend aus der Dimensionierung des Hebelarms. Das Messvolumen wird dadurch eingeschränkt, denn das Gehäuse des Tastschnittsensors kann mit angrenzenden Baugruppen oder hohen Messobjekten kollidieren.

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung eines neuen Tastschnittvorsatzes geleistet, der zur Führung der Tastnadel keinen Hebel sondern eine Parallelfederanordnung verwendet (Funktionsprinzip siehe Abbildung 7.2b). In [77] ist die Detailkonstruktion des

Tastschnittvorsatzes und die Dimensionierung der Membranfedern ausführlich beschrieben. Die konstruktive Herausforderung hierbei bestand darin, die geringe Antastkraft von 0,75 mN in Antastrichtung zu realisieren und gleichzeitig eine möglichst hohe Quersteifigkeit der Federanordnung zu erreichen. Die Quersteifigkeit des Tasters und der Federelemente beeinflusst die Querempfindlichkeit des Tastschnittsensors signifikant und kann zu Messabweichungen des Fokussensors und zu Antastkraftabweichungen führen [94, 187]. Es wird eine kommerzielle Tastnadel mit einem Spitzenradius von 2 μm eingesetzt. Bei ersten Untersuchungen zu den metrologischen Eigenschaften mit der NMM-1 konnten eine Reproduzierbarkeit des Arbeitspunkts von < 5 nm und eine gute thermische Stabilität nachgewiesen werden. In [284] wurde die Membranfederanordnung mit dem Ziel einer höheren Quersteifigkeit und eines besseren dynamischen Verhaltens optimiert.



(a) Aufbau mit kommerzieller Tastna- (b) Aufbau mit zwei Parallelfedern
del [187]

Abbildung 7.2: Tastschnittsensoren für den Fokussensor: 1 Fokussensor (mit 2 Hologramm-Laser-Einheit, 3 Kollimationslinse und 4 polarisierendem Strahlteilerwürfel), 5 Objektiv (mit 6 Fokussierlinse und 7 Kompensationsplatte), 8 Messobjekt, 9 Trägerplatte, 10 optionales Kameramikroskop, 11 Tastschnittvorsatz (mit 12 Hebelarm, 13 Tastnadel, 14 Siliziumspiegel, 15 Parallelfederanordnung)

7.3 Mikrogreifer

Heutzutage geht der Trend nicht nur zur Vermessung, sondern auch zur Manipulation dreidimensionaler Objekte mit Nanometerpräzision. Diesbezüglich wird weltweit in vielen Forschungsprojekten an Werkzeugen zur Mikro- und Nanomanipulation geforscht [47, 139, 148, 313]. Ziel ist es, Gegenstände mit Abmessungen von weniger als 100 nm (z. B. Nanoröhren) zerstörungsfrei zu manipulieren und reproduzierbar auf Trägern ablegen zu können. Einige der Forschungsprojekte haben mittlerweile die Produktreife erreicht und sind kommerziell verfügbar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein kommerzieller Mikrogreifer vom Typ SG-06 der Firma SmarAct GmbH [270] in die NPM-200 integriert (Abbildung 7.3). Er zeichnet sich dadurch aus, dass verschiedene Greiferzangen eingebaut werden können, die auf die zu manipulierenden Objekte abgestimmt sind. Der Greifer wird über ein Handsteuergerät oder automatisch mittels Matlab angesteuert. Er besitzt jedoch keinen integrierten Kraftsensor.

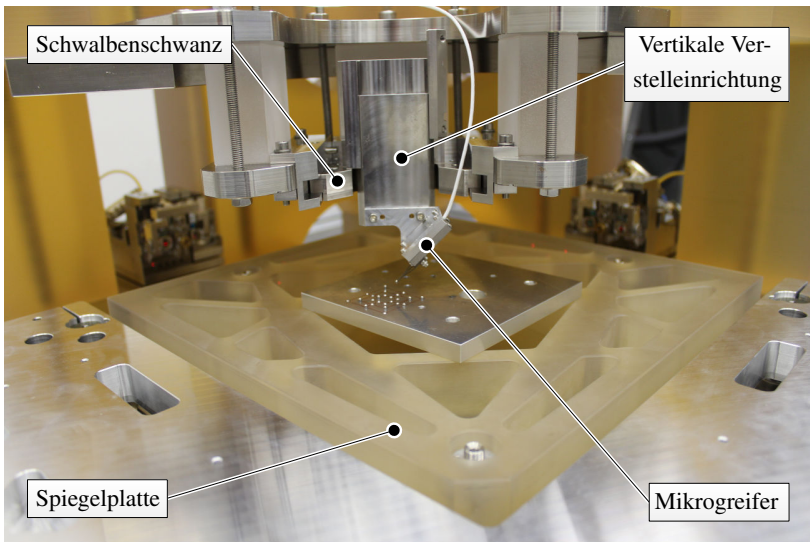


Abbildung 7.3: Mikrogreifer SmarAct SG-06 eingebaut in der NPM-200

7.4 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei Antastsysteme beschrieben, die zur Erbringung des metrologischen Nachweises in die NPMM-200 integriert wurden. Außerdem konnte ein kommerzieller Mikrogreifer zu Demonstrationszwecken eingebaut werden. Im nächsten Kapitel werden nun die Untersuchungen zum metrologischen Nachweis der NPMM-200 präsentiert.

8 Metrologischer Nachweis

Der metrologische Nachweis erfolgt anhand ausgewählter Normale, die am IPMS zur Verfügung stehen. Zunächst wird die Reproduzierbarkeit bei Einzelpunktantastung mit dem Fokussensor untersucht. Anschließend werden zum metrologischen Nachweis in vertikaler Richtung Stufenhöhen im Mikro- und Millimeterbereich vermessen, zu denen teilweise Referenzmessungen mit der NMM-1 vorlagen oder im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Zum Abschluss wird experimentell die Drift im metrologischen Kreis untersucht, um die Eignung der NPMM-200 für Langzeitmessungen abzuschätzen.

8.1 Reproduzierbarkeit bei Punktantastung

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit bei Einzelpunktantastung wurde ein 2 mm Stufenhöhennormal aus Quarzglas mit verspiegelten Oberflächen verwendet. Zunächst wurde ein Punkt auf der Oberfläche in mehrfachen Wiederholungsmessungen angetastet (Abbildung 8.1a).

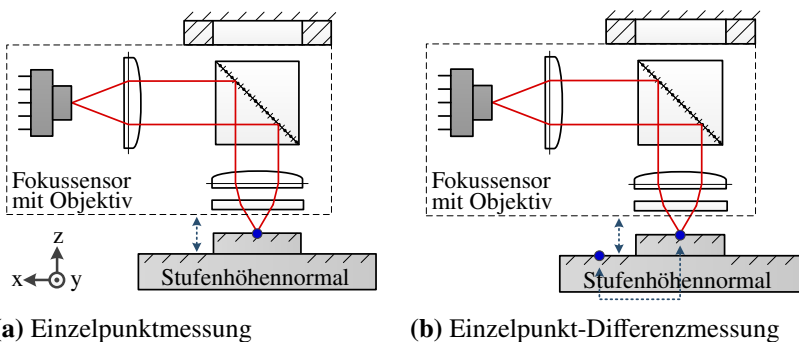


Abbildung 8.1: Messabläufe für die Reproduzierbarkeitsuntersuchung bei Punktantastung

Die Punktantastung beginnt in einem Abstand von 1 mm zur Oberfläche und dauert im Moment etwa 90 s. Das ist dadurch bedingt, dass der integrierende Anteil (I-Anteil) des Antastreglers zu Beginn der Verfahrbewegung – also zu Beginn der Annäherungsbewegung – sehr klein gesetzt und dann im CS automatisch schrittweise auf den vom Benutzer eingestellten Maximalwert hochgesetzt wird. Diese Maßnahme ist erforderlich, da die z-Plattform ansonsten aufgrund von Trägheitseffekten bei Sollgrößenänderungen von mehr als 200 μm während der Antastregelung zu Winkelschwingungen neigt und dabei der zulässige Kippwinkel überschritten wird. Das führt aus Sicherheitsgründen zur Deaktivierung der Aktoren. Während Scanmessungen ist dies kein Problem, da die detektierten Positionsänderungen des Fokussensors maximal so groß wie der Arbeitsbereich des Sensors, d. h. 5 μm , sind und somit deutlich darunter liegen. Die erzielten Ergebnisse für 500 aufeinanderfolgende Antastungen sind in Abbildung 8.2 dargestellt, wobei die Positionsabweichungen des Antastpunkts auf den ersten Messwert bezogen sind.

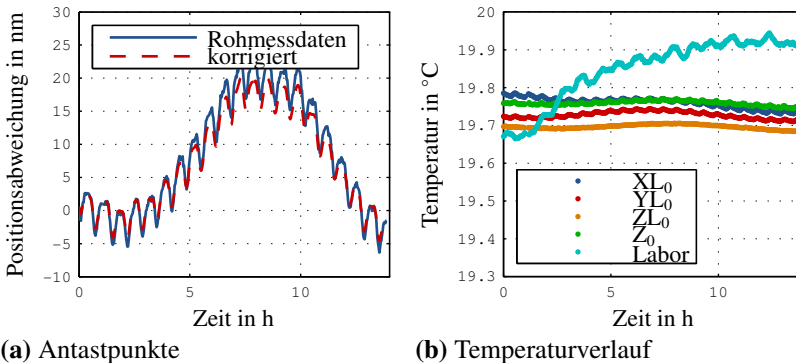


Abbildung 8.2: Reproduzierbarkeit bei Punktantastung (500 Antastungen)

Die Dauer der Messung betrug ungefähr 14 h. Die Standardabweichung des Antastpunkts in Antastrichtung, d. h. in vertikaler Richtung, beträgt ohne Korrektur der Rohmesswerte 9,2 nm. Nachträglich wurde dann der Temperatureinfluss auf die Luftbrechzahl und demzufolge auf die interferometrische Längenmessung anhand der gemessenen Temperaturwerte (dargestellt in Abbildung 8.2b) mit Hilfe der empirischen Gleichung nach Bönsch korrigiert [35]. Außerdem wurde noch die thermische Längenausdehnung der Kompo-

nenen im Messkreis (siehe Anhang C) in die Korrektur mit einbezogen, wobei als Bezugswert der erste Messwert verwendet wurde. Unter Berücksichtigung dieser nachträglichen Korrekturmaßnahmen verringert sich die Standardabweichung auf 7,23 nm.

Die Streuung der Antastpunkte korreliert mit den gemessenen Temperaturwerten in der Nähe der Interferometer. In den Temperaturmesswerten sind zyklische Temperaturänderungen von etwa 10 mK zu erkennen, die auf die Temperaturregelung der Kälteumwälzthermostate mit Hilfe eines Sensors in der Vakuumkammer auf einen vorgegebenen Sollwert zurückzuführen sind. Die maximalen Temperaturschwankungen in Höhe von etwa 50 mK über die Gesamtdauer der Messung wurden vom Temperatursensor am x-Interferometer aufgezeichnet. Deshalb wurde in einer separaten Vergleichsmessung die Temperaturregelung der Kälteumwälzthermostate auf konstante, geräteinterne Wasserbadtemperatur umgestellt, um zu überprüfen, ob dadurch eine bessere Temperaturkonstanz erreicht werden kann. Vor Beginn der Vergleichsmessung wurde die Vakuumkammer über einen Zeitraum von 48 h temperiert. Infolge der Abwärme der Aktoren und der anderen aktiven elektronischen Bauelemente steigt die Temperatur in der Vakuumkammer über die Dauer der Messung um etwa 0,6 K an. Die Standardabweichung der Antastpunkte steigt dann um den Faktor 15 auf 130,51 nm an. Wenn man diese zwei Messungen vergleicht, kann man schlussfolgern, dass sich die Temperaturregelung mit Hilfe eines internen Sensors in der Vakuumkammer besser eignet. Alle weiteren Messungen im Rahmen des metrologischen Nachweises wurden deshalb auf diese Weise durchgeführt.

Die Messung der Reproduzierbarkeit bei Einzelpunktantastung auf der Oberfläche beinhaltet zahlreiche unbekannte Einflussfaktoren (beispielsweise thermische Drift anderer Komponenten, Schwankungen des Raumklimas, Kontaminationen, usw.), die das Messergebnis negativ beeinflussen können, insbesondere im Hinblick auf die lange Zeit, die derzeit für eine Punktantastung und demzufolge für die gesamte Messreihe benötigt wird. Aufgrund der Komplexität des NPMM-200-Gesamtsystems wurden diese Einflussfaktoren zum gegenwärtigen Stand der Entwicklung noch nicht im Detail untersucht. Deswegen stellen diese Messergebnisse nur eine erste Abschätzung zur metrologischen Leistungsfähigkeit dar.

Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe des 2 mm Stufenhöhennormalis die Reproduzierbarkeit bei Einzelpunkt-Differenzmessung untersucht, indem im-

mer abwechselnd dieselben Sollpunkte auf dem unteren und dem oberen Plateau angefahren wurden (Abbildung 8.1b). Bei der Auswertung der Höhendifferenz ist der zeitliche Abstand zwischen den beiden Einzelpunktantastungen kleiner als 200 s. Demzufolge wird die berechnete Höhendifferenz nur in sehr geringem Maße von den zuvor genannten Einflussfaktoren beeinträchtigt. Die berechneten Abweichungen der Einzelmessungen vom Mittelwert über 500 Wiederholungen sind in Abbildung 8.3 dargestellt. Zuvor wurde eine nachträgliche Korrektur des Temperatureinflusses auf die Luftbrechzahl vorgenommen.

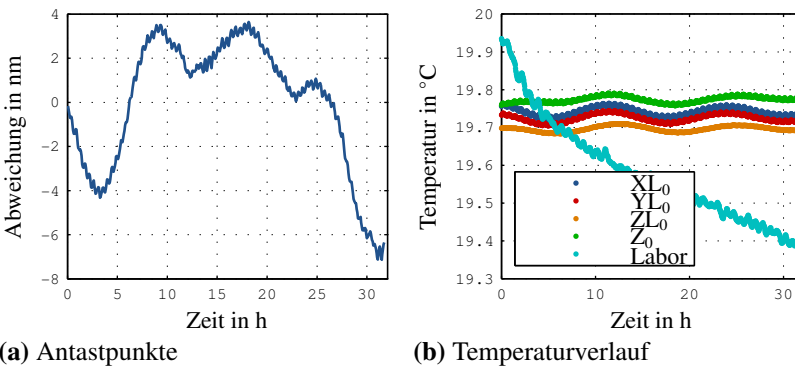


Abbildung 8.3: Reproduzierbarkeit bei Einzelpunkt-Differenzmessung (500 Antastungen)

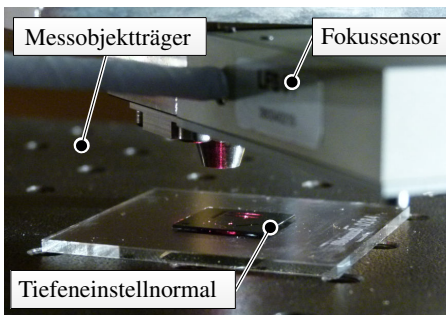
Vergleicht man die Spanne der Abweichungen vom Mittelwert mit den Ergebnissen aus Abbildung 8.2a, fällt auf, dass die maximale Spanne von etwa 30 nm auf ca. 11 nm bei der Differenzmessung sinkt. Das bekräftigt die These, dass eine wesentliche Ursache für die Positionsabweichungen thermische Drift ist. Die berechnete mittlere Höhe beträgt $2096,15 \mu\text{m}$ und kann mit einer Unsicherheit von $2,6 \text{ nm}$ ($k = 2$) angegeben werden. Diese Werte stehen in guter Übereinstimmung mit den Messergebnissen aus [187], bei denen mit dem Fokussensor in der NMM-1 eine Höhe von $2094,23 \mu\text{m}$ gemessen wurde. Die in [187] angegebene Unsicherheit beträgt $2,7 \text{ nm}$ ($k = 2$).

Abschließend kann man feststellen, dass diese Einzelpunktmessungen eine gute metrologische Leistungsfähigkeit mit einer hohen Wiederholbarkeit belegen. In den nächsten zwei Abschnitten werden nun weitere Stufenhöhen-

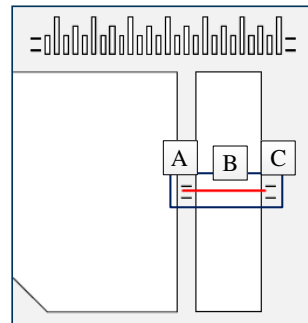
messungen vorgestellt. Der wesentliche Unterschied ist, dass die folgenden Ergebnisse für Stufenhöhen mit Scanmessungen auf den Plateaus ermittelt werden.

8.2 Stufenhöhenmessungen im Mikrometerbereich

Zum metrologischen Nachweis auf Mikrometerebene wurden Stufenhöhenmessungen an einem Tiefeneinstellnormal VS 0284 vom Typ A 1 der Firma SiMetrics GmbH [267] mit dem Fokussensor (berührungslos) und dem Tastschnittsensor (taktile) durchgeführt. Das Normal ist aus Silizium gefertigt und besitzt eine etwa 1,7 mm lange Grube mit einer nominellen Tiefe von $50\ \mu\text{m}$. Diese Grube ist in einem gekennzeichneten Bereich mit etwa 0,4 mm Breite von der PTB kalibriert worden. Ein Foto vom Messaufbau in der NPMM-200 zeigt Abbildung 8.4a. Eine Prinzipansicht der Probe und die Orientierung der Messlinien werden in Abbildung 8.4b dargestellt.



(a) Foto vom Messaufbau



(b) Darstellung der Scanlinien

Abbildung 8.4: Messung des Tiefeneinstellnormals VS 0284 der Firma SiMetrics GmbH

Bei den optischen und taktilen Messungen mit der NPMM-200 wurde die Grube zehn Mal in fünf parallelen Messlinien mit einem lateralen Abstand von jeweils $50\ \mu\text{m}$ im kalibrierten Bereich gemessen. Dabei setzt sich eine Messlinie aus drei einzelnen Scanlinien (A, B, C) entsprechend der in

DIN EN ISO 5436-1 genormten Vorgehensweise zusammen [208]. Bei den Scans wurden der Messpunkt Abstand mit $5\ \mu\text{m}$ und die Scangeschwindigkeit mit $400\ \mu\text{m/s}$ gewählt. Abbildung 8.5 visualisiert das gemessene Oberflächenprofil. Die Auswertung der Stufenhöhe erfolgt nach [208]. Das bedeutet, dass das obere Referenzniveau nach der Korrektur des Neigungswinkels aus einer linearen Regression der Messpunkte links und rechts der Grube ermittelt wird. Die Bestimmung des Tiefenwertes erfolgt als Differenzbildung aus den Mittelwerten des oberen und unteren Niveaus.

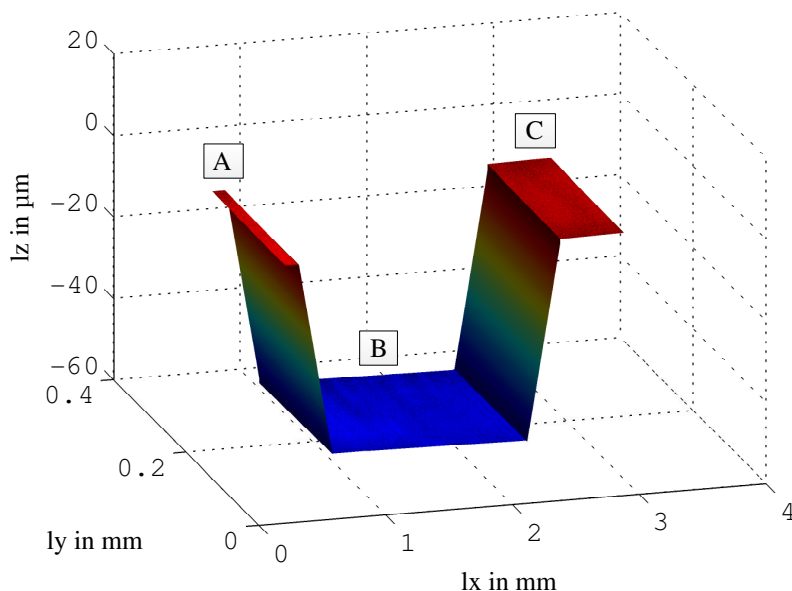


Abbildung 8.5: Tiefeneinstellnormal VS 0284 (Flanken interpoliert)

Die mit dem Fokussensor gemessene mittlere Tiefe beträgt $50,194\ \mu\text{m}$. Sie weicht um $5\ \text{nm}$ von der mit dem Tastschnittsensor gemessenen Tiefe ($50,199\ \mu\text{m}$) ab. Die Messunsicherheiten betragen $2,42\ \text{nm}$ ($k = 2$) bei der Messung mit dem Fokussensor und $3,9\ \text{nm}$ ($k = 2$) für die Tastschnittsensormessung. Die Vertrauensbereiche überlappen geringfügig. Die gemessenen Tiefen weichen um $-21\ \text{nm}$ bzw. $-16\ \text{nm}$ von dem im Kalibrierschein angegebenen Wert ab. Da im Kalibrierschein eine Unsicherheit von $30\ \text{nm}$ ($k = 2$) an-

gegeben ist, liegen die Ergebnisse der NPMM-200 im Vertrauensbereich. Jedoch ist diese Unsicherheit im Verhältnis zur Messauflösung der NPMM-200 groß, da die Probe kommerziell erworben und nicht mit höchster Präzision kalibriert wurde. Deshalb wurden zur Bewertung der NPMM-200-Ergebnisse Referenzmessungen mit der NMM-1 mit beiden Sensoren durchgeführt. Bei den Referenzmessungen erfolgten nicht 10, sondern 40 Wiederholungen für jede Scanlinie. Eine Zusammenfassung aller Messergebnisse mit unterschiedlichen Messgeräten und Messverfahren enthält Tabelle 8.1.

Unter Verwendung des Fokussensors wurde mit der NMM-1 eine mittlere Tiefe von 50,191 μm gemessen. Die mit diesem Messgerät mit dem Tastschnittsensor gemessene Tiefe weicht 2 nm ab und beträgt 50,189 μm . Die Vertrauensbereiche beider Ergebnisse weisen eine gute Überlappung auf. Die Abweichungen von weniger als 10 nm zu den mit der NPMM-200 gemessenen Tiefen sind zum derzeitigen Entwicklungsstand im Wesentlichen auf die unvollständig implementierten Messwertkorrekturen in der NPMM-200 zurückzuführen. In Bezug auf den kalibrierten Tiefenwert und seinen Vertrauensbereich ist jedoch insgesamt eine gute Übereinstimmung gegeben.

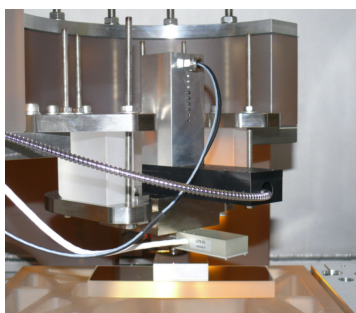
Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der Messergebnisse für das Tiefeneinstellnormal VS 0284 (* Erweiterte Messunsicherheit)

Messgerät	Anzahl Wiederholungen	Tiefe in μm	Unsicherheit in nm ($k = 2$)	Abweichung vom Kalibrierwert in nm
NPMM-200 mit Fokussensor	50	50,194	2,42	-21
NPMM-200 mit Tastschnittsensor	50	50,199	3,97	-16
NMM-1 mit Fokussensor	200	50,191	2,38	-24
NMM-1 mit Tastschnittsensor	200	50,189	2,76	-26
Kalibrierwert	15	50,215	30*	–

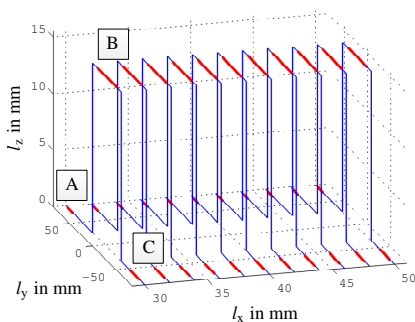
8.3 Stufenhöhenmessungen im Millimeterbereich

Der metrologische Nachweis muss auch über größere Entfernungen erfolgen, d. h. im Millimeterbereich. Zum Nachweis in vertikaler Richtung sind am IPMS verschiedene Stufenhöhennormale aus Quarzglas vorhanden. Für Abstände bis 5 mm existieren insgesamt 5 Normale mit Höhenabstufungen von 1 mm [187]. Das 2 mm Normal wurde für die Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit bei Punktantastungen (Abschnitt 8.1) verwendet.

Die NPMM-200 zeichnet sich dadurch aus, dass in vertikaler Richtung ein Bewegungsbereich von maximal 25 mm zur Verfügung steht. Zum metrologischen Nachweis für derart große Höhen existieren derzeit weltweit keine adäquaten Normale mit Kalibrierunsicherheiten im Nanometerbereich. Deshalb wurden vom IPMS zwei neue Stufenhöhennormale in Auftrag gegeben. Sie bestehen aus zwei Quarzglasplatten, die jeweils an der Oberseite verspiegelt sind und angesprengt werden. Die beiden Normale weisen eine nominelle Höhe von 15 mm und 25 mm auf. Der metrologische Nachweis wird am Beispiel des 15 mm Normals gezeigt, das mit dem Fokussensor gemessen wurde. Der Messaufbau ist in Abbildung 8.6a gezeigt. Abbildung 8.6b visualisiert die Anordnung der Scanlinien, wobei die Vorgaben aus der Norm DIN EN ISO 5436-1 berücksichtigt wurden [208].



(a) Foto vom Messaufbau



(b) Darstellung der Scanlinien

Abbildung 8.6: Messung des 15 mm Stufenhöhennormals

Aufgrund der Gehäuseabmessungen des Fokussensors und des festen Arbeitsabstandes des Objektivs (Brennweite $f = 1,8 \text{ mm}$) kann auf den unteren Plateaus nur eine Breite von 20 mm gemessen werden. Andernfalls kollidiert das Gehäuse des Sensors mit der Probe. Es wurden in diesem nutzbaren Bereich 11 parallele Messlinien mit einem Abstand von 2 mm gemessen. Jede Messlinie setzt sich aus drei einzelnen Scanlinien zusammen. Die Messgeschwindigkeit betrug $250 \mu\text{m/s}$ und der Messpunktabstand wurde auf $10 \mu\text{m}$ gesetzt. Jede Messlinie wurde fünfmal gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.7 visualisiert. Das gemessene Oberflächenprofil des oberen Plateaus ist im Detail dargestellt. Für jede Scanlinie wurde die Höhe entsprechend der Norm DIN EN ISO 5436-1 ermittelt [208]. Die mittlere Höhe aus allen Messungen beträgt $14948,7935 \mu\text{m}$. Die Standardabweichung dieses Werts kann mit $3,06 \text{ nm}$ angegeben werden. Für eine Vergleichsmessung standen keine adäquaten Messgeräte zur Verfügung.

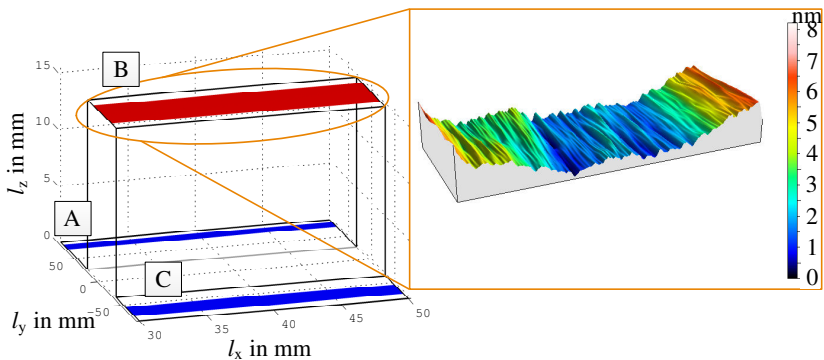
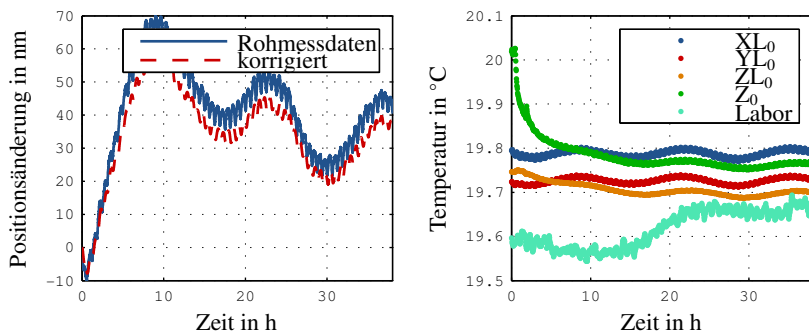


Abbildung 8.7: Messergebnisse des 15 mm Quarz-Stufenhöhennormal

8.4 Drift im metrologischen Kreis

Die Abschätzung der Drift im metrologischen Kreis, welche über einen längeren Zeitraum auftritt, ist von besonderer Bedeutung für Messungen mit der NPMM-200, da sie in die Messunsicherheit der Messergebnisse einfließt. Für eine erste grobe Abschätzung der Drift im metrologischen Kreis wurden im Rahmen dieser Arbeit Messungen mit einem Planspiegel als Messobjekt und

dem Fokussensor als Antastsystem durchgeführt. Der Planspiegel wurde mit Hilfe der Spiegelplatte so positioniert, dass sich der Fokussensor im Arbeitspunkt befand. Für die Dauer der Messung wurde die Position der Spiegelplatte dann so nachgeführt, dass der Arbeitspunkt des Fokussensors gehalten wurde. Auf diese Weise kann zunächst nur die Drift in Antastrichtung ermittelt werden. Die laterale Position der Spiegelplatte wurde auf einen konstanten Sollwert geregelt. Mögliche Driften der Positionssignale der x- und y-Interferometer können somit nicht erfasst werden. Abbildung 8.8a zeigt die gemessenen Positionswerte des z-Interferometers und Abbildung 8.8b den Temperaturverlauf während der Messung. Die Temperatursensoren XL_0 , YL_0 und ZL_0 sind an den drei Interferometern angebracht. Der Temperatursensor Z_0 befindet sich am Aktor z_0 (vgl. Abschnitt 4.4). Der fünfte Temperatursensor diente zur Protokollierung der Umgebungstemperatur im Labor.



(a) Positionsmesswerte des z-Interferometers (b) Temperaturverlauf

Abbildung 8.8: Untersuchung der Drift im metrologischen Kreis über einen Zeitraum von 38 h

Die Messung lief über eine Gesamtzeit von 38 h. Alle 10 s wurden die Positionsmesswerte für jeweils 1 s aufgezeichnet und der Mittelwert abgespeichert. Die Temperaturmesswerte können systembedingt nur in einem Zeitintervall von jeweils ca. 20 s ausgelesen werden. Über die Gesamtdauer der Messung konnte bei den Positionsmesswerten eine Drift von maximal 80 nm beobachtet werden. Es ist eine Korrelation zwischen den Temperaturmesswerten am z-Interferometer (ZL_0) und dessen Positionsmesswerten zu erken-

nen. Außerdem fällt auf, dass bei den Temperatursensoren an den Interferometern dem Temperaturverlauf eine periodische Schwingung mit ca. 6 mK Amplitude und einer Periodendauer von etwa 30 Minuten überlagert ist. Diese Schwingung ist – wie bereits bei den Messungen in Abschnitt 8.1 validiert wurde – auf das Regelungsverhalten des Kälteumwälzthermostaten zurückzuführen. Nach einer nachträglichen rechnerischen Korrektur dieser Umwelteinflüsse beträgt die Drift noch etwa 70 nm über den gesamten Zeitraum.

Die Ursachen sind mannigfaltig, da die NPMM-200 als Gesamtsystem äußerst komplex ist. Am IPMS wurden theoretische Vorarbeiten geleistet [80, 81, 158]. Jedoch wurde das Verhalten der einzelnen Teilsysteme des mechanisch-optischen Grundaufbaus der NPMM-200 und der Messsysteme bisher nicht experimentell im Detail untersucht. Dies benötigte schon bei der NMM-1 mehrere Jahre Forschungsarbeit [92, 246], weshalb es für die NPMM-200 nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Lediglich für den Fokussensor wurde am IPMS das Temperaturverhalten intensiv untersucht und eine Temperaturstabilität von ca. 70 nm/K ermittelt [187]. Demzufolge liefert der Fokussensor einen Beitrag von etwa 5 % zur Drift des Gesamtsystems, die während dieser Messung mit der NPMM-200 beobachtet wurde.

8.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden einige grundlegende Untersuchungen zu den metrologischen Eigenschaften der NPMM-200 präsentiert. Die Reproduzierbarkeit bei Punktantastung ist kleiner als 10 nm. Es wurden in vertikaler Richtung sowohl Stufenhöhen im Mikro- als auch im Millimeterbereich vermessen und es konnte bei allen Messungen eine Unsicherheit der Höhe < 8 nm erzielt werden. Über einen Zeitraum von 38 h konnte eine Drift < 80 nm in z-Richtung nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse belegen die metrologische Leistungsfähigkeit der NPMM-200 und zeigen das Potential für Messaufgaben an Mikro- und Nanostrukturen auf. Aufgrund dessen, dass derzeit noch kein Antastsystem mit einer lateralen Positionsauflösung im Nanometerbereich integriert ist (z. B. ein Rastersondenmikroskop), konnten im Rahmen dieser Dissertation allerdings keine metrologischen Eigenschaften in den Achsen x und y untersucht werden. Im nächsten Kapitel werden nun zwei Anwendungsbeispiele vorgestellt.

9 Anwendungsbeispiele der NPMM-200

Die NPMM-200 ist aufgrund der universellen mechanischen Antastsystemschnittstelle und der Verfügbarkeit von acht analogen und zahlreichen digitalen Eingangskanälen für Antastsystemsignale für eine Vielzahl von Messaufgaben einsetzbar. In diesem Kapitel werden beispielhaft zwei Anwendungsbeispiele vorgestellt, die das große Potential der großflächigen Messung mit Nanometerauflösung aufzeigen.

9.1 Oberflächenmessung ebener Spiegel

Die flächenhafte Messung von Oberflächen gewinnt immer mehr an Bedeutung, da ein größerer Informationsgewinn hinsichtlich des Erkennens der Oberflächenstruktur und fertigungsspezifischer Strukturen gegenüber Profilmessungen erlangt werden kann [32]. Durch einen lateralen Messbereich von $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ergeben sich zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten für die Oberflächenmessung mit Auflösung und Reproduzierbarkeit im Nanometerbereich.

Ein Beispiel ist die Vermessung ebener Spiegel mit dem Fokussensor, demonstriert an einem kommerziell verfügbaren Planspiegel aus Zerodur[®] mit 100 mm Außendurchmesser und einer Oberflächenqualität von $\lambda/20$. Dieser Spiegel wurde in einem quadratischen Bereich mit 70 mm Kantenlänge mäanderförmig in x-Richtung mit einer Scangeschwindigkeit von $250\text{ }\mu\text{m/s}$ gemessen. Der Linienabstand betrug $200\text{ }\mu\text{m}$ und der Messpunktabstand $50\text{ }\mu\text{m}$. Die gesamte Messung weist somit etwa 490000 Messpunkte auf. Die Erfassung dauerte ca. 33,5 h. Die nicht nachverarbeiteten, ungefilterten Messdaten sind in Abbildung 9.1 dargestellt.

Die z-Werte weisen im Mittel eine Streuung von $\pm 5\text{ nm}$ auf. Es sind jedoch auch Ausreisser von bis zu $\pm 150\text{ nm}$ zu erkennen. Deshalb wurde nach-

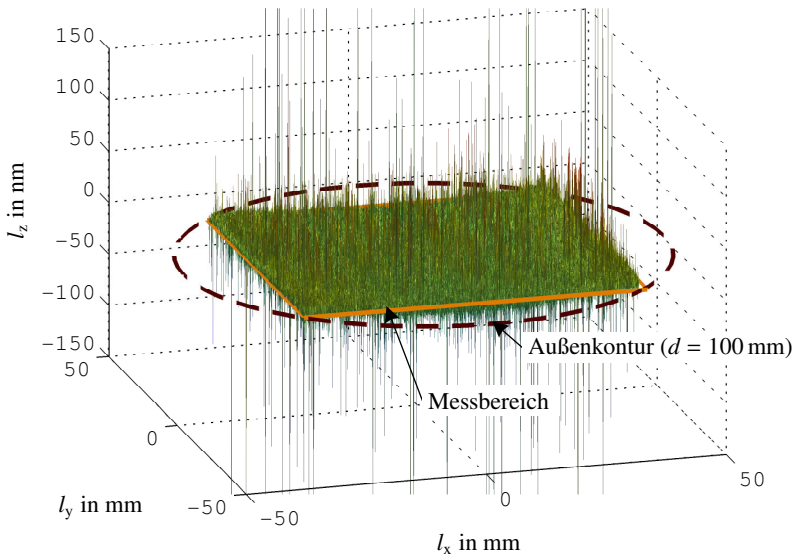


Abbildung 9.1: Ungefilterte Topografie des Planspiegels

träglich eine Korrektur der Ausreißer mit Hilfe des Ransac-Algorithmus vorgenommen [76]. Anschließend wurde aus den korrigierten Messdaten eine stetige Flächenfunktion höheren Grades auf Basis eines Polynomansatzes berechnet. Der Polynomansatz und die Ermittlung der Polynomkoeffizienten basieren auf den Betrachtungen in [92] zur rechentechnischen Korrektur der Spiegelflächentopographie der NMM-1-Spiegelecke. Die ermittelte Flächenfunktion ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

Die Messdaten zeigen, dass der Spiegel eine Durchbiegung von etwa 30 nm aufweist. Zur Plausibilitätsprüfung wurde eine Wiederholungsmessung mit der NPMM-200 mit Drehung der Scanrichtung um 90° durchgeführt. Die ermittelte Flächenfunktion unterscheidet sich geringfügig, was auf die Streuung der Positionsmesswerte zurückzuführen ist. Für eine Referenzmessung mit einem anderen Messgerät wurde das am IPMS verfügbare Zygo-Interferometer (vgl. Abschnitt 3.2.2) herangezogen. Die Maskengröße wurde mit $d_{Zygo} = 70 \text{ mm}$ festgelegt. Die laterale Auflösung beträgt dann $360 \mu\text{m}$ pro Pixel. Die Referenzmessung wurde mehrfach wiederholt und statistisch

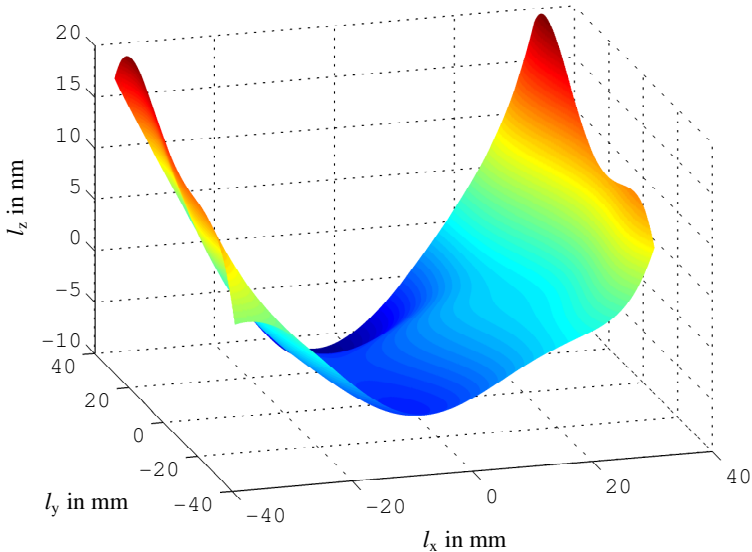


Abbildung 9.2: Flächenfunktion des Planspiegels im Messbereich

ausgewertet. Das gemittelte Oberflächenprofil aus 10 Einzelmessungen ist in Abbildung 9.3 dargestellt und weist eine ähnliche Oberflächentopographie auf. Die Durchbiegung beträgt etwa 19 nm.

Daraus kann man schlussfolgern, dass die NPM-200-Messungen in guter Übereinstimmung mit den Zygo-Referenzmessungen stehen. Die Abweichungen hinsichtlich der maximalen Durchbiegung lassen sich damit erklären, dass mit dem Zygo-Interferometer eine kreisförmige Fläche gemessen wurde, wohingegen das Messfeld bei der NPM-200 rechteckig gewählt war. Die maximalen Abweichungen bei den NPM-200-Messungen treten in den Randbereichen auf, die mit dem Zygo-Interferometer nicht erfasst wurden.

9.2 Oberflächenmessung konkaver Spiegel

Ein weiteres Anwendungsfeld sind die Vermessung von Asphären und konkaven Spiegeln sowie Freiformflächen. Das Potential der NPM-200 für die-

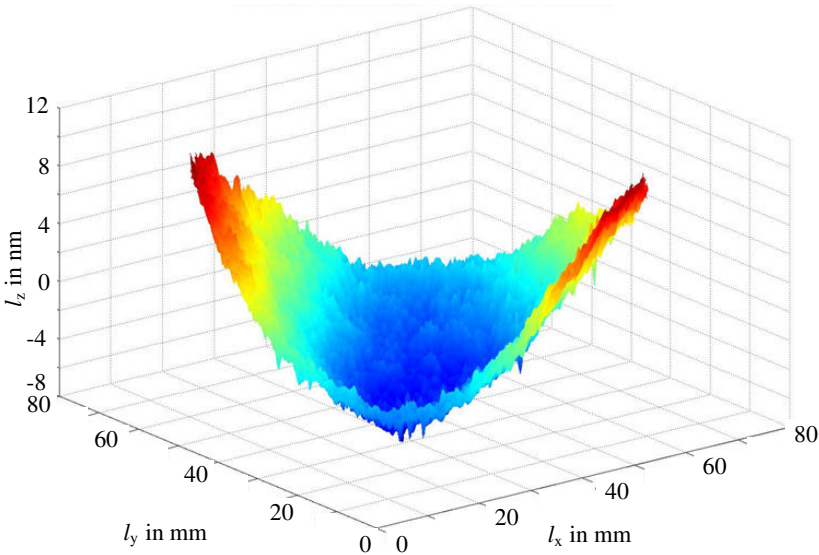


Abbildung 9.3: Gemittelttes Oberflächenprofil aus 10 Einzelmessungen mit dem Zygo-Interferometer (Maskengröße $d_{\text{Zygo}} = 70 \text{ mm}$)

se Messaufgaben wird an der Oberflächenmessung eines konkaven Spiegels mit dem Fokussensors aufgezeigt. Das Messobjekt ist aus Zerodur[®] hergestellt und weist einen Außendurchmesser von 6 Zoll ($\approx 150 \text{ mm}$) auf. Die Oberfläche ist mit einer Beschichtung aus Aluminium versehen. Die Formabweichungen sind mit $\lambda/4$ toleriert. Sie wurde in einem quadratischen Bereich mit 105 mm Kantenlänge mäanderförmig in x-Richtung gescannt (Abbildung 9.4).

Der Linienabstand betrug 2 mm und der Messpunktabstand $10 \mu\text{m}$. Die gesamte Messung weist etwa 546000 Messpunkte auf, für deren Erfassung mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von $250 \mu\text{m/s}$ ca. 33 h benötigt wurden. Die Darstellung enthält korrigierte Messdaten, bei denen einzelne Ausreißer von bis zu $\pm 200 \text{ nm}$ mittels Ransac-Algorithmus ausgeschlossen wurden. Die aus dieser Messung anhand mehrerer Profilschnitte ermittelte mittlere Brennweite beträgt 609,0861 mm. Dieser Zahlenwert steht in guter Übereinstimmung mit der Angabe aus dem Datenblatt (609,6 mm mit einer zulässigen Toleranz von $\pm 2 \%$). Die Messung wurde zu Demonstrationszwecken durchgeführt und

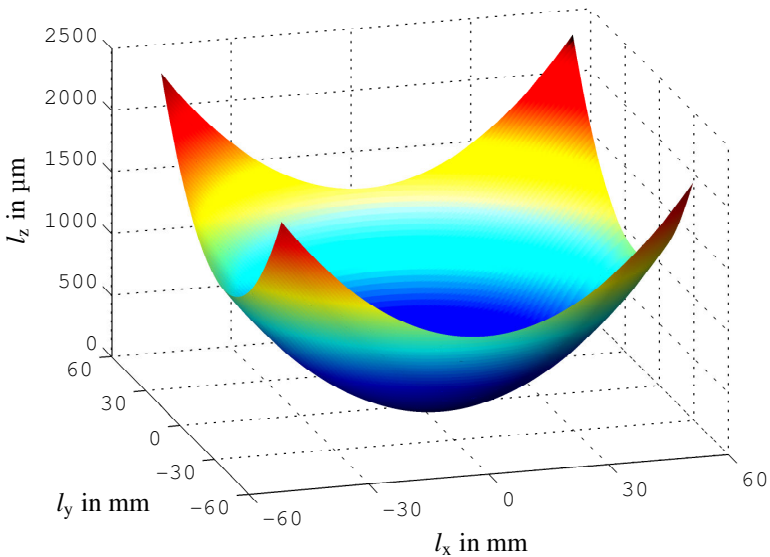


Abbildung 9.4: Topografie eines konkaven Spiegels mit 6 Zoll Durchmesser, gemessen in einem Bereich von $105\text{ mm} \times 105\text{ mm}$

nicht wiederholt. Deswegen ist eine Aussage über die Reproduzierbarkeit nicht möglich. Derzeit steht dem IPMS kein Messgerät für eine Referenzmessung zur Verfügung.

9.3 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei neue Anwendungsfelder am Beispiel einer Planspiegel- und einer Konkavspiegelmessung aufgezeigt, die von der NPMM-200 erschlossen werden. Das Anwendungsspektrum kann durch die universalen mechanischen und elektrischen Antastsystemschnittstellen durch die Integration neuer Antastsensoren oder Bearbeitungswerkzeuge enorm erweitert werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der globale Trend zur Miniaturisierung technischer Produkte auf Basis der Mikro- und Nanotechnologien hält an und sorgt dafür, dass die 3-D-Nanomesstechnik im Rahmen der Qualitätssicherung weiterhin stark an Bedeutung gewinnt. Als Querschnittstechnologie spielt die Nanomesstechnik in der Entwicklung und Produktion eine zentrale Rolle, um die spezifizierten Funktionalitäts- und Qualitätsvorgaben zu erreichen. In Konsequenz ergeben sich die Entwicklungsziele zum einen aus den Anforderungen verschiedener Industriezweige, wie beispielsweise der Halbleiter- oder der Optikindustrie, und orientieren sich zum anderen auch an der ITRS oder der von verschiedenen europäischen Staatsinstituten herausgegebenen *EMRP Roadmap* zur Sicherung der metrologischen Rückführbarkeit. Im Wesentlichen besteht die technologische Zielstellung darin, Messgeräte mit großen Messbereichen von bis zu 500 mm bei gleichzeitiger Messauflösung in subatomarer Größenordnung und Messunsicherheiten < 50 nm hervorzubringen. Da derzeit kein universelles Antastsystem für die Bewältigung der Vielzahl von Messaufgaben an Mikro- und Nanostrukturen existiert, müssen die Messgeräte darüber hinaus für Multisensorik geeignet sein.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden und einen Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen der Präzisionstechnologien in den nächsten Jahren zu leisten, wurde an der TU Ilmenau in Transfer- und Verbundprojekten mit mehreren Kooperationspartnern eine neue Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM-200 entwickelt, die ein Messvolumen von $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ besitzt und mit einer Messwertquantisierung von 5 pm arbeitet. Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit und die Grenzen der dreidimensionalen Positioniereigenschaften der NPMM-200 zu analysieren sowie einen metrologischen Nachweis mit Hilfe ausgewählter Normale zu erbringen.

Zunächst wurde im Kapitel 2 der gegenwärtige Stand der Technik für die Entwicklung von NPMMs analysiert. Die Messgeräte wurden drei verschiedenen Konstruktionsansätzen (*Sample Scanning Mode*, *Probe Scanning Mo-*

de und *Mixed Scanning Mode*) zugeordnet und hinsichtlich Messvolumen, Aufbau des Positioniersystems, Messauflösung und den erreichbaren 3-D-Messunsicherheiten verglichen. Außerdem wurden die eingebundenen Anstastsysteme, die Messumgebung der Geräte und die Bedienerkonzepte in die Betrachtungen mit einbezogen. Daraus wurden weitere wesentliche Entwicklungsziele für die NPMM-200 abgeleitet, um sich vom derzeitigen Entwicklungsstand abzusetzen. Dazu gehören eine Positionierreproduzierbarkeit von 1 nm und eine 3-D-Messunsicherheit von weniger als 30 nm.

Bei der NPMM-200 handelt es sich um ein komplexes mechatronisches System, an dessen Entwicklung verschiedene Fachgebiete und Kooperationspartner mitgewirkt haben. Erst die Integration und das gegenseitige Zusammenspiel der Einzelkomponenten ermöglicht die Funktionsfähigkeit des gesamten Messgeräts. Deshalb gab Kapitel 3 einen Überblick über das Gesamtsystems der NPMM-200, wobei sich bei den Betrachtungen auf die wesentlichen Aspekte zum grundlegenden Systemverständnis beschränkt wird. Aufbauend auf dem metrologischen Konzept wurden der mechanisch-optische Grundaufbau und die funktionswichtigen Baugruppen sowie die Längen- und Winkelmesssysteme vorgestellt. Daran schloss sich in diesem Kapitel eine Beschreibung des neuartigen Informations- und Signalverarbeitungskonzepts, das auf einem modularen Mehrrechnersystem basiert, sowie des Steuerungs- und Bedienerkonzepts an. Außerdem wurde das implementierte Regelungssystem dargestellt. Betrachtungen zu den Aufstell- und Umgebungsbedingungen der NPMM-200 runden dieses Kapitel ab. Dabei ist im Vergleich zum Stand der Technik hervorzuheben, dass die NPMM-200 entweder unter atmosphärischen Bedingungen in temperierter Umgebung oder im Grobvakuum bei 1 mbar betrieben werden kann.

In der Entwicklungsphase der NPMM-200 wurde im Rahmen dieser Arbeit ein wesentlicher Beitrag zur Detailkonstruktion des Positioniersystems geleistet. Das Positioniersystem besteht aus Führungs- und Antriebssystem, einer Gewichtskraftkompensation und Endlagenschaltern. Aufbauend auf der Auswahl eines kinematischen Konzepts wurde ein Überblick über geeignete Führungen und Aktoren gegeben. Die realisierten Führungs- und Antriebssysteme wurden im Detail diskutiert. Im Hinblick auf die Applikation im Grobvakuum müssen die Aktoren als wärmeabstrahlende Baugruppen aktiv gekühlt werden. Untersuchungsergebnisse zur Wirksamkeit der Temperierung wurden vorgestellt. Zur Reduzierung der entstehenden Verlustleistung der

vertikalen Aktoren ist eine Kompensation der Gewichtskraft unumgänglich. Das technische Prinzip der entwickelten GKK wurde erläutert und es wurden Verifikationsmessungen der Kraft-Weg-Kennlinien präsentiert. Das Kapitel schließt mit Betrachtungen zur Auswahl neuer, berührungsloser Endlagenschalter auf Basis des Halleffekts und der Analyse der Reproduzierbarkeit des Schaltpunkts sowie des Einflusses konstruktiver Parameter ab.

Es zeigte sich, dass die Reproduzierbarkeit der Endlagenschalter im Submikrometerbereich liegt. Dies ist jedoch für die Bestimmung der Nullposition der interferometrischen Längenmesssysteme, d. h. dem Ursprung des Messgerätekoordinatensystems, während der Aktivierungsfahrt des Messgeräts nicht ausreichend. Deshalb rückte die Auswahl geeigneter Nullpunktsensoren in den Fokus. Diese Thematik wurde in Kapitel 5 behandelt. In Folge des Mangels an geeigneten kommerziellen Lösungen wurden fasergekoppelte monochromatische Nullpunktsensoren auf Basis des konfokalen Messprinzips entwickelt und messtechnisch untersucht. Im Ergebnis konnte eine Standardabweichung des Nullpunkts respektive des Messgerätekoordinatensystemursprungs von etwa 3,5 nm erreicht werden.

In Kapitel 6 folgte die Analyse der Positioniereigenschaften der NPMM-200, die einen wesentlichen experimentellen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt. Die elektromagnetischen Aktoren erfordern im Betrieb eine kontinuierliche Positions- und Winkelregelung der Spiegelplatte. Somit werden die Positioniereigenschaften maßgeblich vom Regelungssystem und der Güte der Reglerparameter bestimmt. Aus diesem Grund wurden zunächst das permanente Positions- und Winkelrauschen bei deaktivierten Aktoren untersucht, da dies die erreichbare Präzision bestimmt. Das gemessene permanente Positionsruschen betrug weniger als 0,3 nm in allen drei Achsen. Im geregelten Zustand stieg es im Mittel auf bis zu 2,08 nm an. Die Betrachtungen zur Positionierauflösung zeigten, dass in den ungefilterten Messdaten Stufen von 2,5 nm deutlich zu unterscheiden waren. Durch eine nachträgliche Filterung konnte die Positionierauflösung verfeinert werden. Stufen im Subnanometerbereich waren je nach Wahl der Filterparameter eindeutig erkennbar. Die Betrachtung der Positionierreproduzierbarkeit ergab, dass beliebige Positionen im Messvolumen mit einer Standardabweichung der Sollposition von $< 0,03$ nm angefahren werden können. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden dann die Positioniereigenschaften für verschiedene typische Bewegungsformen analysiert und verglichen. Dabei zeigte sich, dass die middle-

ren Bahnabweichungen je nach Bewegungsform variierten und zumeist unter 100 nm lagen. Das zeigte die Analyse kreisförmiger Bewegungen mit unterschiedlichen Radien und Verfahrensgeschwindigkeiten eindrucksvoll.

Auf Basis dieser sehr positiven Ergebnisse wurden als nächstes die metrologischen Eigenschaften der NPMM-200 untersucht, um beurteilen zu können, inwiefern das Messgerät für die Vermessung größerer Objekte mit Nanometerpräzision geeignet ist. Hierfür war die Integration von Antastsystemen in die NPMM-200 erforderlich, die in Kapitel 7 vorgestellt wurden. Es handelte sich um einen Fokussensor der Firma SIOS Meßtechnik GmbH und einen im Rahmen dieser Dissertation neu entwickelten Tastschnittsensor als taktile Erweiterung des Fokussensors. Darüber hinaus wurde zur Mikromanipulation ein geeigneter Greifer der Firma SmarAct GmbH integriert.

Darauf aufbauend wurde in Kapitel 8 der metrologische Nachweis der NPMM-200 anhand der Vermessung ausgewählter Normale und Untersuchungen zur thermischen Stabilität im geregelten Betrieb erbracht. Die erzielten Messergebnisse mit der NPMM-200 wurden – sofern möglich – mit Referenzmessungen mit Hilfe der NMM-1 verglichen. Besonders hervorzuheben ist eine Stufenhöhenmessung an einem Quarz-Normal, das eine Stufenhöhe von 15 mm aufweist. Diese Höhe konnte mit einer Wiederholstandardabweichung von 3,06 nm gemessen werden.

Abschließend wurden im folgenden Kapitel 9 exemplarische Anwendungsmöglichkeiten der NPMM-200 aufgezeigt. Messergebnisse eines großen ebenen Spiegels und einer Asphäre wurden präsentiert.

Als Ergebnis dieser Arbeit konnte eine neue universelle Multisensorik-Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM-200 realisiert werden, welche in einem Messvolumen von 200 mm × 200 mm × 25 mm mit einer Messwertquantisierung von 5 pm, einer Positionieraufösung im Subnanometerbereich, einer Positionierreproduzierbarkeit < 0,3 nm und mittleren Bahnabweichungen < 100 nm arbeitet. Die metrologische Leistungsfähigkeit konnte anhand einiger Beispielmessungen, in denen Messunsicherheiten < 8 nm bei Stufenhöhenmessungen erreicht wurden, gezeigt werden. Somit konnten die gestellten Entwicklungsziele erreicht und die Potentiale der 3-D-Positioniereigenschaften aufgezeigt werden. In Bezug auf die Zielstellung der Dissertation sind als derzeitige Limitierung für die Präzision der NPMM-200 hauptsächlich von der Umgebung eingebrachte Schwingungen zu nennen, die

bewirken, dass das Positionsrauschen im statischen Zustand in der Größenordnung von $\approx 0,3$ nm liegt.

Diese Arbeit legt den Grundstein dafür, dass im Rahmen zukünftiger Arbeiten die 3-D-Messunsicherheit der NPMM-200 analysiert und die metrologische Leistungsfähigkeit optimiert werden können, um eine Abschätzung der zu erwartenden Messunsicherheit einer bestimmten Messaufgabe zu ermöglichen. Theoretische und experimentelle Vorarbeiten wurden am IPMS bereits begonnen. Dabei besteht eine große, derzeit nicht zufriedenstellend gelöste Herausforderung darin, dass geeignete Maßverkörperungen für derartig große Messvolumina geschaffen und Vergleichsmessungen mit anderen NPMMs – bspw. der *ISARA 400* – durchgeführt werden müssen.

Ein Gegenstand zukünftiger Arbeiten sollte in jedem Fall eine Verbesserung der Aufstellbedingungen der NPMM-200 sein. Beispielsweise kann man durch eine aktive Schwingungsdämpfung gezielt Störfrequenzen ausgleichen. Ein weiterer möglicher Bestandteil zukünftiger Arbeiten sollte sein, durch die Integration weiterer taktile und optischer Antastsysteme, die am IPMS zur Verfügung stehen, ein breiteres Anwendungsfeld für die NPMM-200 zu erschließen. Ein Ansatz ist beispielsweise die Umsetzung und Integration des Multisensorkonzepts auf Basis des Fokussensors in der NPMM-200, welches im SFB 622 entwickelt und in der NMM-1 bereits erprobt wurde. Um die Messdynamik für großflächige AFM-Messungen signifikant zu steigern, besteht ein weiterer vielversprechender Ansatz darin, sogenannte Cantilever-Arrays einzusetzen, die sich derzeit unter anderem im SFB 622 in Entwicklung befinden [228]. Die hierfür erforderliche hochdynamische und parallele Datenverarbeitung kann vom DAS durch Ergänzung weiterer FPGA-Module simultan mit den interferometrischen Längenmesswerten übernommen werden. Ebenso kann dann aufbauend auf den Arbeiten aus [205] großflächige Nanoanalytik umgesetzt werden.

Natürlich tragen die in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse auch zur technischen Weiterentwicklung der NPMM-200 und zur Konzeption neuer 3-D-NPMM mit noch größeren Messvolumina bei, die dem stetig wachsenden Bedarf an dimensioneller Mess- und Prüftechnik zur Fertigungs- und Qualitätskontrolle in der Mikro- und Nanotechnologie auch in Zukunft gerecht werden und die angestrebten Ziele der ITRS bzw. der *EMRP Roadmap* realisieren. Dies liegt jedoch in fernerer Zukunft und wird daher nicht weiter ausgeführt.

Anhang

A Elektronischrank der NPMM-200

Tabelle A.1 gibt eine Übersicht über die 19-Zoll-Einschübe und die jeweilige Höhe (gemessen in Höheneinheiten (HE)), die sich im Elektronischrank der NPMM-200 befinden. Abbildung A.1 zeigt eine Ansicht des Elektronischranks, in der die Komponenten beschriftet sind.

Tabelle A.1: 19-Zoll-Einschübe der NPMM-200-Elektronikeinheit

Bezeichnung	HE	Bemerkungen / Verwendungszweck
Lasereinheit	3	enthält drei Laserröhren für die x-, y- und z-Interferometer
xy-Interferometereinheit	3	Auswertekarten für die x- und y-Interferometer
z-Interferometereinheit	3	Auswertekarten für das z-Interferometer
PAU 0	3	Energieversorgung für die x- und y-Antriebe
PAU 1	3	Energieversorgung für die z-Antriebe
CS	3	Regelungssystem
SCS	3	Messablaufsteuerung
DAS	3	Messdatenerfassungssystem
GKK- und AKF-Einheit	3	Auswertekarten für die Referenz- und Winkelsensoren und Ansteuerung für die GKK-Einheiten
Supervisor-PC	4	Supervisor-PC
Switch	1	Switch für die Ethernet-Kommunikation auf der Maschinenseite (Anschluss der PXI-Systeme etc.)

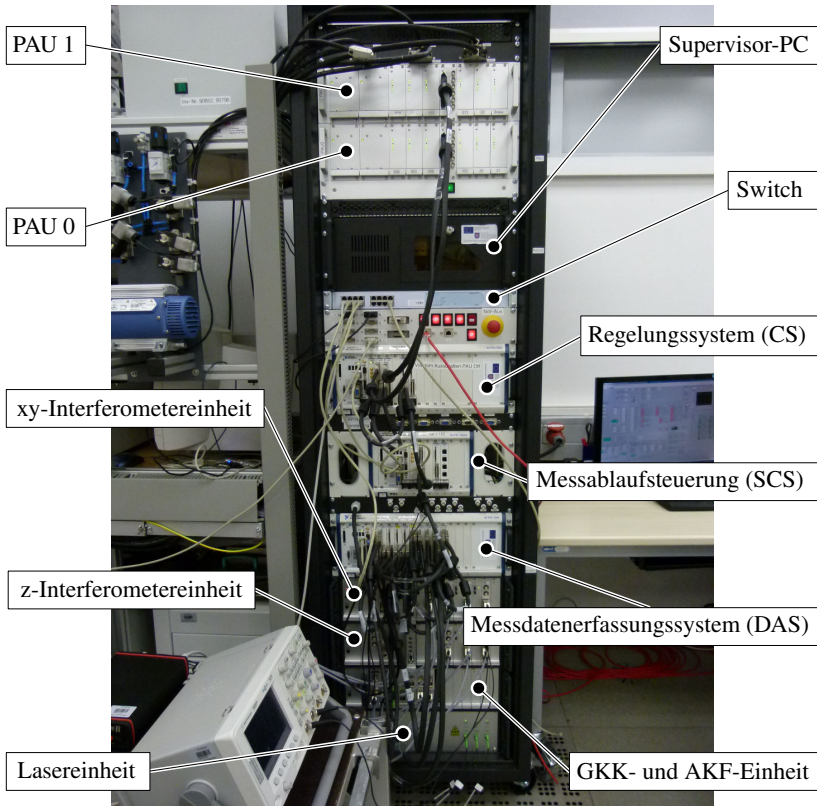


Abbildung A.1: Modularer Elektronenschrank der NPMM-200

B Elektrische Schnittstellenkonfiguration des DAS

Tabelle B.1: Elektrische Schnittstellenkonfiguration

Typ	Verwendungszweck	Anzahl
analoger Eingang	Interferometer zur Positions- und Winkelmessung der Spiegelecke	7×2
	Interferometer für Weißlichtsensor	1
	Interferometer für Tastsystem	4×2
	Spannungssignal für Tastsystem	8
	Winkelsensoren	4
	Referenzsensoren	3
	Antriebssystem	11
analoger Ausgang	Antriebssystem	11
	Spannungssignal für Tastsystem	3
digitaler Eingang	diverse	
digitaler Ausgang	diverse	

C Thermische Ausdehnungsketten

In Abbildung C.1 sind die thermischen Ausdehnungsketten der NPMM-200 für Messungen im Abbepunkt dargestellt. Abbildung C.2 zeigt ergänzend die Ausdehnungsketten für Messungen außerhalb des Abbepunkts. Die Tabellen C.1 und C.2 enthalten die Bezeichnungen der Strecken und deren Werkstoffe. Die Werkstoffparameter, die für die Berechnungen in dieser Abhandlung verwendet wurden, entsprechen den in [92] angegebenen Zahlenwerten.

Tabelle C.1: Horizontale Teilstrecken der thermischen Ausdehnungsketten

Strecke	Bezeichnung	Material
a	Abstand des lateralen Antastpunkts zur Befestigungsposition der kleinen Messobjektaufnahmeplatte	Invar 36 [®]
l_{txz}	Totstrecke des x- bzw. y-Interferometers	–
l_{xy}	Messstrecke des x- bzw. y-Interferometers	–
l_{xy1}	Platte zur Befestigung des Antastsystems	Zerodur [®]
l_{xy2}	Befestigungsplatte für Antastsystem	Invar 36 [®]
l_{xy3}	Abstand zwischen Messachse und Befestigung des Antastsystems	–
l_{xy4}	Abstand von der Befestigungsposition der Messobjektaufnahmeplatte bis zur seitlichen Spiegelfläche	Zerodur [®]
l_{xy5}	Grundkörper und Justiergelenk des x- bzw. y-Interferometers	Invar 36 [®]
l_{xy6}	Abstand von der Mittelachse des Spiegelplattenhalters bis zur seitlichen Spiegelfläche	Zerodur [®]

Tabelle C.2: Vertikale Teilstrecken der thermischen Ausdehnungsketten

Strecke	Bezeichnung	Material
b	Messweg/Hebelarm des Antastsystems	–
l_{tz}	Totstrecke des z-Interferometers	–
l_z	Messstrecke des z-Interferometers	–
l_{z1}	Höhe der Distanzsäule für das Antastsystem	Quarzglas (SQ 1)
l_{z2}	Befestigung des Antastsystems	Invar 36 [®]
l_{z3}	Antastsystem (Fokussensor mit Gehäuse aus Invar 36 [®])	–
l_{z4}	Höhe des Messobjekts	–
l_{z5}	Dicke des Messobjektträgers	Invar 36 [®]
l_{z6}	Durchmesser der Stahlkugeln	1.4301
l_{z7}	Dicke der Spiegelplatte in der Ausfräsung	Zerodur [®]
l_{z8}	Grundkörper und Justiergelenk des z-Interferometers	Invar 36 [®]
l_{z9}	Höhe der Distanzsäule des metrologischen Rahmens	Zerodur [®]
l_{z10}	Höhe des Spiegelplattenhalters	Invar 36 [®]

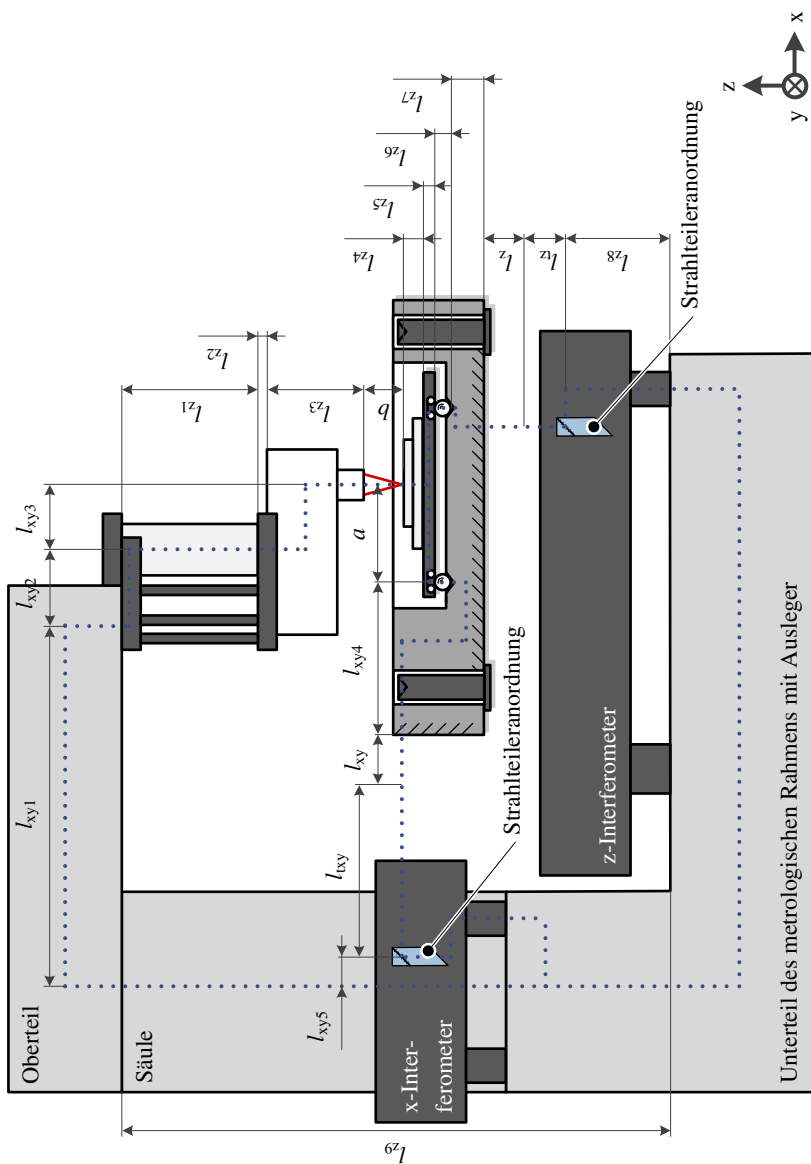


Abbildung C.1: Thermische Ausdehnungsketten für Messungen im Abbe-punkt

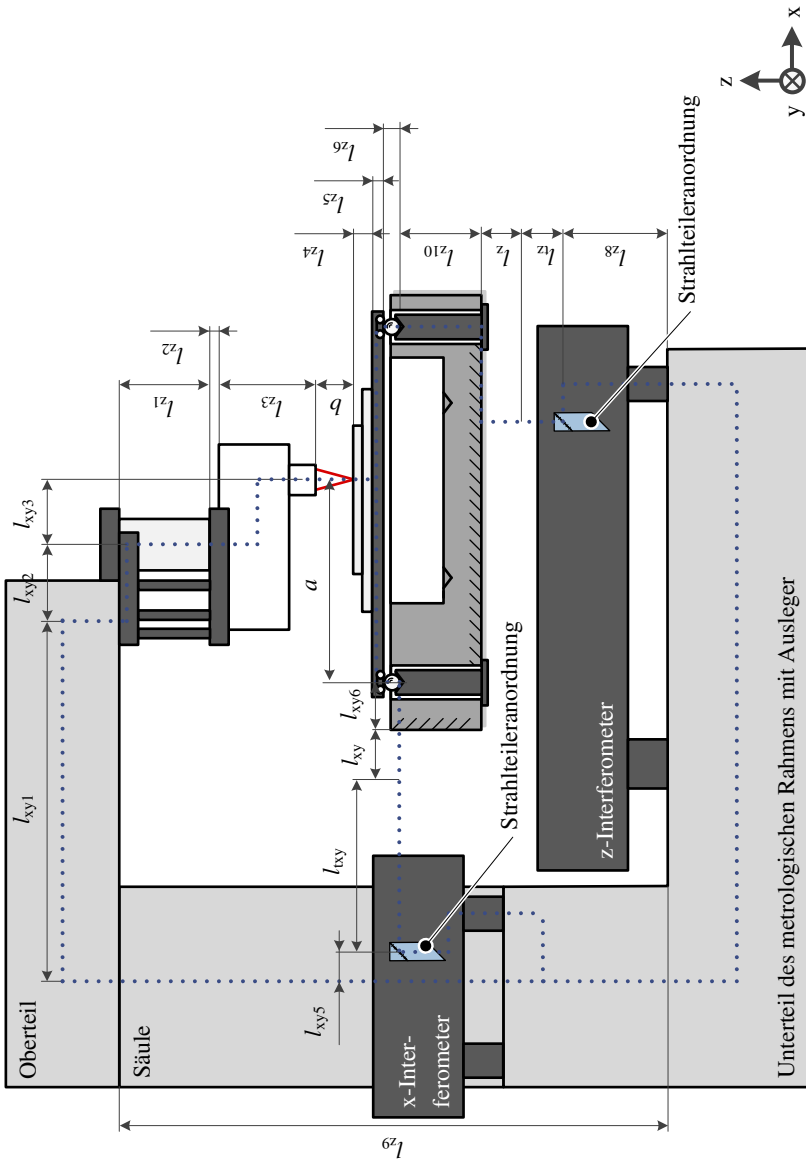


Abbildung C.2: Thermische Ausdehnungsketten für Messungen außerhalb des Abpunkts

D Messdaten der Spiegelplatte

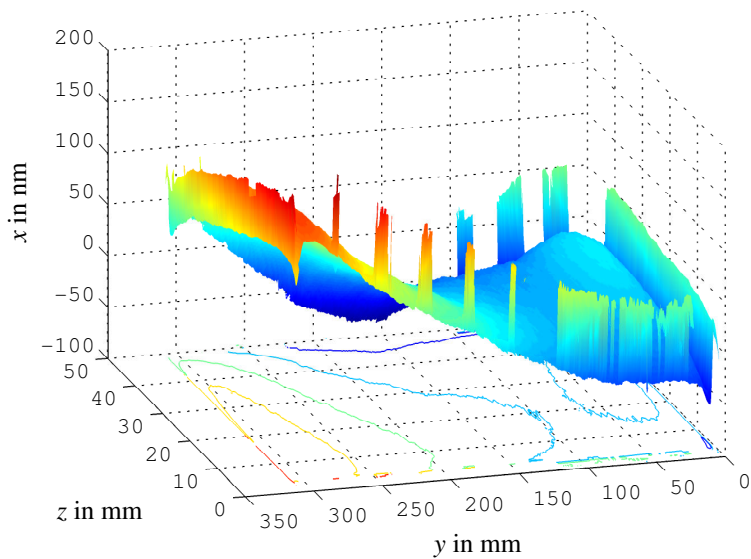


Abbildung D.1: Gemessene und gestichte Korrekturfläche des x-Spiegels

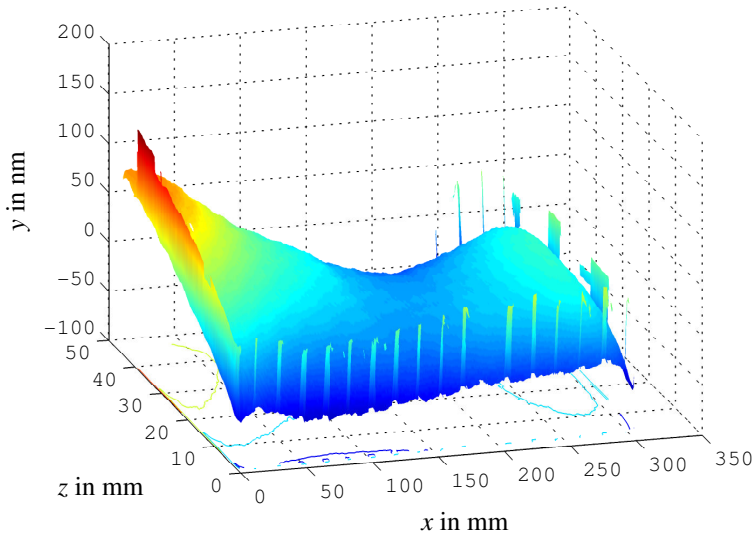


Abbildung D.2: Gemessene und gestichte Korrekturfläche des y-Spiegels

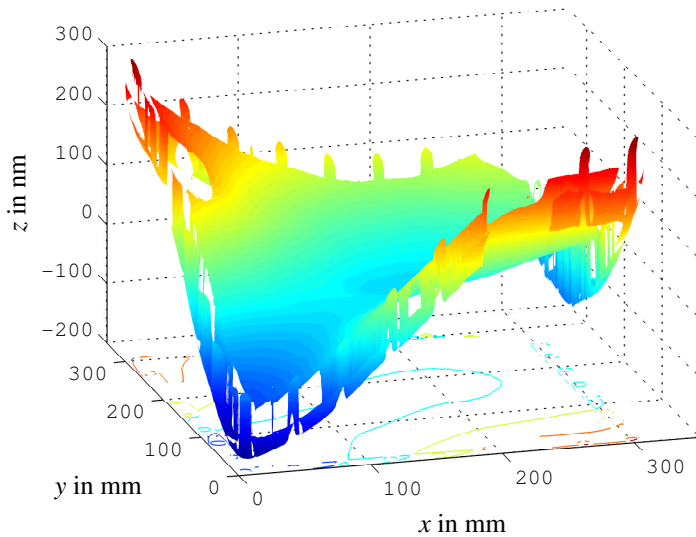


Abbildung D.3: Gemessene und gestichte Korrekturfläche des z-Spiegels

Literaturverzeichnis

- [1] ABBE, Ernst: Meßapparate für Physiker. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 10 (1890), S. 446–448
- [2] AGILENT TECHNOLOGIES: *Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit*. <http://www.agilent.com>. Abruf: Februar 2012. – Datenblatt
- [3] AGILENT TECHNOLOGIES: *Agilent Transducer Systems - Leading the Future for Extreme Accuracy Positioning Applications*. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-4913EN.pdf>. Abruf: Mai 2013. – Technische Information
- [4] ALIMEX METALLHANDELSGESELLSCHAFT MBH: *Alimex ACP 5080*. <http://www.alimex.de>. Abruf: März 2013. – Datenblatt
- [5] ALLEGRO MICROSYSTEMS INC.: *A 3340 Chopper-Stabilized, Precision Hall-Effect Switch*. <http://www.allegromicro.com>. Abruf: Juli 2012. – Datenblatt
- [6] AMICK, Hal; GENDREAU, Michael; BUSCH, Todd; GORDON, Colin: Evolving criteria for research facilities: I – Vibration. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 5933. San Diego (CA), USA, 2005
- [7] AMICK, Hal; GENDREAU, Michael; GORDON, Colin: Facility Vibration Issues for Nanotechnology Research. In: *Proc. Symp. on Nano Device Technology*. Hsinchu, Taiwan, 2002
- [8] AMTHOR, Arvid: *Modellbasierte Regelung von Nanopositionier- und Nanomeßmaschinen*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, September 2010
- [9] AMTHOR, Arvid; WERNER, Johannes; LORENZ, Andreas; ZSCHÄCK, Stephan; AMENT, Christoph: Asymmetric motion profile planning for nanopositioning and nanomeasuring machines. In: *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 224 (2010), Nr. 1, S. 79–92

- [10] AMTHOR, Arvid; ZSCHÄCK, Stephan; AMENT, Christoph: Position Control on Nanometer Scale based on an Adaptive Friction Compensation Scheme. In: *34th Annual conference of IEEE industrial electronics IECON*. Orlando (FL), USA, November 2008, S. 2568–2573
- [11] AMTHOR, Arvid; ZSCHÄCK, Stephan; AMENT, Christoph: Adaptive Reibkraftkompensation zur modellbasierten Positionsregelung von Nanopositionier- und Nanomeßmaschinen. In: *Automatisierungstechnik* 57 (2009), Nr. 2, S. 51–59
- [12] AMTHOR, Arvid; ZSCHÄCK, Stephan; AMENT, Christoph: Friction Compensation for Nanopositioning and Nanomeasuring Machines. In: *Advanced Motion Control, 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Nagaoka, Japan, März 2010
- [13] AMTHOR, Arvid; ZSCHÄCK, Stephan; AMENT, Christoph: High Precision Position Control Using an Adaptive Friction Compensation Approach. In: *IEEE Trans. Automat. Contr.* 55 (2010), Nr. 1, S. 274–278
- [14] AWATAR, Shorya; PARMAR, Gaurav: Physical and Control System Design Challenges in Large Range Nanopositioning. In: *5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*. Cambridge (MA), USA, 2010, S. 152–159
- [15] BAITINGER, Henner; STERNKOPF, Christian; VORBRINGER-DOROZHOVETS, Nataliya; HAUSOTTE, Tino; PERCLE, Brandon; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Interferometry for the next generation of nanopositioning and nanomeasuring machines. In: *Proceedings of the 11th euspen International Conference*, Bd. 1. Como, Italien, Mai 2011, S. 88–91
- [16] BALZER, Felix; GERHARDT, Uwe; HAUSOTTE, Tino; ALBRECHT, Katja; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Application of a novel fibre-coupled confocal sensor in a nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Proceedings of the 12th euspen International Conference*, Bd. 1. Stockholm, Schweden, Juni 2012, S. 88–91

- [17] BALZER, Felix; GERHARDT, Uwe; HAUSOTTE, Tino; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Fibre-coupled monochromatic zero-point sensor for precision positioning systems using laser interferometers. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074008–1 – 074008–8
- [18] BARNARD, H.; RANDALL, C.; BRIDGES, D.; HANSMA, P. K.: The long range voice coil atomic force microscope. In: *Rev. Sci. Instrum.* 83 (2012), Nr. 2, S. 023705–1 – 023705–4
- [19] BARTH, Sebastian: *Modellierung der Reibkraft auf Nanometerebene mit Hilfe eines zu entwickelnden Prüfstandes*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, November 2010
- [20] BARTZ, Wilfried: *Luftlagerungen: Grundlagen und Anwendungen*. 2., völlig Neubearbeitete und erweiterte Auflage. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verlag, 1993. – ISBN 3–8169–0992–2
- [21] BAUMER GROUP: *Ultraschall Näherungsschalter UNDK 10*. <http://www.baumer.com>. Abruf: April 2012. – Datenblatt
- [22] BAYER-HELMS, F.: Langzeitige Längenänderungen der Glaskeramik "Zerodur" als Auswirkung eines Diffusionsvorganges. In: *Metrologia* 23 (1987), Nr. 3, S. 145–151
- [23] BAYER-HELMS, F.; DARNEDDE, H.; EXNER, G.: Längenstabilität bei Raumtemperatur von Proben der Glaskeramik "Zerodur". In: *Metrologia* 21 (1985), Nr. 2, S. 49–57
- [24] BECKER, K.; HEYNACHER, E.: M400 – A Coordinate Measuring Machine with 10 nm Resolution. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 802. Den Haag, Niederlande, 1987, S. 209–216
- [25] BECKERT, Erik; HOFFMANN, Andrew; SAFFERT, Eugen: Development of a vertical wafer stage for high-vacuum applications. In: *Microelectronic Engineering* 57-58 (2001), S. 207–212
- [26] BEI KIMCO MAGNETICS: *Voice Coil Actuators - Applications and Product Selection Guide*. <http://www.beikimco.com/pdf/VCA%20App%20Product%20Guide.pdf>. Abruf: November 2011

- [27] BEI KIMCO MAGNETICS: *Voice Coil Actuator LA25-42-000A*. <http://www.beikimco.com/pdf/LA25-42-000A.pdf>. Abruf: Februar 2013. – Datenblatt
- [28] BESSASON, Bjarni; MADSHUS, Christian; FROYSTEIN, Hans A.; KOLBJORNSEN, Henning: Vibration criteria for metrology laboratories. In: *Meas. Sci. Technol.* 10 (1999), Nr. 11, S. 1009–1014
- [29] BIEDENBACH, Hans-Martin; BRUNNER, Josef; GLÄSNER, Kai; MORITZ, Günter; PFEIFLE, Jörg; RESCH, Josef: *I++ DME Dimensional Measurement Equipment Interface*. http://www.inspection-plusplus.de/deutsch/DME/Praesentationen/PDF/I++_DME_Spec_1_6.pdf. Abruf: Januar 2012
- [30] BÖCKER, J.; SCHMIDT, Alexander; SCHULZ, B.; ZIMMER, Detmar: Direktantriebe passend ausgewählt - Elektromagnetische Direktantriebe im Vergleich. In: *Antriebstechnik* 11 (2005), Nr. 2, S. 2–6
- [31] BÖCKH, Peter von; WETZEL, Thomas: *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. 4., bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2011 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-642-15958-9
- [32] BODSCHWINNA, Horst: *Oberflächenmesstechnik zur Beurteilung und Optimierung technischer Funktionsflächen*. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Habilitation, Januar 2000
- [33] BOGUE, Robert: MEMS sensors: past, present and future. In: *Sensor Review* 27 (2007), Nr. 1, S. 7–13
- [34] BOGUE, Robert: Nanometrology: a critical discipline for the twenty-first century. In: *Sensor Review* 27 (2007), Nr. 3, S. 189–196
- [35] BÖNSCH, G.; POTULSKI, E.: Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. In: *Metrologia* 35 (1998), Nr. 2, S. 133–139
- [36] Bos, Edwin: Nanometre level uncertainty with the Gannen XP. In: *Mikroniek* 48 (2008), Nr. 3, S. 28–32

- [37] Bos, Edwin: *Tactile 3D probing system for measuring MEMS with nanometer uncertainty*. Technische Universität Eindhoven, Dissertation, April 2008
- [38] Bos, Edwin; MOERS, Ton; RIEL, Martijn van: Trinano N100 3D Measurements with Nanometer Repeatability and Effects of Probe-Surface Interaction. In: *Annual Meeting of ASPE*. San Diego (CA), USA, Oktober 2012
- [39] BOSSE, Harald; BRAND, Uwe; DANZEBRINK, Hans-Ulrich; ET. AL.: *Nanometrology Foresight Review*. <http://www.co-nanomet.eu/content/Co-nanomet%20protected%20documents/training%20and%20resources/library/Foresight%20Review%20Final.pdf>. Abruf: Dezember 2011
- [40] BOSSE, Harald; WILKENING, Günter: Developments at PTB in nanometrology for support of the semiconductor industry. In: *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), Nr. 11, S. 2155–2166
- [41] BRECHER, Christian; WECK, Manfred: *Werkzeugmaschinen 2 - Konstruktion und Berechnung*. 8., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – ISBN 3–540–22502–1
- [42] BÜCHNER, Hans-Joachim; JÄGER, Gerd: Interferometrisches Messverfahren zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Messoberflächen. In: *Technisches Messen* 59 (1992), Nr. 2, S. 43–47
- [43] BÜCHNER, Hans-Joachim; JÄGER, Gerd: A novel plane mirror interferometer without using corner cube reflectors. In: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), Nr. 4, S. 746–752
- [44] BÜCHSENSCHÜTZ, Mirko; VOLKERT, Ralf; SATTEL, Thomas: Design Issues of Planar Active Magnetic Bearing Actuators with Low Power Dissipation. In: *Proceedings of the Actuator*. Bremen, Juni 2010, S. 677–680
- [45] BUICE, Eric S.; YANG, Hua; SMITH, Stuart; HOCKEN, Robert; SEUGLING, Richard; TRUMPER, David; OTTEN, David: Early testing of a coarse/fine precision motion control system. In: *Annual Meeting of ASPE*. Norfolk (VA), USA, Oktober 2005

- [46] BURO, Norbert: *Regelung elektromagnetisch gelagerter Rotoren mit parallelen Strukturen*. Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation, Juni 2002
- [47] CAGLIANI, Alberto; WIERZBICKI, Rafal; OCCHIPINTI, Luigi; PETERSEN, Dirch H.; DYVELKOV, Karin N.; SUKAS, Özlem S.; HERSTRØM, Berit G.; BOOTH, Tim; BØGGILD, Peter: Manipulation and in situ transmission electron microscope characterization of sub-100 nm nanostructures using a microfabricated nanogripper. In: *J. Micromech. Microeng.* 20 (2010), Nr. 3, S. 035009–1 – 035009–7
- [48] CHANG, Shuo H.; CHUNG, Kai T.; CHIEN, Hon C.: An Ultra-Precision $XY\Theta_z$ Piezo-Micropositioner – Part I: Design and Analysis. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control* 46 (1999), Nr. 4, S. 897–905
- [49] CHANG, Shuo H.; CHUNG, Kai T.; CHIEN, Hon C.: An Ultra-Precision $XY\Theta_z$ Piezo-Micropositioner – Part II: Experiment and Performance. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control* 46 (1999), Nr. 4, S. 906–912
- [50] ČÍP, Ondřej; ŠMÍD, Radek; ČÍŽEK, Martin; BUCHTA, Zdeněk; LAZAR, Josef: Study of the thermal stability of Zerodur® glass ceramics suitable for a scanning probe microscope frame. In: *Central European Journal of Physics* 10 (2012), Nr. 2, S. 447–453
- [51] CLAVERLEY, James D.; LEACH, Richard K.: A vibrating micro-scale CMM probe for measuring high aspect ratio structures. In: *Microsystem Technologies* 16 (2010), Nr. 8-9, S. 1507–1512
- [52] COMPTER, J.C.: Actuators for nano-positioning in vacuum. In: *Spring Topical Meeting of ASPE*. Pittsburgh (PA), USA, Mai 2006
- [53] CULPEPPER, Martin L.; ANDERSON, Gordon: Design of a low-cost nanomanipulator which utilizes a monolithic, spatial compliant mechanism. In: *Precision Engineering* 28 (2004), Nr. 4, S. 469–482
- [54] CUMMINGS, John; DOOGUE, Michael C.; FRIEDRICH, Andreas P.: *Recent Trends in Hall Effect Current Sensing*. <http://allegromicro>.

- com/en/Design-Center/Technical-Documents/
Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/
~/media/Files/Technical-Documents/
AN295045-Recent-Trends-In-Hall-Effect-Current-Sensing.
ashx. Abruf: März 2012
- [55] DABBS, Tim; GLASS, Monty: Fiber-optic confocal microscope: FOCON. In: *Applied Optics* 31 (1992), Nr. 16, S. 3030–3035
- [56] DAHINTEN, Andreas: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum thermischen Driftverhalten von Planspiegelinterferometern*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, März 2010
- [57] DENKENA, Berend; NEUBER, Cord-Christian; KALLAGE, Franz; PANNING, Lars: Aufbau und Regelung einer Magnetführung für Werkzeugmaschinen. In: *Proc. Appl. Math. Mech.* 6 (2006), Nr. 1, S. 801–802
- [58] DEVASIA, Santosh; ELEFThERIOU, Evangelos; MOHEIMANI, S. O. R.: A Survey of Control Issues in Nanopositioning. In: *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* 15 (2007), Nr. 5, S. 802–823
- [59] DÖHRING, Thorsten; JEDAMZIK, Ralf; THOMAS, Armin; HARTMANN, Peter: Forty years of Zerodur[®] mirror substrates for astronomy – Review and Outlook. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 7018. Marseille, Frankreich, Juni 2008, S. 70183B–1 – 70183B–12
- [60] DONKER, Rilpho; WIDDERSHOVEN, IVO; SPAAN, Henny: Isara 400 features mega volume vs. nano accuracy. In: *Mikroniek* 49 (2009), Nr. 5, S. 16–20
- [61] DONKER, Rilpho; WIDDERSHOVEN, IVO; SPAAN, Henny: Realization of Isara 400: a large measurement volume ultra-precision CMM. In: *Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology*. Kitakyushu, Japan, November 2009
- [62] DONKER, Rilpho; WIDDERSHOVEN, IVO; SPAAN, Henny: Isara 400: Enabling Ultra-precision Coordinate Metrology for Large Parts. In: *Proceedings of the 10th euspen International Conference*, Bd. 1. Delft, Niederlande, Mai 2010, S. 204–208

- [63] DONTSOV, Denis: *Homodyninterferometer zur berührungslosen Schwingungsanalyse*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Mai 2003
- [64] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GMBH: *Genauigkeit von Vorschubachsen*. März 2006. – Technische Information
- [65] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GMBH: *Längenmessgeräte verbessern die Bearbeitungsgenauigkeit*. März 2008. – Technische Information
- [66] DRUCK INCORPORATED: *Resonant Pressure Transducers RPT Series*. http://veronics.com/products/pressure_transducers-sensors/rptseries.pdf. Abruf: Mai 2012. – Datenblatt
- [67] ELLIPTEC RESONANT ACTUATOR AG: Der Elliptec Motor - neuartiges Motorkonzept. In: *Meditronic-journal* 1 (2009), Nr. 2
- [68] EPUCRET MINERALGUSSTECHNIK GMBH & Co. KG: Auf Gestelle aus Mineralguss ist Verlass. In: *Industrieanzeiger* (2012), Nr. 5, S. 8
- [69] ERBE, Torsten: *Beitrag zur systematischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl im Entwicklungsprozess*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Februar 2013
- [70] EVES, Brian J.: Design of a large measurement-volume metrological atomic force microscope (AFM). In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), Nr. 8, S. 084003–1 – 084003–5
- [71] FAN, Kuang-Chao; CHU, Chih-Liang; MOU, Jong-I: Development of a low-cost autofocusing probe for profile measurement. In: *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001), Nr. 12, S. 2137–2146
- [72] FAN, Kuang-Chao; FEI, Yetai; YU, Xiaofen; WANG, Weili; CHEN, Yejin: Study of a noncontact type micro-CMM with arch-bridge and nanopositioning stages. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007), Nr. 3, S. 276–284
- [73] FAN, Kuang-Chao; FEI, Yetai T.; YU, Xiaofen; CHEN, Yejin; WANG, Weili L.; CHEN, F.; LIU, Y. S.: Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements. In: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), Nr. 3, S. 524–532

- [74] FAN, Kuang-Chao; LAI, Zi-Fa; WU, Peitsung; CHEN, Yung-Chang; CHEN, Yejin; JÄGER, Gerd: A displacement spindle in a micro/nano level. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), Nr. 6, S. 1710–1717
- [75] FICHTER, E.F: A Stewart Platform- Based Manipulator: General Theory and Practical Construction. In: *The International Journal of Robotics Research* 5 (1986), Nr. 2, S. 157–182
- [76] FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C.: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: *Communications of the ACM* 24 (1981), Nr. 6, S. 381–395
- [77] FOULLON, Alexander: *Entwicklung eines optischen Tastschnittsensors*. Technische Universität Ilmenau, Masterarbeit, Juni 2012
- [78] FRITSCH, Reinhard: Vakuumgerechte Werkstoffe und Verbindungstechnik, Teil 2: Nichtlösbare Verbindungen an Bauteilen der Vakuumtechnik. In: *Vakuum in Forschung und Praxis* 2 (1990), Nr. 2, S. 104–112
- [79] FUJIWARA, M.; YAMAGUCHI, A.; TAKAMASU, K.; OZONO, S.: Evaluation of stages of nano-CMM. In: *Initiatives of precision engineering at the beginning of a millenium*, 2001, S. 634–638
- [80] FÜSSL, Roland; GRÜNWARD, Rainer; RAHNEBERG, Ilko; KREUTZER, Philipp: Uncertainty Consideration of the Coordinate System in Nanopositioning- and Nanomeasuring Machines. In: *Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 5, S. 235–238
- [81] FÜSSL, Roland; GRÜNWARD, Rainer; SCHMIDT, Ingomar: Messunsicherheitsanalyse von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit Hilfe eines neuen vektoriiellen Modellansatzes. In: *Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 9, S. 465–471
- [82] GAO, Wei; KIMURA, A.: A Three-axis Displacement Sensor with Nanometric Resolution. In: *Annals of the CIRP* 56 (2007), Nr. 1, S. 529–532
- [83] GAVRILENKO, V. P.; FILIPPOV, M. N.; NOVIKOV, Yu. A.; RAKOV, A. V.; TODUA, P. A.: Russian Standards for Dimensional Measurements for

- Nanotechnologies. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 7378. Monterey (CA), USA, 2009, S. 737812–1 – 737812–8
- [84] GLOBAL 450 CONSORTIUM: *Update to the 450 mm Equipment Performance Metrics*. http://www.g450c.org/G450C_EPM_Rev_1.pdf. Abruf: November 2013. – Forschungsbericht
- [85] GORDON, Colin G.: Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 1619. San Jose (CA), USA, 1991, S. 71–85
- [86] GRIBINA, Vera: *Aufbau und Untersuchung von fasergekoppelten konfokalen Sensoren*. Technische Universität Ilmenau, Masterarbeit, August 2011
- [87] GUDDEI, Bernhard; AHMED, Imad: Rolling Friction of Single Balls in a Flat-Ball-Flat-Contact as a Function of Surface Roughness. In: *Tribology Letters* 51 (2013), Nr. 2, S. 219–226
- [88] HACKEL, Tobias: *Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für Nanopräzisionsmaschinen*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Juni 2010
- [89] HAITJEMA, Han: Achieving traceability and sub-nanometer uncertainty using interferometric techniques. In: *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008), Nr. 8, S. 084002–1 – 084002–6
- [90] HASCHE, Klaus: Messtechnische Beiträge aus der PTB zur modernen Produktionstechnik. In: *Technisches Messen* 71 (2004), Nr. 7-8, S. 435–443
- [91] HAUSOTTE, Tino: *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, März 2002
- [92] HAUSOTTE, Tino: *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen: Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*. Technische Universität Ilmenau, Habilitation, März 2011
- [93] HAUSOTTE, TINO; JÄGER, Gerd; MANSKE, Eberhard; SAWODNY, Oliver: Control system of a nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Proceedings of the Actuator*. Bremen, Juni 2004, S. 123–126

- [94] HAUSOTTE, Tino; PERCLE, Brandon; GERHARDT, Uwe; DONTSOV, Denis; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Interference signal demodulation for nanopositioning and nanomeasuring machines. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074004–1 – 074004–8
- [95] HAUSOTTE, Tino; PERCLE, Brandon; JÄGER, Gerd: Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), Nr. 8, S. 084004–1 – 084004–8
- [96] HAUSOTTE, Tino; PERCLE, Brandon; VORBRINGER-DOROZHOVETS, Nataliya; BAITINGER, Henner; BALZER, Felix; GERHARDT, Uwe; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd; DONTSOV, Denis: Interferometric Measuring Systems of Nanopositioning and Nanomeasuring Machines. In: *10th IMEKO Symposium Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, VDI-Berichte*, Bd. 2156. Braunschweig, September 2011, S. 343–349
- [97] HEGEWALD, Thomas: *Modellierung des nichtlinearen Verhaltens piezokeramischer Aktoren*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, Februar 2008
- [98] HENNING, Hinrich: Vakuumgerechte Werkstoffe und Verbindungstechnik, Teil 1: Werkstoffe der Vakuumtechnik. In: *Vakuum in Forschung und Praxis* 2 (1990), Nr. 1, S. 30–34
- [99] HENSELMANS, Rens: *Non-contact Measurement Machine for Freeform Optics*. Technische Universität Eindhoven, Dissertation, April 2009
- [100] HENSELMANS, Rens; GUBBELS, G.; DRUNEN, C. van; VENROOY, B. van; LEIJTENS, J.: NANOMEFOS Non-Contact Measurement Machine for Aspheric and Freeform Optics. In: *International Conference on Space Optics*. Rhodes Island, Griechenland, 2010
- [101] HENSELMANS, Rens; ROSIELLE, Nick; KAPPELHOF, Pieter: *NANOMEFOS Nanometer Accuracy Non-contact Measurement of Free-form Optical Surfaces*. www.novinid.com/Cmm/Documents/CMM/875/NANOMEFOS.pdf. Abruf: April 2012

- [102] HERING, Ekbert: *Taschenbuch der Mathematik und Physik*. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–78683–2
- [103] HERING, Ekbert; VOGT, Alois; BRESSLER, Klaus: *Handbuch der Elektrischen Anlagen und Maschinen*. 1. Auflage. Berlin: Springer, 1999. – ISBN 3–540–65184–5
- [104] HESSE, Steffen: *Thermografieuntersuchungen an den 4 Spulengruppen der NPMM-200, vorgestellt im Rahmen eines SFB-Halbjahresberichts vom Teilprojekt „Nanopositioniersysteme großer Bewegungsbereiche“*. März 2012. – Forschungsbericht
- [105] HESSE, Steffen; BÜCHNER, Hans-Joachim; JÄGER, Gerd; SCHÄFFEL, Christoph; MOHR, Hans-Ulrich; LEISTRITZ, Bianca: First results of an interferometric controlled planar positioning system for 100 mm with zerodur slider. In: *Proceedings of the 10th euspen International Conference*, Bd. 1. Delft, Niederlande, Mai 2010, S. 457–461
- [106] HESSE, Steffen; MAASS, Torsten; SCHÄFFEL, Christoph; KATZSCHMANN, Michael: Reducing the positioning uncertainty of a linear direct drive system with 200 mm travel range. In: *Proceedings of the 7th euspen International Conference*. Bremen, Mai 2007
- [107] HESSE, Steffen; SCHÄFFEL, Christoph: Nanopositioniertechnik für große Bewegungsbereiche. In: *Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 9, S. 493–499
- [108] HESSE, Steffen; SCHÄFFEL, Christoph; MOHR, Hans-Ulrich; KATZSCHMANN, Michael; BÜCHNER, Hans-Joachim: Design and performance evaluation of an interferometric controlled planar nanopositioning system. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074011–1 – 074011–10
- [109] HEXAGON METROLOGY PTS GMBH: *QUINDOS - The PowerTrain Analysis Tool*. <http://www.quindos.com/deu/>. Abruf: 2011. – Juni
- [110] HEYNE, Marko: *Entwicklung einer vakuumtauglichen Wälzföhrung für planare Positionieraufgaben mit großem Verfahrbereich*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Juni 2009

- [111] HEYNE, Marko; BALZER, Felix; THESKA, René: Experimental investigation of the stiffness of planar ball guides. In: *Proceedings of the 12th euspen International Conference*, Bd. 2. Stockholm, Schweden, Juni 2012, S. 485–488
- [112] HEYNE, Marko; ERBE, Torsten; THESKA, René: Concept of high precision ball guideway with three DOFs. In: *Proceedings of the 15th International Conference Mechanika*. Kaunas, Litauen, April 2010, S. 176–181
- [113] HEYNE, Marko; KOWALLIK, Thomas; ERBE, Torsten; THESKA, René: Measurement of the percentage contact area of high precision planar ball guideways. In: *Proceedings of the 10th euspen International Conference*, Bd. 1. Delft, Niederlande, Mai 2010, S. 445–448
- [114] HEYNE, Marko; MEHNER, Hannes; ERBE, Torsten; THESKA, René: Experimental investigation in the friction characteristics of high precision planar ball guides. In: *Proceedings of the 11th euspen International Conference*, Bd. 2. Como, Italien, Mai 2011, S. 43–46
- [115] HOCKEN, Robert; FESPERMAN, R.; OVERCASH, Jerald; OZTURK, O.; STROUP, Charles: Engineering Nanotechnology: The Top Down Approach. In: *Key Engineering Materials* 381-382 (2008), S. 3–6
- [116] HOCKEN, Robert; TRUMPER, David; WANG, C.: Dynamics and Control of the UNCC/MIT Sub-Atomic Measuring Machine. In: *Annals of the CIRP* 50 (2001), Nr. 1, S. 373–376
- [117] HOFFMAN, D. M.; SINGH, B.; THOMAS, J. H.: *Handbook of vacuum science and technology*. 1. Auflage. San Diego (CA) USA: Academic Press, 1998. – ISBN 0–12–352065–7
- [118] HOFFMANN, Jörg: Tastsysteme für die Mikro- und Nanomesstechnik: Nanometeraufgelöste Oberflächenerfassung. In: *Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 5, S. 311–317
- [119] HOFMANN, Florian: Berührungslose Wegsensoren im Vergleich. In: *Sensor Magazin* (2008), Nr. 1, S. 6–10

- [120] HOLZAPFEL, Wolfgang: Advancements in Displacement Metrology Based on Encoder Systems. In: *Annual Meeting of ASPE*. Portland (OR), USA, Oktober 2008
- [121] HONEYWELL SENSING AND CONTROL: *HHH-4602-A/C Series Humidity Sensors*. http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=51480&la_id=1. Abruf: Mai 2012. – Datenblatt
- [122] HOSOE, Shigeru: Highly precise and stable laser displacement measurement interferometer with differential optical passes in practical use. In: *Nanotechnology* 4 (1993), Nr. 2, S. 81–85
- [123] HYPROSTATIK SCHÖNFELD GMBH: *PM-Regler für Führungen*. <http://hyprostatik.de/?id=25>. Abruf: September 2011
- [124] IBS PRECISION ENGINEERING: *ISARA Ultra Precision CMM*. August 2008. – Technische Information
- [125] IBS PRECISION ENGINEERING: *ISARA 400 Ultra Precision Coordinate Measuring Machine*. <http://www.ibspe.com/category/isara-400-3d-cmm.htm>. Abruf: März 2013. – Technische Information
- [126] INGENIEURBÜRO DR. HEILAND: *Definition von Schwingungskriterien - Grenzwerte der Gebrauchstauglichkeit für schwingungsempfindliche Nutzungen*. http://www.baudynamik.de/infomaterialien/grenzwerte_nano.pdf. Abruf: April 2013. – Technische Information
- [127] INSTITUT FÜR MIKROELEKTRONIK- UND MECHATRONIK-SYSTEME gGMBH: *Antriebe der NPMM-200*. März 2010. – Datenblatt
- [128] INTEL: *Intel 22 nm Technology*. <http://www.intel.com>. Abruf: Oktober 2011
- [129] ITRS: *International Technology Roadmap for Semiconductors*. http://www.itrs.net/links/2009ITRS/2009Chapters_2009Tables/2009_Metrology.pdf. Abruf: Dezember 2011

- [130] JÄGER, Gerd: The Abbe Comparator Principle - A Fundamental Principle for Precision Measurements and Nanofabrication. In: *13th International Conference on Mechatronics Technology*. Cebu, Philippinen, Oktober 2009
- [131] JÄGER, Gerd: Limitations of precision length measurements based on interferometers. In: *Measurement* 43 (2010), Nr. 5, S. 652–658
- [132] JÄGER, Gerd: Challenges and Limitations of Nanomeasuring Technology. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Graz, Österreich, Mai 2012, S. 1814–1818
- [133] JÄGER, Gerd; HAUSOTTE, Tino; MANSKE, Eberhard; BÜCHNER, Hans-Joachim; MASTYLO, Rostyslaw; DOROZHOVETS, Nataliya; HOFMANN, Norbert: Nanomeasuring and nanopositioning engineering. In: *Measurement* 43 (2010), Nr. 9, S. 1099–1105
- [134] JÄGER, Gerd; MANSKE, Eberhard; HAUSOTTE, Tino: Performance and limitation of nanomeasuring technology. In: *International Journal of Nanomanufacturing* 7 (2011), Nr. 1, S. 54–62
- [135] JÄGER, Gerd; MANSKE, Eberhard; HAUSOTTE, Tino; FÜSSL, Roland; GRÜNWALD, Rainer; BÜCHNER, Hans-Joachim; SCHOTT, Walter: Optical fibre-coupled miniature interferometers designed for application in micro and nano devices. In: *Annual Meeting of ASPE*. Orlando (FL), USA, Oktober 2004, S. 145–148
- [136] JÄGER, Gerd; MANSKE, Eberhard; HAUSOTTE, Tino; MASTYLO, Rostyslaw; DOROZHOVETS, Nataliya; HOFMANN, Norbert: Traceable Nanometrology Realized by Means of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine. In: *Key Engineering Materials* 381-382 (2008), S. 565–568
- [137] JÄGER, Gerd; MANSKE, Eberhard; HAUSOTTE, Tino; SCHOTT, Walter: Operation and Analysis of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine. In: *Annual Meeting of ASPE*. St. Louis (MO), USA, Oktober 2002, S. 299–304
- [138] JANISCH, Josef: Kleiner Effekt – Große Wirkung. In: *elektronik industrie* (2006), Nr. 7, S. 2–5

- [139] JAYARAM, Kaushik; JOSHI, Suhas S.: Development of a flexure-based, force-sensing microgripper for micro-object manipulation. In: *J. Micromech. Microeng.* 20 (2010), Nr. 1, S. 015001–1 – 015001–10
- [140] JONES, Chris: Compare non-contact displacement sensor technologies. In: *Power in Motion* (2008), Nr. 10, S. 12–13
- [141] JOUSTEN, Karl: *Wutz Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis; mit 109 Tabellen.* 9., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2006. – ISBN 978–3–8348–0133–3
- [142] JULABO LABORTECHNIK GMBH: *Betriebsanleitung Kälte-Umwälzthermostate FPW-50HL, Version 1.950.2809.* <http://www.julabo.de/sites/default/files/downloads/manuals/german/19502809-V1.pdf>. Abruf: Februar 2012
- [143] JUNGNICHEL, Uwe: *Miniaturisierte Positioniersysteme mit mehreren Freiheitsgraden auf der Basis monolithischer Strukturen.* Technische Universität Darmstadt, Dissertation, September 2004
- [144] KALLENBACH, Eberhard: *Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung.* 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978–3–8348–0968–1
- [145] KIEL, Henning: *Luftlager Elemente mit vollflächigem Luftaustritt unter Verwendung mikroporöser Werkstoffe.* Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, März 2003
- [146] KIESSHAUER, Clemens: *Reproduzierbare Positionierung mit Subnanometerauflösung in zwei räumlichen Achsen.* Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Januar 2009
- [147] KIM, Jong-Ahn; KIM, Jae W.; KANG, Chu-Shik; JIN, Jonghan; EOM, Tae B.: An interferometric calibration system for various linear artefacts using active compensation of angular motion errors. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), Nr. 7, S. 075304–1 – 075304–10
- [148] KIM, Keekyoung; LIU, Xinyu; ZHANG, Yong; SUN, Yu: Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic

- MEMS microgripper with two-axis force feedback. In: *J. Micromech. Microeng.* 18 (2008), Nr. 5, S. 055013–1 – 055013–8
- [149] KIM, Won jong; VERMA, Shobbit; SHAKIR, Huzefa: Design and precision construction of novel magnetic-levitation-based multi-axis nanoscale positioning systems. In: *Precision Engineering* 31 (2007), Nr. 4, S. 337–350
- [150] KLÖCKNER, Johannes; BALZER, Felix; ZSCHÄCK, Stephan; PERCLE, Brandon: Building a Nanomeasuring Machine Using LabVIEW and NI PXI. In: *National Instruments Graphical System Design Achievement Awards*. Austin (TX), USA, 2012
- [151] KOSAWADA, Tadashi; KONNO, Ken ichi; YAMAMURA, Shingo; KANAZAWA, Toshikatsu: Piezo micro probe sensor system to detect environmental stresses induced in living cells and tissues. In: *Microsystem Technologies* 11 (2005), Nr. 8-10, S. 943–949
- [152] KRAMAR, John: Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), Nr. 11, S. 2121–2128
- [153] KRAMAR, John; DIXSON, Ronald; ORJI, Ndubuisi G.: Scanning probe microscope dimensional metrology at NIST. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), Nr. 2, S. 024001–1 – 024001–11
- [154] KRAMAR, John; JUN, J; PENZES, W; SCIRE, F; TEAGUE, C; VILLARRUBIA, J; AMATUCCI, E; GILSINN, D: The Molecular Measuring Machine. In: *International Conference on Mechatronic Technology*. Hsinchu, Taiwan, 1998, S. 477–487
- [155] KRAMAR, John; JUN, Jay; PENZES, William B.; SCHEUERMANN, Vince P.; SCIRE, Fredric; TEAGUE, Clayton: Molecular Measuring Machine Design and Performance. National Institute of Standards and Technology, 2001. – Forschungsbericht
- [156] KRAUSE, Werner: *Grundlagen der Konstruktion: Elektronik, Elektrotechnik, Feinwerktechnik*. 8., bearbeitete Auflage. München Wien: Hanser, 2002. – ISBN 3–446–22014–3

- [157] KRAUSE, Werner: *Konstruktionselemente der Feinmechanik*. 3., stark bearbeitete Auflage. München [u.a.]: Hanser, 2004. – ISBN 3-446-22336-3
- [158] KREUTZER, Philipp: *Monte Carlo Simulation für metrologische Modelle von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Februar 2006
- [159] KÜNG, Alain; MELI, Felix; THALMANN, Rudolf: Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), Nr. 2, S. 319–327
- [160] LAMSTER, Christoph: *Experimentelle Untersuchung des Einflusses eines Flachkäfigs auf die Kraft-Weg-Kennlinie in planaren Wälzführungen*. Technische Universität Ilmenau, Bachelorarbeit, April 2012
- [161] LAN, Kuo-Jung; YEN, Jia-Yush; KRAMAR, John A.: Active vibration isolation for a long range scanning tunneling microscope. In: *Asian Journal of Control* 6 (2004), Nr. 2, S. 179–186
- [162] LANGLOTZ, ENRICO; DONTSOV, Denys; SCHOTT, Walter: 3D-Funktionalität in der Nanomess- und in der Nanopositioniertechnik. In: *Laser+Photonik* (2011), Nr. 1, S. 36–39
- [163] LARO, D.; PORCK, T.; SPRONCK, J.; EUK, J.; LEBEDEV, A.: Design of a magnetically levitated nm-resolution linear slider. In: *Proceedings of the 6th euspen International Conference*, Bd. 1. Baden bei Wien, Mai 2006, S. 103–106
- [164] LASER COMPONENTS GMBH: *Laser/Detector Modules*. <http://www.lasercomponents.com/de-en/product/laser-detector-modules/>. Abruf: April 2012. – Datenblatt
- [165] LAUTERLEIN, Alexander: *Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Kugelanzahl auf die Kraft-Weg-Kennlinie in planaren Wälzführungen*. Technische Universität Ilmenau, Bachelorarbeit, August 2012
- [166] LEACH, Richard; BOYD, Robert; BURKE, Theresa; DANZBRINK, Hans-Ulrich; DIRSCHERL, Kai; DZIOMBA, Thorsten; GEE, Mark; KOENDERS, Ludger; MORAZZANI, Valérie; PIDDUCK, Allan; ROY, Debdulal; UNGER,

- Wolfgang; YACOOT, Andrew: The European nanometrology landscape. In: *Nanotechnology* 22 (2011), Nr. 6, S. 062001–1 – 062001–15
- [167] LEACH, Richard; CLAVERLEY, James; GIUSCA, Claudiu; JONES, Christopher; NIMISHAKAVI, Lakshmi; SUN, Wenjuan; TEDALDI, Matthew; YACOOT, Andrew: Advances in engineering nanometrology at the National Physical Laboratory. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074002–1 – 074002–9
- [168] LEISTRITZ, Bianca; HESSE, Steffen: *Messtechnische Untersuchung der z-Aktorbaugruppe (LA25 mit Kühlkörper)*. November 2011. – Forschungsbericht
- [169] LI, Jing; SHEN, Yin-Lin; JEONG, Jaehwa; SCIRE, Fredric; KRAMAR, John: A compact, compound actuator for the Molecular Measuring Machine. In: *Annual Meeting of ASPE*. Portland (OR), USA, Oktober 2008
- [170] LINDIG, Otto; PANNHORST, Wolfgang: Thermal expansion and length stability of Zerodur in dependence on temperature and time. In: *Applied Optics* 24 (1985), Nr. 20, S. 3330–3334
- [171] LIU, Hongzhong; LU, Bingheng; DING, Yucheng; TANG, Yiping; LI, Dicheng: A motor-piezo actuator for nano-scale positioning based on dual servo loop and nonlinearity compensation. In: *J. Micromech. Microeng.* 13 (2003), Nr. 2, S. 295–299
- [172] LOTZ, Markus: *Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und Positioniermaschinen*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Februar 2009
- [173] LOTZ, Markus; HÖHNE, Günter; HACKEL, Tobias; FRANK, Thomas; THESKA, René: Design Method for Functional Components of Ultra High Precision Machines. In: *International Conference on Engineering Design*. Paris, Frankreich, August 2007
- [174] LOTZ, Markus; HÖHNE, Günther: Design guideline for stage mirrors of ultra high precision measuring and positioning machines. In: *53rd International Scientific Colloquium*. Ilmenau, September 2008

- [175] LUBRICANT CONSULT GMBH: *Products for High Vacuum Technology*. <http://www.lubcon.com>. Abruf: Januar 2013
- [176] LÜCKE, Peter: *Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip*. Universität Karlsruhe, Dissertation, Mai 2006
- [177] MACHLEIDT, Torsten; SPARRER, Erik; DOROZHOVETS, Nataliya; MANSKE, Eberhard; FRANKE, Karl-Heinz; KAPUSI, Daniel: Navigation in a Large Measurement Volume by Using AFM Technology as a Sensor System in the NPMM. In: *Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 5, S. 274–277
- [178] MACHLEIDT, Torsten; SPARRER, Erik; MANSKE, Eberhard; KAPUSI, Daniel; FRANKE, Karl-Heinz: Area-based optical 2.5D sensors of a nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074010–1 – 074010–6
- [179] MAHR GMBH: *Taster MarSurf MFW 1250*. <http://www.mahr.de>. Abruf: Juli 2012. – Datenblatt
- [180] MANSKE, Eberhard; FÜSSL, Roland: *SFB-Halbjahresbericht des Teilprojekts Nanometrologie 12/2012*. Dezember 2012. – Forschungsbericht
- [181] MANSKE, Eberhard; HAUSOTTE, Tino; MASTYLO, Rostyslaw; MACHLEIDT, Torsten; FRANKE, Karl-Heinz; JÄGER, Gerd: New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), Nr. 2, S. 520–527
- [182] MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd; FÜSSL, Roland; BALZER, Felix; MACHLEIDT, Torsten: Nanomess- und Nanopositioniergeräte für die nanometergenaue Positionierung, Messung und Bearbeitung von Oberflächen und Strukturen. In: *16. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*. Nürnberg, Mai 2012, S. 490–498
- [183] MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd; HAUSOTTE, Tino: Combination Of Multi-Sensor Technology And Multiple Measurement Strategies In Micro- And Nanometrology. In: *10th International Symposium on Measurement and Quality Control*. Osaka, Japan, September 2010, S. D6–075–1 – D6–075–4

- [184] MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd; HAUSOTTE, Tino: Prospects of Multi-Sensor Technology for Large-Area Applications in Micro- and Nanometrology. In: *Proceedings of NCSLI Workshop & Symposium*. National Harbor (MD), USA, 2011
- [185] MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd; HAUSOTTE, Tino; FÜSSL, Roland: Recent developments and Challenges of Nanopositioning and Nanomeasuring Technology. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074001–1 – 074001–10
- [186] MANSKE, Eberhard; RANGELow, Ivo; VORBRINGER-DOROZHovETS, Nataliya; BALZER, Felix; KÄSTNER, Marcus; HoFER, Manuel; GULIYEV, Elshad; AHMAD, Ahmad; TZETAN, Ivanov: 0.1-nanometer Resolution Positioning Stage for sub-10nm Scanning Probe Lithography. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 8680. San Jose (CA), USA, Februar 2013
- [187] MASTYLO, Rostyslaw: *Optische und taktile Nanosensoren auf der Grundlage des Fokusverfahrens für die Anwendung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Januar 2012
- [188] MASTYLO, Rostyslaw; DONTSOV, Denis; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 5856. München, 2005, S. 238–244
- [189] MASTYLO, Rostyslaw; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Entwicklung eines Fokussensors und Integration in die Nanopositionier- und Nanomessmaschine. In: *Technisches Messen* 71 (2004), Nr. 11, S. 596–602
- [190] MELI, Felix; KÜNG, Alain: Ultrapräzises Koordinatenmessgerät für Mikrobauteile. In: *metInfo* 12 (2005), Nr. 3, S. 4–10
- [191] MELI, Felix; KÜNG, Alain: Numerical Micro-CMM Simulation for the Application of Monte-Carlo Methods for the Uncertainty Estimation of Measured Dimensional Parameters. In: *Proceedings of the 10th euspen International Conference*, Bd. 1. Delft, Niederlande, Mai 2010, S. 91–94

- [192] MELI, Felix; THALMANN, Rudolf: Das Metrologie-Rasterkraftmikroskop. In: *OFMET Info* 6 (1999), Nr. 1, S. 1–7
- [193] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK: *Das Wirbelstrom-Prinzip*. <http://www.micro-epsilon.de/glossar/Wirbelstrom.html>. Abruf: Dezember 2012. – Technische Information
- [194] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK: Optisch, berührungslos, präzise - Optische Messtechnik für die Qualitätssicherung im Prozess. In: *Laser+Photonik* (2013), Nr. 4, S. 50–53
- [195] MOERS, Ton; RIEL, Martijn van; Bos, Edwin: Design and verification of the Trinano ultra precision CMM. In: *56th International Scientific Colloquium*. Ilmenau, September 2011
- [196] MOERS, Ton; RIEL, Martijn van; Bos, Edwin: Scanning results and repeatability testing of the TriNano ultra precision CMM. In: *Proceedings of the 13th euspen International Conference*, Bd. 1. Berlin, Mai 2013, S. 95–98
- [197] MOLENAAR, Lex: *A novel Planar Magnetic Bearing and Motor Configuration applied in a Positioning Stage*. Technische Universität Delft, Dissertation, August 2000
- [198] MOLENAAR, Lex; ZAAIJER, E. H.; BEEK, H. F.: A Novel Long-Stroke Planar Magnetic Bearing Configuration. In: *Proceedings of the Actuator*. Bremen, Juni 1998, S. 541–544
- [199] MÖLLER-WEDEL OPTICAL GMBH: *Elektronische Autokollimatoren*. <http://www.moeller-wedel-optical.com/produkte/elektronische-autokollimatoren/elcomat-hr.html>. Abruf: Mai 2012
- [200] MORCOS, Anthony C.: Voice Coil Actuators & Their Use In Advanced Motion Control Systems. In: *Motion* (1995), S. 25–27
- [201] MOSEBERG, Ralf: Hydrostatische Führungen. In: *Konstruktion* (2007), Nr. 8, S. 10–11

- [202] MÖSER, Michael; MÜLLER, Gerhard: *Handbook of engineering acoustics*. 2. Auflage. Heidelberg New York: Springer, 2009. – ISBN 3–540–24052–7
- [203] MÜLLER, Andreas: *Bericht zum Transfer- und Verbundprojekt NPMM-200*. Dezember 2010. – Interner Bericht
- [204] NEUBAUER, LUTZ: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem linearen, permanenterregten Schrittmotor*. Technische Universität Berlin, Dissertation, März 1987
- [205] NIEBELSCHÜTZ, Merten: *Multifunktionale Nanoanalytik für eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Juni 2009
- [206] NIESTER, Thomas: *Tribologisches Verhalten von nichtoxidischen Keramiken unter praxisnahen Bedingungen*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1992
- [207] NOMURA, Takehiko; SUZUKI, Ryouichi: Six-axis controlled nanometer-order positioning stage for microfabrication. In: *Nanotechnology* 3 (1992), Nr. 1, S. 21–28
- [208] Norm DIN EN ISO 5436-1 November 2000. *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale - Teil 1: Maßverkörperungen*
- [209] Norm DIN EN ISO 10360-1 Juli 2003. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe*
- [210] NOSE, Tetsuro; TAKAHASHI, Fumiaki; NAKABAYASHI, Masashi; MORITA, Hidehiko; KOSUGI, Nobumasa: NEXCERA: Ultra Low Thermal Expansion Ceramics. In: *Nippon Steel Technical Report* (2001), Nr. 84, S. 5–11
- [211] OVERCASH, Jerald; STROUP, Charles; HOCKEN, Robert: Recent developments and upgrades in-progress of a precision six degree-of-freedom magnetically suspended measuring instrument. In: *Annual Meeting of ASPE*. Dallas (TX), USA, Oktober 2007

- [212] PACHOLIK, Alexander; KLÖCKNER, Johannes; MÜLLER, Marcus; GUSCHINA, Irina; FENGLER, Wolfgang: LiSARD: LabVIEW Integrated Software Architecture for Reconfigurable Devices. In: *International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs*. Cancun, Mexico, 2011
- [213] PANASONIC CORPORATION: *Ultra Accuracy 3-D Profilometer*. http://industrial.panasonic.com/ww/products_e/product_cat2/ADAH000_e/ADAH000_e/ua3p_siyou_e.html. Abruf: Oktober 2011
- [214] PARKEM AG MOTION CONTROL: *Parkem Direktantriebstechnik*. <http://www.parkem.ch>. Abruf: November 2011
- [215] PERCLE, Brandon: *Piezo LEGS-Antrieb - Einsatzmöglichkeiten in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Januar 2007
- [216] PERCLE, Brandon; KLÖCKNER, Johannes; MANSKE, Eberhard; FENGLER, Wolfgang: Signal and data processing in high-precision measuring machines - a case study of next-generation NPMMS. In: *56th International Scientific Colloquium*. Ilmenau, September 2011
- [217] PERCLE, Brandon; KLÖCKNER, Johannes; MANSKE, Eberhard; FENGLER, Wolfgang: Teilsystem zur positionsbezogenen Messdatenverarbeitung für eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine. In: *Virtuelle Instrumente in der Praxis: Mess-, Steuer-, Regel- und Embedded-Systeme*, 2012, S. 198–202
- [218] PEROVIĆ, Božina: *Hydrostatische Führungen und Lager: Grundlagen, Berechnung und Auslegung von Hydraulikplänen*. 1. Auflage. Berlin: Springer, 2011. – ISBN 978–3–642–20297–1
- [219] PFEIFER, Tilo; SCHMITT, Robert: *Fertigungsmesstechnik*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg, 2010. – ISBN 978–3–486–59202–3
- [220] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Hexapoden, Parallelkinematiken*. http://www.physikinstrumente.de/de/pdf_extra/2009_PI_Katalog_Hexapoden_Parallelkinematiken.pdf. Abruf: September 2011

- [221] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Kapazitive Positionssensoren - Nanomesstechnik*. http://www.physikinstrumente.de/de/pdf_extra/PI_07_Brosch_Kapazitive_Nanomesstechnik_Kapazitiver_Wegsensor_Positions_Sensor_C.pdf. Abruf: März 2012. – Datenblatt
- [222] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Einsatz von Piezoaktoren in der Nanopositionierung*. <http://www.piezo.de>. Abruf: Mai 2013. – Tutorium
- [223] POLAJZER, Bostjan: *Magnetic Bearings, Theory and Applications*. 1. Auflage. Online-Buch: Sciyo, 2010
- [224] PRECITEC GMBH & Co. KG: *Optische Messköpfe*. <http://www.precitec.de/downloads/datenblatt-optische-messkoepfe-und-sensoren/>. Abruf: Dezember 2012. – Datenblatt
- [225] PRITSCHOW, Günter: Parallel Kinematic Machines (PKM) – Limitations and New Solutions. In: *Annals of the CIRP* 49 (2000), Nr. 1, S. 275–280
- [226] PROCTOR, F. M.; RIPPEY, W. G.; HORST, J. A.; FALCO, J. A.; KRAMER, T. R.: Interoperability Testing for Shop Floor Measurement. In: *Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*. Gaithersburg (MD), USA, 2007, S. 289–293
- [227] QIU, Zhen; PULSKAMP, Jeffrey; LIN, Xianke; RHEE, Choong-Ho; WANG, Thomas; POLCAWICH, Ronald; OLDHAM, Kenn: Large displacement vertical translational actuator based on piezoelectric thin films. In: *J. Micromech. Microeng.* 20 (2010), Nr. 7, S. 075016–1 – 075016–10
- [228] RANGELOW, IVO W.; IVANOV, Tzvetan; VOLLAND, Burkhard E.; DONTSOV, Denis; SAROV, Yanko; IVANOVA, Katerina; PERSAUD, Arun; FILENKO, Denis; NIKOLOV, Nikolaj; ZIER, Michael; SCHMIDT, Bernd; GOTSZALK, Teodor; SULZBACK, Thomas: Raster-Sonden-Mikroskopie mit Cantilever-Arrays. In: *Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 9, S. 485–492

- [229] RAUER, Emanuel: *Abschlussbericht zur Tätigkeit als Hilfwissenschaftler: Temperaturfeldsimulationen in der Vakuumkammer der NPM-200*. Mai 2013. – Interner Bericht
- [230] RECKNAGEL, Christian; ROTHE, Hendrik: A concept for automated nanoscale atomic force microscope (AFM) measurements using a priori knowledge. In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), Nr. 8, S. 084026–1 – 084026–6
- [231] RENISHAW PLC: *High-precision laser interferometer feedback systems*. <http://www.renishaw.de>. Abruf: Juni 2012. – Technische Information
- [232] Richtlinie VDI 2038 Blatt 2 Januar 2013. *Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen; Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik; Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung*
- [233] RIEL, Martijn van; Bos, Edwin: 3D vibrating probe for measuring microfeatures with nanometer uncertainty. In: *56th International Scientific Colloquium*. Ilmenau, September 2011
- [234] RIEL, Martijn van; MOERS, Ton: Nanometer uncertainty for a micro probe. In: *Mikroniek* 50 (2010), Nr. 4, S. 13–17
- [235] RIEL, Martin van; Bos, Edwin; HOMBURG, F.G.A.: Design of a Low-cost CMM with Nanometer Uncertainty. In: *Proceedings of the 10theuspen International Conference*, Bd. 1. Delft, Niederlande, Mai 2010, S. 384–387
- [236] RS COMPONENTS: *Heat Sink Compound*. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/02b8/0900766b802b8c2a.pdf>. Abruf: November 2011. – Datenblatt
- [237] RUIJL, Theo Anjes M.: *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine*. Technische Universität Delft, Dissertation, Februar 2001
- [238] RUSKOWSKI, Martin: *Aufbau und Regelung aktiver Magnetführungen*. Universität Hannover, Dissertation, Juni 2004

- [239] RYU, Jae W.; GWEON, Dae-Gab; MOON, Kee S.: Optimal design of a flexure hinge based XY Θ wafer stage. In: *Precision Engineering* 21 (1997), Nr. 1, S. 18–28
- [240] SALZBERGER, Johann: Präzise Weggefährten - Entwicklungen in der Abstandsmessung bei Opto- und Wirbelstrom-Sensoren. In: *KEM* (2011), Nr. 5, S. 22–25
- [241] SATTEL, Thomas; VOLKERT, Ralf; HESSE, Steffen; SCHÄFFEL, Christoph: Planar Magnetic Drives and Bearings for Multi-Axis Nanopositioning Machines with Large Travel Ranges. In: *Proceedings of the Actuator*. Bremen, Juni 2010, S. 276–279
- [242] SCHÄFFEL, Christoph: *Untersuchungen zur Gestaltung integrierter Mehrkoordinatenantriebe*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Juni 1996
- [243] SCHÄFFEL, Christoph; HESSE, Steffen: *Nachrechnung der x-y-Antriebe: magnetisch, mechanisch*. August 2009. – Forschungsbericht
- [244] SCHÄFFEL, Christoph; HESSE, Steffen; MOHR, Hans-Ulrich: Investigation of the noise behaviour of aerostatic bearings for Ultra-Precisions Stages. In: *Proceedings of the 4th euspen International Conference*, Bd. 1. Glasgow, Schottland, 2004, S. 382–383
- [245] SCHLUMS, Henning: *Grundlagen für die Auslegung von aerodynamischen Gleitlagern und Hochdruck-Gasdichtungen*. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, Juni 1996
- [246] SCHMIDT, Ingomar: *Beiträge zur Verringerung der Messunsicherheit der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, September 2008
- [247] SCHMIDT, Ingomar; HAUSOTTE, Tino; GERHARDT, Uwe; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Investigations and calculations into decreasing the uncertainty of a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPM-Machine). In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), Nr. 2, S. 482–486
- [248] SCHNEEBERGER GMBH: *Linearführungen und Umlaufkörper*. http://www.schneeberger.com/fileadmin/files/Download_PDF_s/Linearfuehrungen_de.pdf. Abruf: August 2011

- [249] SCHÖDEL, R.; SUGAWARA, J.; KOSUGI, N.; UNNO, H.: Thermal expansion and long term stability of ceramics NEXCERA studied by absolute length measurements using multiple wavelengths imaging interferometry. In: *Proceedings of the 12th euspen International Conference*, Bd. 1. Stockholm, Schweden, Juni 2012, S. 263–267
- [250] SCHOLLAND, Henning: *Konstruktion einer planaren Wälzföhrung für Nanopositionier- und -messmaschinen*. Technische Universität Ilmenau, Masterarbeit, Dezember 2012
- [251] SCHOTT AG: *TIE-37: Thermal expansion of Zerodur®*. http://www.schott.com/advanced_optics/german/download/tie-37_thermal_expansion_of_zerodur_v2b.pdf. Abruf: Februar 2012. – Forschungsbericht
- [252] SCHULTZ, Albert: *Simulationsgestützter Entwurf elektromagnetischer Linearaktoren für fluidtechnische Ventile*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, September 2006
- [253] Schutzrecht DE 10 2004 051 962 B4 (2007-08-09). Technische Universität Ilmenau. Pr.: DE 10 2004 051 962 B4 (2004-10-26). – Bezeichnung: Vorrichtung zur interferometrischen Messung der Raumkoordinaten eines Objektes
- [254] Schutzrecht DE 10 2008 037 044 A1 (2010-02-18). AB SKF, Göteborg, SE. Pr.: DE 10 2008 037 044 A1 (2008-08-08). – Bezeichnung: Element eines Linearführungssystems und Verfahren zum Betreiben des Elements
- [255] Schutzrecht DE 10 2009 024 130 A1 (2010-12-02). Technische Universität Ilmenau. Pr.: DE 10 2009 024 130 A1 (2009-05-29). – Bezeichnung: Verfahren zur echtzeitfähigen Bahnplanung kontinuierlicher, rucksprungsfreier Sollwerttrajektorien
- [256] Schutzrecht DE 100 36 428 A1 (2002-02-14). Rexroth Star GmbH. Pr.: DE 100 36 428 A1 (2000-07-26). – Bezeichnung: Linearführungseinrichtung
- [257] Schutzrecht DE 101 10 225 A1 (2002-09-26). Schott Glas. Pr.: DE 101 10 225 A1 (2001-03-02). – Bezeichnung: Glaskeramik

- [258] Schutzrecht DE 195 11 973 A1 (1996-12-05). Technische Universität Ilmenau. Pr.: DE 195 11 973 A1 (1995-04-02). – Bezeichnung: Feldgeführter planarer Präzisionsantrieb
- [259] Schutzrecht DE 197 45 216 C2 (1999-05-12). Heinzl, Joachim; Schulz, Bernd. Pr.: DE 197 45 216 C2 (1997-10-13). – Bezeichnung: Luftlager und Verfahren zum Einstellen eines Luftlagers
- [260] Schutzrecht EP 0 084 144 (1983-07-27). Firma Carl Zeiss. Pr.: DE 32 01 007 (1982-01-15). – Bezeichnung: Dreidimensionale interferometrische Längenmesseinrichtung
- [261] Schutzrecht US 3,013,467 (1961-12-19). Minsky, Marvin. Pr.: US 3,013,467 (1957-11-07). – Bezeichnung: Microscopy Apparatus
- [262] Schutzrecht US 4,538,911 (1985-09-03). Carl-Zeiss-Stiftung. Pr.: DE 32 01 007 (1982-01-15). – Bezeichnung: Three-Dimensional interferometric length-measuring apparatus
- [263] SCHWEITZER, G.: Active magnetic bearings - chances and limitations. In: *6th International Conference on Rotor Dynamics*. Sydney, Australien, 2002
- [264] SHAFIR, E.; BERKOVIC, G.: Expanding the realm of fiber optic confocal sensing for probing position, displacement, and velocity. In: *Applied Optics* 45 (2006), Nr. 30, S. 7772–7777
- [265] SHARP: *Red Hologram Laser for DVD Car Navigation GH5D305B3D*. April 2012. – Datenblatt
- [266] SHEN, Qi: *Untersuchungen zu einem fasergekoppelten konfokalen Sensor mit zwei Wellenlängen*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, September 2009
- [267] SiMETRICS GMBH: *Vertical Standard VS*. <http://www.simetrics.de/pdf/Vs.pdf>. Abruf: April 2012
- [268] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor*. http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/SP_dt_2008.pdf. Abruf: April 2013. – Datenblatt

- [269] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1*. http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/NMM-1_dt_2013.pdf. Abruf: April 2013. – Datenblatt
- [270] SMARACT GMBH: *Grippers*. <http://www.smaract.de/index.php/products/grippers>. Abruf: Mai 2013. – Technische Information
- [271] SONY CORPORATION: *Sony Video Network Station SNT-V704*. <http://www.sony.de>. Abruf: Februar 2012. – Datenblatt
- [272] SPAAN, Henny: *Realization of Isara 400: A large measurement volume ultra-precision CMM*. http://www.npl.co.uk/upload/pdf/091028_microparts_spaan.pdf. Abruf: Juli 2010
- [273] SPAAN, Henny; DONKER, Rilpho; WIDDERSHOVEN, Ivo: Isara 400: Development of an ultra-precision CMM for 3D measurement of large parts. In: *Spring topical meeting of ASPE*. Albuquerque (NM), USA, 2009
- [274] SPAAN, Henny; DONKER, Rilpho; WIDDERSHOVEN, Ivo: Isara 400: Enabling Ultra-Precision Coordinate Metrology For Large Parts. In: *10th International Symposium on Measurement and Quality Control*. Osaka, Japan, September 2010, S. E3-053-1 – E3-053-4
- [275] SPARRER, Erik; MACHLEIDT, Torsten; HAUSOTTE, Tino; FRANKE, Karl-Heinz; MANSKE, Eberhard: A framework for using optical sensors in nanomeasuring machines over I++/DME. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074013-1 – 074013-8
- [276] SPARRER, Erik; MACHLEIDT, Torsten; HAUSOTTE, Tino; MANSKE, Eberhard; FRANKE, Karl-Heinz: Integration of CMM software standards for nanopositioning and nanomeasuring machines. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 8031. Orlando (FL), USA, 2011
- [277] SPILLER, Frank; GUBI, Thiemo; MOLLENHAUER, Olaf; SCHERGE, Matthias: Besonderheiten beim Einsatz von Präzisionsantrieben im Vakuum. In: *Konstruktion* (1999), Nr. 11/12, S. 25–28
- [278] STAMM, Uwe; SCHWOERER, Heinrich; LEBERT, Rainer: Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie. In: *Physik Journal* 1 (2002), Nr. 12, S. 33–49

- [279] STERNKOPF, Christian: *Laserinterferometrische Vergleichsmessungen im Vakuum*. Technische Universität Ilmenau, Bachelorarbeit, August 2009
- [280] STEWART, D.: A Platform with Six Degrees of Freedom. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Bd. 180, 1965/66, S. 371–386
- [281] STÖCKER, Horst: *Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten*. 4., korrigierte Auflage. Thun Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2000. – ISBN 3–8171–1627–6
- [282] STÖLTING, Hans-Dieter; KALLENBACH, Eberhard; AMRHEIN, Wolfgang: *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. 4., neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2011. – ISBN 3–446–42392–3
- [283] STOYANOV, Stoyan; BAILEY, Chris; LEACH, Richard; HUGHES, Ben; WILSON, Alan; O’NEILE, William; DOREY, Robert A.; SHAW, Christopher; UNDERHILL, Daniel; ALMOND, Heather: Modelling and prototyping the conceptual design of 3D CMM micro-probe. In: *Electronics System-Integration Technology Conference*. Greenwich, England, September 2008, S. 193–198
- [284] STRELLE, Hendrik: *Optimierung eines optischen Tastschnittsensors und Untersuchung der metrologischen Eigenschaften*. Technische Universität Ilmenau, Masterarbeit, Oktober 2013
- [285] STRIBECK, Richard: Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. In: *VDIZ* 46 (1902), S. 1341–1348
- [286] SUN, Lining; WANG, Jiachou; RONG, Weibin; LI, Xinxin; BAO, Hai-fei: A silicon integrated micro nano-positioning XY-stage for nanomanipulation. In: *J. Micromech. Microeng.* 18 (2008), Nr. 12, S. 125004–1 – 125004–9
- [287] SWAN, Greg: Displacement measuring interferometry. In: *Mikroniek* 50 (2010), Nr. 4, S. 18–21
- [288] TAKAHASHI, Akira: Long-term dimensional stability of a line scale made of low thermal expansion ceramic NEXCERA. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 3, S. 035001–1 – 035001–10

- [289] TAKAMASU, Kiyoshi; FUJIWARA, M.; NAOI, H.; OZONO, Shigeo: Friction drive system for Nano-CMM. In: *Proc. Mechatronics*. Warschau, Polen, 2000, S. 565–568
- [290] TAKAMASU, Kiyoshi; FUJIWARA, M.; YAMAGUCHI, A.; HIRAKI, Masahiko; OZONO, Shigeo: Evaluation of Thermal Drift of Nano-CMM. In: *Proceedings of the 2nd euspen International Conference*. Turin, Italien, Mai 2001
- [291] TAKAMASU, Kiyoshi; HIRAKI, Masahiko; ENAMI, Kazuhiro; OZONO, Shigeo: Development of Nano-CMM and Parallel-CMM — CMM in the 21th Century. In: *International Dimensional Metrology Workshop*. USA, 1999
- [292] TAKEUCHI, Hiroyuki; YOSIZUMI, Keiichi; TSUTSUMI, Hideki: Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer Using Atomic Force Probe of Measuring Nanometer. In: *Winter Topical Meeting of ASPE*. Chapell Hill (NC), US, Februar 2004
- [293] TEAGUE, E. C.; LINHOLM, L. W.; CRESSWELL, M. W.; PENZES, W. B.; KRAMAR, John A.; SCIRE, F. E.; VILLARRUBIA, J. S.; JUN, J. S.: Metrology Standards for Advanced Semiconductor Lithography Referenced to Atomic Spacings and Geometry. In: *Proc. IEEE Int. Conference on Microelectronic Test Structures*, 1993, S. 213–217
- [294] TEO, T. J.; YANG, L.; LIN, W.: A flexure-based electromagnetic linear actuator for nano-positioning. In: *SIMTech technical reports 7* (2006), Nr. 1, S. 32–37
- [295] TETRA GESELLSCHAFT FÜR SENSORIK UND ROBOTIK UND AUTOMATION MBH: *Produktinformation Faseroptische Sensoren FOS*. http://www.tetra-ilmenau.de/downloads/TETRA_FOS_Produktinformation_07-2011_DT.pdf. Abruf: Mai 2012. – Datenblatt
- [296] THESKA, René; FRANK, Thomas; HACKEL, Tobias; HÖHNE, Günter; LOTZ, Markus: Methodical Approach for Performance Rating during the Design Process of Precision Machines. In: *International Conference on Engineering Design*. Melbourne, Australien, August 2005

- [297] THOME PRÄZISION: *Präzisionsgranitteile.* <http://www.thome-praezision.de/deu/praezisionsgranitteile-messplatten.html>. Abruf: Januar 2012. – Gesamtkatalog
- [298] TREFFERS, Ernst; BOS, Edwin; MOERS, Ton: 3D Taktil Messen im Mikrometerbereich. In: *4. Fachtagung Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik, VDI-Berichte*, Bd. 2133. Erlangen, Oktober 2011, S. 61–70
- [299] TRINANO: *Trinano Measurement Volume.* http://www.trinano.eu/Measurement_volume.php. Abruf: Mai 2013. – Datenblatt
- [300] TRINANO: *Trinano Products.* <http://www.trinano.eu/products.php>. Abruf: November 2013. – Datenblatt
- [301] TSUTSUMI, Hideki; YOSIZUMI, Keiichi; TAKEUCHI, Hiroyuki: *Presentation of Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer and Case Examples of Measurement.* <http://sysdoc.doors.ch/PANASONIC/kouhou%28english%29.pdf>. Abruf: Oktober 2011
- [302] UKRAINTSEV, Vladimir; BANKE, Bill: Reference metrology for nanotechnology: significance, challenges and solutions. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 7767. San Diego (CA), USA, August 2010, S. 77670C–1 – 77670C–15
- [303] VERMA, Shobhit: *Development of novel high-performance six-axis magnetically levitated instruments for nanoscale applications.* Texas A&M University, Dissertation, 2005
- [304] VOLKERT, Ralf; BÜCHSENSCHÜTZ, Mirko; SATTEL, Thomas: Design of a Nanometre-precision Air Gap Control for Planar Magnetic Bearing Actuators. In: *Proceedings of the 10th euspen International Conference*, Bd. 1. Delft, Niederlande, Mai 2010, S. 312–315
- [305] VOLKERT, Ralf; KIREEV, Vladimir; ZENTNER, Johannes; BERTRAM, Torsten: Nonlinear Control Design for the Magnetic Guidance of a Multi-Coordinate Positioning System. In: *Annual Meeting of ASPE*. Norfolk (VA), USA, Oktober 2005

- [306] VORBRINGER-DOROZHOVETS, Nataliya; HAUSOTTE, Tino; MANSKE, Eberhard; SHEN, J. C.; JÄGER, Gerd: Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), Nr. 9, S. 094012–1 – 094012–7
- [307] WANG, Chunhai: The Control of Six Degree-of-Freedom Magnetically Suspended Stage. In: *Annual Meeting of ASPE*. Scottsdale (AZ), USA, Oktober 2000
- [308] WANG, Qi: *Piezoaktoren für Anwendungen im Kraftfahrzeug, Messtechnik und Modellierung*. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, April 2006
- [309] WECKENMANN, Albert; GAWANDE, Bernd: *Koordinatenmeßtechnik: Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage*. 1. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1999. – ISBN 3–446–17991–7
- [310] WIDDERSHOVEN, IVO; DONKER, Rilpho; SPAAN, Henny: Calibration of the Isara 400 Ultra-precision CMM. In: *Proceedings of the 11th euspen International Conference*, Bd. 1. Como, Italien, Mai 2011, S. 66–71
- [311] WIKIMEDIA FOUNDATION INC.: *Reedschalter*. April 2013. – Technische Information
- [312] WILKENING, Günter: Nanopositionierungen - die Basis der Nanometrologie. In: *Technisches Messen* 67 (2000), Nr. 7-8, S. 298–305
- [313] XIE, Hui; RÉGNIER, Stéphane: Three-dimensional automated micromanipulation using a nanotip gripper with multi-feedback. In: *J. Micro-mech. Microeng.* 19 (2009), Nr. 7, S. 075009–1 – 075009–9
- [314] XU, Congyu; YU, Xiafon; CHENG, Lingli: Small-Sized Large Travel Nano-Positioning System Based on Tubular Permanent Magnet Synchronous Linear Motor. In: *The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2009
- [315] XU, Haifeng; MÜLLER, Andreas; BALZER, Felix; PERCLE, Brandon; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: The complete acquisition of the topography of a special multi-mirror arrangement with the help of a Fizeau

- interferometer. In: *Proceedings of SPIE*, Bd. 7389. München, Mai 2009, S. 738900–1 – 738900–10
- [316] XU, Haifeng; MÜLLER, Andreas; KOLLHOFF, Dietmar; MANSKE, Eberhard; JÄGER, Gerd: Investigations into the acquisition of the topography of a special multi-mirror arrangement. In: *Institute of Micro- and Nanotechnologies MacroNano Biannual Report*. Technische Universität Ilmenau, 2009/10
- [317] YANG, Lisong; WANG, Guiying; WANG, Jianguang; XU, Zhizhan: Surface profilometry with a fibre optical confocal scanning microscope. In: *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000), Nr. 12, S. 1786–1791
- [318] ZF ELECTRONICS CORPORATION: *DH Series - Ultra Miniature Snap-Action Switches*. <http://www.cherrycorp.com/english/switches/submini/dh.htm>. Abruf: November 2010. – Datenblatt
- [319] ZHAO, Shuangshuang; HOU, Changlun; ZHANG, Juan; BAI, Jian; YANG, Guoguang: A high-resolution displacement sensor based on a grating interferometer with the phase modulation technique. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 10, S. 105102–1 – 105102–6
- [320] ZSCHÄCK, Stephan: *Kompensation von Störgrößen zur nanometergenauen Positionierung von kugelgeführten Parallelkinematiken*. Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Juni 2008
- [321] ZSCHÄCK, Stephan: *Reikraftuntersuchungen auf dem Reibungsprüfstand des SFB 622-Teilprojekts "Modularer Entwurf modellbasierter Regelungen"*. Januar 2013. – Interner Bericht
- [322] ZSCHÄCK, Stephan; KLÖCKNER, Johannes; GUSHCHINA, Irina; AMTHOR, Arvid; AMENT, Christoph; FENGLER, Wolfgang: Control of nanopositioning and nanomeasuring machines with a modular FPGA based data processing system. In: *Mechatronics* 23 (2013), Nr. 3, S. 257–263