

Beiträge zur Verringerung der Positionierunsicherheit in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau

der Technischen Universität Ilmenau

von Dipl.-Ing. Ingomar Schmidt,
geboren am 10.08.1976 in Arnstadt

Gutachter:

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jäger, Technische Universität Ilmenau

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Weckenmann, Universität Erlangen-Nürnberg

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Schmitt, Technische Hochschule Aachen

eingereicht: 11.02.2008

verteidigt: 22.09.2008

Verfahrensnummer: MB 194

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2008000187

Kurzfassung

Fortschreitende Miniaturisierung, steigende Messbereiche, Messauflösungen und Reproduzierbarkeiten sowie immer kleinere Messunsicherheiten stellen einige der steigenden Anforderungen an Entwicklungen in der dreidimensionalen Koordinatenmesstechnik dar. In dieser Dissertation werden Maßnahmen zur Verringerung der Positionierunsicherheit beim Messen mit einer Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPM-Maschine) vorgestellt, die einige der genannten Anforderungen erfüllt. Sie erreicht in einem Messbereich von 25 mm x 25 mm x 5 mm eine Positionsauflösung von 0,1 nm. Die NPM-Maschine wurde am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der SIOS Messtechnik GmbH entwickelt. Aus der Analyse der bisher vorliegenden Positionierunsicherheit bei Differenzmessungen zwischen zwei beliebigen Messpunkten im gesamten Messbereich werden Maßnahmen zur Verringerung der einzelnen Beiträge zur Positionierunsicherheit abgeleitet. Der größte Anteil der kombinierten Positionierunsicherheit entsteht durch die Temperaturempfindlichkeit des bisherigen Aufbaus, speziell durch die thermisch bedingte Dehnung der Längenmesssysteme, und aufgrund der begrenzten Stabilisierung der Temperatur. Die zur Längenmessung verwendeten Planspiegelinterferometer wurden daher konstruktiv verändert. Die Messunsicherheitsbeiträge durch die begrenzte Stabilisierung der Laserfrequenz der Interferometer und durch Abweichungen bei der Korrektur der Luftbrechzahl werden damit ebenfalls reduziert. Zur Verringerung der Temperatureinflüsse werden die vertikalen, elektrodynamischen Antriebssysteme durch eine neuartige Gewichtskraftkompensation stärker entlastet und die Temperaturstabilität in der Messkammer durch eine verbesserte Klimaregelung erhöht. Messobjekte werden zusammen mit einer Messspiegelecke bewegt, deren Position und Winkellage durch die Interferometer und elektronische Autokollimationsfernrohre bestimmt werden. Eine neu konstruierte, monolithische Messspiegelecke wird aus Zerodur gefertigt und statisch bestimmt gelagert. Dadurch treten verkleinerte Oberflächenabweichungen bei der Befestigung in der NPM-Maschine auf. Durch Verbesserungen bei der Justierung und Kalibrierung der Winkelsensoren wird die Messunsicherheit der Winkelmessung deutlich verkleinert. Die bei Verkippung des Messobjektes entstehenden Längenmessabweichungen erster und zweiter Ordnung werden dadurch reduziert. Aus den durchgeführten Verbesserungen resultiert eine enorme Verringerung der Positionierunsicherheit in der NPM-Maschine bei der Bestimmung einer Längendifferenz.

Abstract

Advancing miniaturisation, increasing measurement ranges, measurement resolutions and repeatability as well as diminishing measurement uncertainties represent many of the increasing requirements on developments in the field of three-dimensional coordinate measuring technology. This dissertation introduces strategies to reduce the positioning uncertainty for measurements with a nanopositioning und nanomeasuring machine (NPM machine), which fulfils most of the mentioned requirements. It possesses a measurement range of 25 mm x 25 mm x 5 mm and obtains a positional resolution of 0.1 nm. The NPM machine was developed by the Institute of Process Measurement and Sensor Technology at the TU Ilmenau and SIOS Messtechnik GmbH. Steps to reduce several individual sources of uncertainty are derived from the analysis of the previous positioning uncertainty between two arbitrary measurement points over the entire measurement range. Most of the combined positioning uncertainty arises from the temperature sensitivity of the previous arrangement, in particular from the thermal expansion of the length measuring systems and the limited temperature stabilisation. Therefore, the length measuring plane mirror interferometers were redesigned. Sources of uncertainty resulting from the limited stabilisation of the interferometer's laser frequency and from deviations in correcting the air's refractive index are reduced as well. In order to decrease temperature influences the vertical voice coil driving systems are unloaded by means of a innovative weight force compensation system and the temperature stability in the measurement chamber is increased by an enhanced climate control. Measurement objects are moved along with a corner mirror, whose position and angle are determined by interferometers and electronic autocollimators. A redesigned monolithic corner mirror is made of Zerodur and mounted in statically defined way. Thus, smaller surface deviations arise from fixing the set-up to the NPM machine. The uncertainty of the angle measurement is reduced by improvements in the adjustment and calibration algorithms of the sensors. This leads to a significant reduction in first- and second-order length deviations which result from tilting of the measurement object. The improvements carried out have resulted in an enormous decrease in the positioning uncertainty for the determination of a length difference using the NPM machine.

Vorwort und Dank

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

An dieser Stelle möchte ich den Herren Professoren Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger und Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Grünwald danken. Sie ermöglichten mir die reibungsfreie Bearbeitung des Themas durch die Bereitstellung finanzieller und materieller Mittel. Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger möchte ich zudem für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung der Arbeit danken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Prozessmess- und Sensortechnik. Durch die allzeit konstruktive Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima trugen sie wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Tino Hausotte für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen bei der Bearbeitung der Thematik.

Für die technische Unterstützung und die gute Zusammenarbeit bei der Herstellung experimenteller Aufbauten möchte ich ebenso den Mitarbeitern der SIOS Messtechnik GmbH meinen herzlichen Dank aussprechen.

Buseck, Oktober 2008

Ingomar Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	1
1 Einleitung und Überblick	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Messprinzip	5
2.2 Mechanischer und optischer Grundaufbau	6
2.3 Messwertverarbeitung	8
2.4 Eigenschaften und Positionierunsicherheit	9
2.5 Weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der 3D-Nanopositionier- und Nano- messtechnik	12
3 Positionierunsicherheit in der NPM-Maschine bei Differenzmessungen	13
3.1 Frequenzstabilität der He-Ne-Laser	14
3.2 Erfassung und Demodulation der Interferenzsignale	16
3.3 Referenzkoordinatensystem der Messspiegelecke	18
3.4 Brechzahl der Luft	18
3.5 Thermische Ausdehnung der Messanordnung	21
3.6 Winkelabweichungen	25
3.7 Zusammenfassung der Messunsicherheiten	31
4 Beiträge zur Reduzierung der Positionierunsicherheit	35
4.1 Spiegelecke	35
4.1.1 Konstruktive Veränderung der Spiegelecke	36
4.1.2 Lagerung der Spiegelecke	37
4.1.3 Bestimmung der Spiegeleckentopographie mit einem Kalibrierinter- ferometer	38

4.2	Planspiegelinterferometer	40
4.2.1	Aufbau und Funktionsweise	40
4.2.2	Konstruktive Veränderungen	43
4.2.3	Eigenschaften und Messunsicherheit	46
4.2.3.1	Bestimmung der Temperaturabhängigkeit	48
4.2.3.2	Verringerung der Nichtlinearitäten der Auswerteelektronik	50
4.3	Photoelektrisches Autokollimationsfernrohr	52
4.3.1	Anforderungen an das integrierte Winkelmesssystem	52
4.3.2	Aufbau und Funktionsweise	53
4.3.3	Elektronische Auswertung	56
4.3.4	Justierung des Sensors	57
4.3.5	Kalibrierung des Sensors	59
4.3.6	Erzielte Ergebnisse	60
4.3.7	Weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Winkelsensoren	62
4.4	Gewichtskraftkompensation	63
4.4.1	Aufbau und Funktionsweise	64
4.4.2	Eigenschaften	68
4.5	Klimatisierung der Messanordnung	69
4.5.1	Verbesserter Aufbau	71
4.5.2	Eigenschaften	71
5	Verringerte Positionierunsicherheit in der NPM-Maschine	73
6	Ausblick	77
7	Zusammenfassung	79
A	Anhang: Korrekturdaten der neuen Messspiegelecke	85
	Literaturverzeichnis	93

Abkürzungen und Formelzeichen

A	Fläche
A/D	analog-digital
AFM	<i>Atomic Force Microscope</i>
AKF	Autokollimationsfernrohr
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductors</i>
c	Lichtgeschwindigkeit
DSP	digitaler Signalprozessor
d	Durchmesser
$E[X]$	Erwartungswert der Größe X
FEM	finite Elemente Methode
f	Brennweite, Frequenz
F	Kraft
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
He-Ne	Helium-Neon
IR-Bereich	Infrarot-Bereich
i	Zählerstand des Interferometers, Laufindex
K_{IF}	Interferometerfaktor
K_{TF}	Teilungsfaktor
k	Erweiterungsfaktor
l	Länge
l_m	Messstrecke des Interferometers
l_t	Totstrecke des Interferometers
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LWL	Lichtwellenleiter

NPM-	
Maschine	Nanopositionier- und Nanomessmaschine
NPM	
machine	<i>nanopositioning and nanomeasuring machine</i>
n, n_0, n_1	Brechzahl, Brechzahl am Messbeginn, Brechzahl am Messende
n_N	Brechzahl beim Nullen der Interferometerzähler
OPV	Operationsverstärker
Pt	Platin
PTB	Physikalisch- Technische Bundesanstalt
p	Luftdruck
p_w	Wasserdampfpartialdruck
r.F.	relative Feuchte
r	Radius
RMS	Effektivwert, Quadratmittel, <i>root mean square</i>
s	Abstand, Weg
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultraviolett
U, u	elektrische Spannung, Unsicherheit
W	Werteumfang
X, x	Länge, Achsenbezeichnung
Y, y	Länge, Achsenbezeichnung
Z, z	Länge, Achsenbezeichnung
δ	Ordnungszahl der Interferenz
ϑ	Temperatur
λ	Wellenlänge
λ_0	Vakuumwellenlänge
Φ, φ	Winkel, Demodulationswinkel
Θ_0	Öffnungswinkel

1 Einleitung und Überblick

Die Grundlage der vorliegenden Dissertation bildet die am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der SIOS Messtechnik GmbH entwickelte Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPM-Maschine, vgl. Abb. 1.1). Diese ist ein dreidimensional und rückführbar arbeitendes Positionier- und Messsystem. In einem Messvolumen von 25 mm x 25 mm x 5 mm wird eine Längenmessauflösung von 0,1 nm erreicht [48]. Die nahezu abbefehlerfreie Anordnung und die hohe Auflösung der Planspiegelinterferometer zur Längenmessung sowie die Korrektur von Winkelverkipnungen des Messtisches ermöglichen besonders niedrige Positionierunsicherheiten. Das Messobjekt befindet sich auf einer dreidimensional bewegten Spiegelecke, welche als Reflektor für die Längen- und Winkelmesssysteme dient. Die thermisch und mechanisch stabile Verbindung dieser Messsysteme zu einem Antastsystem erfolgt mit Hilfe eines Metrologierahmens aus Zerodur.

Die Einsatzmöglichkeiten der NPM-Maschine liegen vor allem auf den Gebieten der hochpräzisen Positionierung und Messung von Kleinteilen sowie Mikro- und Nanostrukturen.

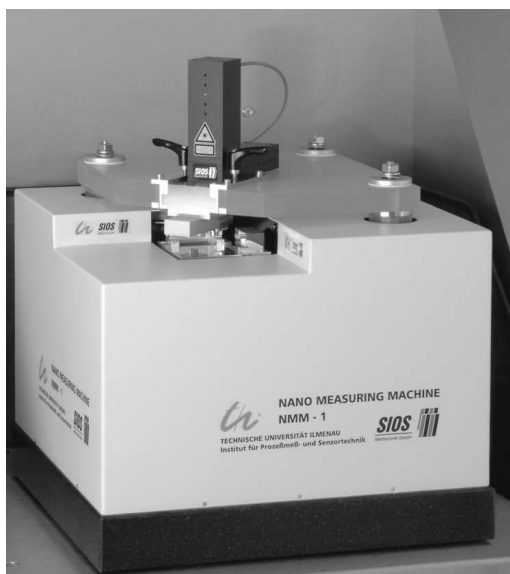


Abb. 1.1: Nanopositionier- und Nanomessmaschine

Diese sind beispielsweise Mikrooptiken, Präzisionsformen, Stufenhöhennormale oder andere Strukturnormale.

Die NPM-Maschine erfüllt einige der steigenden Anforderungen der Entwicklungen der Mikro- und Nanomesstechnik. Diese sind vor allem die fortschreitende Miniaturisierung und immer höhere Messauflösungen und Reproduzierbarkeiten bei stetig wachsenden Messbereichen, insbesondere in der Längenmesstechnik und der dreidimensionalen Koordinatenmesstechnik. Neben diesen Forderungen spielt die Messunsicherheit eine weitere tragende Rolle. Erst durch die Angabe der Messunsicherheit kann die Qualität von Messergebnissen bewertet und verglichen werden. Diese ist beispielsweise für die Beurteilung der Eignung von Prüfprozessen und die Bestätigung der Konformität von Messergebnissen mit Spezifikationen von Bedeutung.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden daher Maßnahmen zur Verringerung der Positionierunsicherheit beim Messen mit der NPM-Maschine entwickelt und umgesetzt. Einflüsse auf die Positionierunsicherheit entstehen vor allem durch die Empfindlichkeit des Aufbaus gegenüber schwankenden Umweltbedingungen. Davon betroffen sind insbesondere die Brechzahlkorrektur und die thermisch bedingte Ausdehnung der zur Längenmessung eingesetzten Planspiegelinterferometer. Die Temperaturempfindlichkeit der Interferometer wurde untersucht und durch konstruktive Maßnahmen deutlich verringert. Diese Verbesserung trägt maßgeblich zur Reduzierung der Längenmessunsicherheit bei. Zusätzlich wurde die mechanische Stabilität durch die Weiterentwicklung des Interferometeraufbaus erhöht.

Ebenso wurde die Messspiegelecke konstruktiv überarbeitet, um die thermische Ausdehnung, aber auch Oberflächendehformationen durch den Einbau in die NPM-Maschine zu verringern.

Die bereits neu entwickelten photoelektrischen Winkelsensoren sind eingehend untersucht worden. Verbesserungen wurden bei der Justierung und Kalibrierung erzielt, wodurch die Messunsicherheit bei der Winkelmessung deutlich reduziert werden konnte.

Die eingesetzten elektrodynamischen Antriebe erzeugen den größten Wärmeeintrag im Messaufbau. Die daraus resultierenden Temperaturschwankungen wurden durch Entlastung der vertikalen Antriebssysteme mittels einer verbesserten Gewichtskraftkompensation und durch die bessere Klimatisierung der Messanordnung verringert.

Die Positionierunsicherheit bei die Bestimmung des Abstandes zwischen zwei beliebigen Punkten im gesamten Messbereich konnte mit Hilfe der durchgeführten Maßnahmen stark verringert werden.

2 Stand der Technik

Da sich die in den folgenden Kapiteln dargestellten Arbeiten auf den Entwicklungsstand der NPM-Maschine zu Beginn der vorliegenden Dissertation beziehen, soll dieser zunächst beschrieben werden. Weitere weltweite Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanopositionier- und Nanomesstechnik werden anschließend genannt. Die NPM-Maschine ist bislang jedoch das einzige in Serie hergestellte Gerät mit messtechnisch reproduzierbaren Eigenschaften. Sie wird bereits weltweit mehrfach und erfolgreich eingesetzt. An der TU Ilmenau sind momentan zwei NPM-Maschinen im Einsatz.

2.1 Messprinzip

Abweichend von herkömmlichen Koordinatenmessmaschinen wird in der NPM-Maschine das Abbe-Komparatorprinzip [1] in allen Messachsen und Messpositionen eingehalten, wodurch Längenmessabweichungen erster Ordnung minimiert werden. Die dazu notwendige fluchtende Anordnung von Messobjekt und Messsystem wird durch die feste Anordnung und die Ausrichtung aller drei Interferometer auf den Antastpunkt erreicht (vgl. Abb. 2.1). Dazu dient ein mechanisch und thermisch besonders stabiler Metrologierahmen aus Zerodur [83]. Aufgrund der niedrigeren Masse und der geringeren Einschränkungen der Dynamik wird eine Spiegelecke, auf der das Messobjekt ruht, zur Realisierung von Messungen durch ein dreiachsiges Antriebs- und Führungssystem bewegt. Elektrodynamische Antriebssysteme nach dem *voice coil* Prinzip [4] ermöglichen in Verbindung mit Wälzkörperführungen die hochauflösende Bewegung über große Bereiche mit konstanter Geschwindigkeit. Die Position der Spiegelecke wird durch drei Laserinterferometer und die Winkellage durch Winkelmesssysteme bestimmt.

Der geschlossene Regelkreis und die getrennte Ansteuerung der vertikalen Antriebe ermöglichen die Korrektur von Verkippungen durch systematische und zufällige Führungsabweichungen, wodurch die Längenmessunsicherheit unabhängig vom Antriebs- und Führungssystem ist. Nur Verkippungen um die vertikale Achse (z-Achse) können nicht ausgeglichen

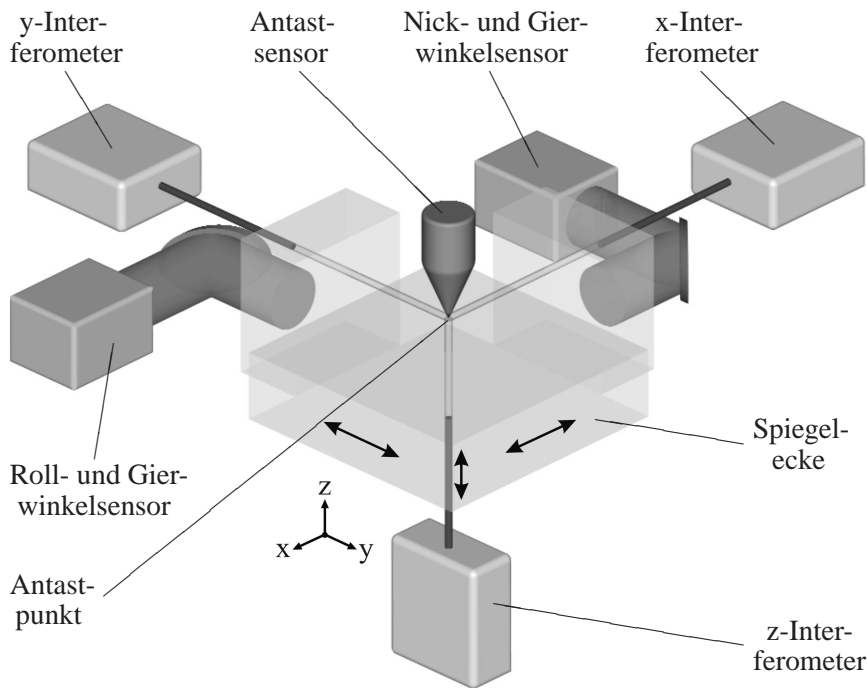


Abb. 2.1: Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips in allen drei Messachsen

werden. Sie sind aber kaum signifikant, da die Führungsabweichungen der z-Führung um diese Achse deutlich geringer sind als um die horizontalen Messachsen. Dies resultiert aus dem großen Führungsabstand, im Vergleich zur Führungslänge.

In die NPM-Maschine können verschiedenste taktile und optische Antastsysteme integriert werden. Die mechanische, elektronische und regelungstechnische Einbindung ist als messendes System oder als Nullpunktindikator möglich. Nach dem Kontakt mit dem Messobjekt werden die Messsignale des Antastsystems zur Regelung der vertikalen Messtischposition verwendet, womit das Scannen der Messobjektoberfläche möglich wird.

2.2 Mechanischer und optischer Grundaufbau

Abbildung 2.2 zeigt den optischen und mechanischen Grundaufbau der NPM-Maschine. Am massiven Grundbett aus Granit getrennt befestigt, befinden sich der Metrologierahmen, der alle Messsysteme trägt, und die Führungs- und Antriebssysteme.

Als Längenmesssysteme werden Planspiegelinterferometer der Serie SP-500 der Firma SIOS Messtechnik GmbH verwendet [89]. Durch Einkopplung des Laserlichtes über Lichtwellenleiter bleibt der Interferometerkopf klein und frei von den thermischen und elektromagnetischen Einflüssen des frequenzstabilisierten He-Ne-Lasers vom Typ SL 02 [88]. Deswegen Rückführbarkeit wurde durch den Anschluss an einen Jod-stabilisierten Referenzlaser

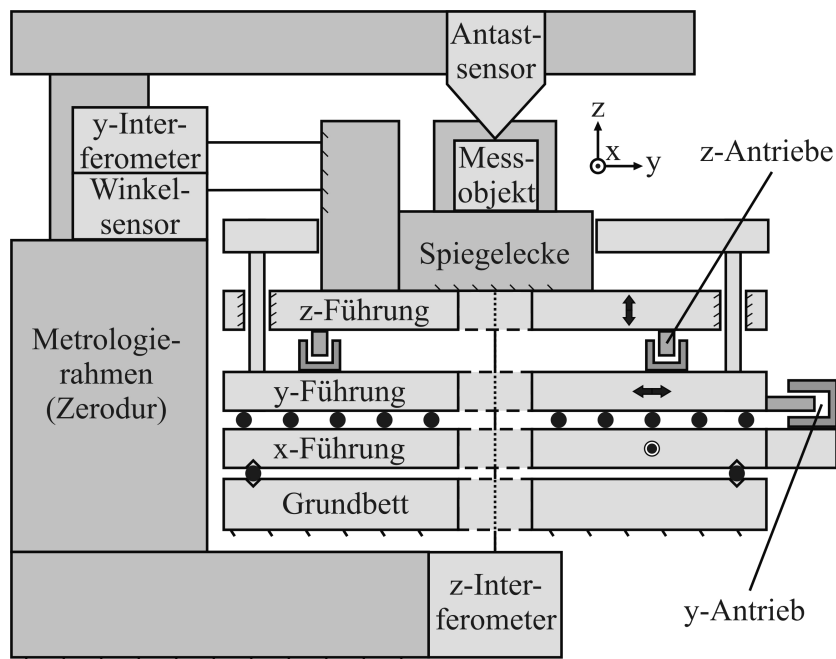


Abb. 2.2: Grundaufbau der NPM-Maschine

gewährleistet. Die zur Signalauswertung verwendete Elektronik befindet sich weitestgehend außerhalb des Grundaufbaus der NPM-Maschine.

Zwei zweiachsige elektronische Sensoren nach dem Autokollimationsprinzip [109] kommen als Winkelmesssysteme zum Einsatz. Ihr Messbereich ist an die auftretenden Winkelabweichungen der Führungen von wenigen Winkelsekunden angepasst. Die Messauflösung ist extrem hoch, um eine hochpräzise Winkelregelung zu ermöglichen. Auch diese Sensoren wurden fasergekoppelt aufgebaut, damit Wärmequellen im Messaufbau vermieden werden.

Die beiden horizontalen Führungssysteme bestehen aus jeweils zwei gegenüberliegenden Führungsbahnen und einer dazwischen befindlichen Öffnung für den Messstrahl des z-Interferometers. Das Führungssystem der z-Achse besteht aus drei einzelnen kurzen Kugelführungen (vgl. Abb. 2.2). Die zugehörigen Antriebssysteme für die x- und y-Achse sind jeweils in Bewegungsrichtung seitlich neben den Führungen angebracht. Für die z-Richtung werden vier symmetrisch um den z-Strahl angeordnete Antriebe verwendet.

Auf der vertikal bewegten Plattform befindet sich die Spiegelecke. Sie besteht aus einer Grundplatte und zwei seitlich angesprengten Platten (vgl. Abb. 2.3). Die Außenseiten sind verspiegelt und mit hoher Ebenheit gefertigt. Sie dienen als Reflektor für die Messstrahlen der Laserinterferometer und Winkelsensoren, welche senkrecht auf die jeweilige Spiegelfläche ausgerichtet werden. Die Winkel- und Ebenheitsabweichungen der Spiegelflächen wurden durch den Hersteller bestimmt, wodurch eine Korrektur während der Messung möglich ist.

Der Messkreis schließt sich vom Messobjekt über die Spiegelecke, die Längen- und Winkelmesssysteme, den Zerodurrahmen und das Antastsystem.

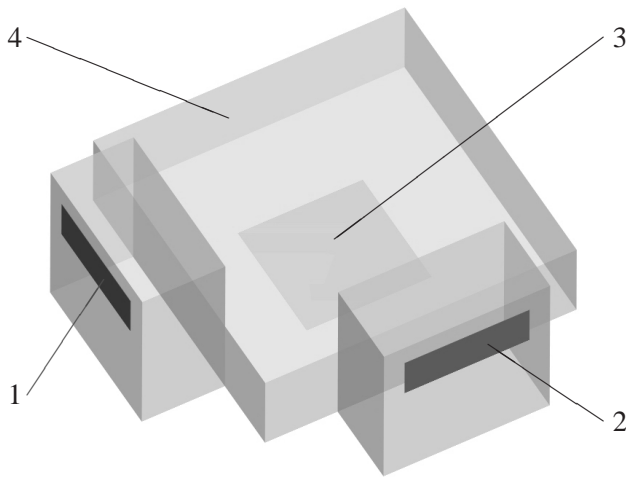


Abb. 2.3: Messspiegelecke der NPM-Maschine, die Seitenspiegel sind angesprengt: 1 x-Spiegelfläche, 2 y-Spiegelfläche, 3 z-Spiegelfläche, 4 Auflagefläche für Messobjekt

2.3 Messwertverarbeitung

Außer den Antriebssystemen, einer ersten Verstärkerstufe der Interferometersignale, dem Antastsystem und den Umweltsensoren wurden sämtliche Baugruppen, die für einen Wärmeeintrag sorgen können, außerhalb des mechanischen und optischen Grundaufbaus platziert. Abbildung 2.4 zeigt die Grundstruktur der NPM-Maschine. Der mechanische und optische Grundaufbau befindet sich in einer geschlossenen Messkammer.

In der Vorverarbeitungseinheit der Längenmesssysteme erfolgt die regelungstechnische Korrektur von Amplituden- und Offsetabweichungen der Messsignale sowie die Aufnahme der Umweltmessdaten. Die mit Hilfe einer Quadrantendiode gewonnenen Messsignale der Winkelsensoren werden verstärkt, bezüglich auftretender Gleichlichtschwankungen normiert und durch Differenzbildung zu Positionssignalen umgerechnet.

Alle Messinformationen werden von einer DSP-Einheit synchron aufgenommen und nachfolgend verarbeitet. Die Messsignale der Interferometer werden mit A/D-Wandlern aufgenommen und anschließend demoduliert [28]. Danach werden die Längenmesswerte aufgrund der vorliegenden Umweltbedingungen Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte sowie der von der Messposition abhängigen Oberfläche der Messspiegelecke korrigiert. Die Messsignale des Antastsystems werden ebenfalls mit A/D-Wandlern erfasst. Die vorverarbeiteten Signale der Winkelsensoren werden mit Hilfe einer durch Kalibrierung gewonnenen Kennlinie in Winkelwerte umgerechnet. Eine weitere Aufgabe der DSP-Einheit ist die gesamte Ablauf-

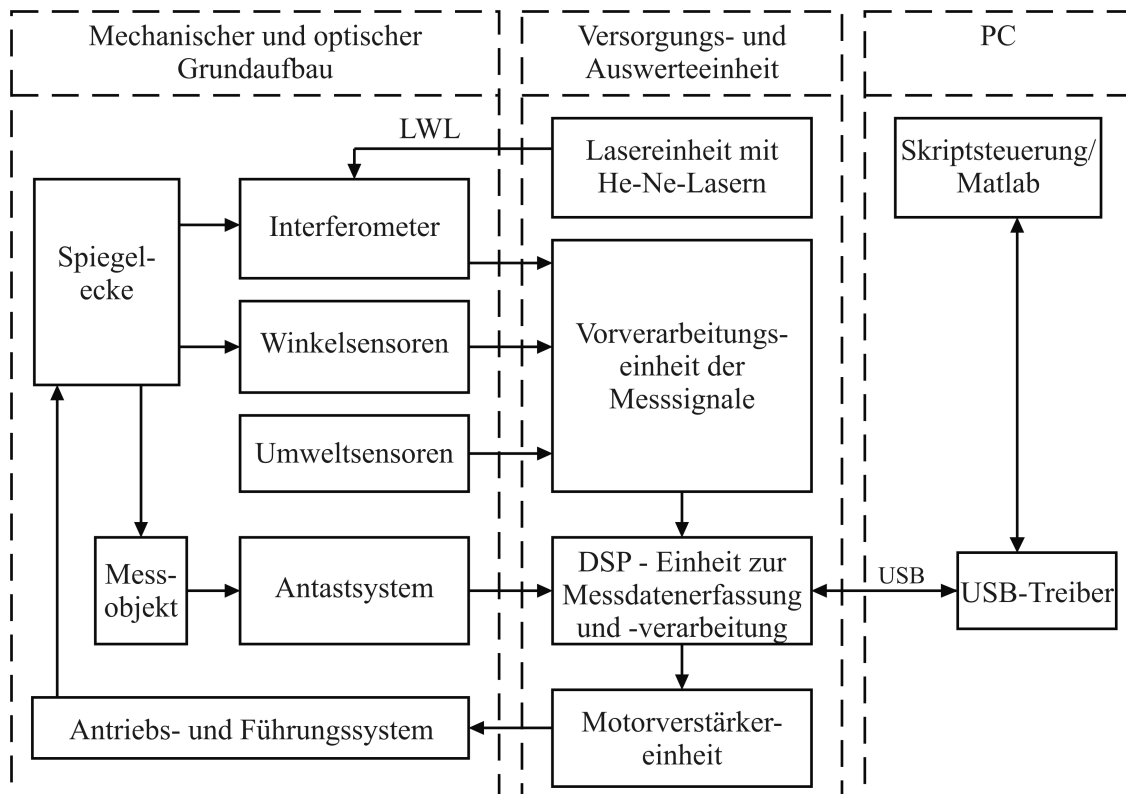


Abb. 2.4: Grundstruktur der NPM-Maschine

steuerung der NPM-Maschine. Dazu zählen die Positionsregelung, die Bahngenerierung der Bewegungsvorgänge, die Stellsignalausgabe für die Motorverstärker über D/A-Wandler, die Messwertaufnahme sowie die Kommunikation und Messwertausgabe zum übergeordneten PC-System. Die Berechnung der Stellsignale für die Antriebe erfolgt unter Berücksichtigung der Bahngeneratordaten und der aktuell korrigierten Längenmesswerte, aber auch der zu korrigierenden Verkippung der Spiegelecke anhand der Winkelsensorsignale.

2.4 Eigenschaften und Positionierunsicherheit

Das gewählte Messprinzip führt dazu, dass die messtechnischen Eigenschaften vorrangig durch die Güte des Regelungssystems bestimmt werden, welches Position und Winkellage mit Hilfe der Antriebssysteme ständig korrigiert. Die dabei auftretenden Abweichungen sind von der Bewegungs- und Messgeschwindigkeit und den mechanischen Parametern der Führungssysteme abhängig.

Befindet sich die Maschine im Stillstand, verbleiben Regelabweichungen mit Standardabweichungen von weniger als 0,3 nm. Die theoretisch erreichbaren kleinsten Abweichungen können ermittelt werden, indem die Antriebssysteme deaktiviert werden und somit das Signalrauschen vom Einfluss des Regelungssystems getrennt wird. Die verbleibenden Längenmesswertschwankungen werden dann nur durch die Messsysteme und die elektronische Verarbeitungskette sowie durch Vibrationen des Messaufbaus verursacht und die Standardabweichung beträgt weniger als 0,1 nm. Die gleichzeitig auftretenden Winkelabweichungen unterscheiden sich in den Zuständen mit aktivierten und deaktivierten Antrieben nur leicht. Die Standardabweichungen bleiben stets kleiner als $2,5 \cdot 10^{-3}''$.

Während der Bewegung des Messtisches treten erhöhte Positionsabweichungen von bis zu ± 4 nm zu den Führungsgrößen auf. Ursache dafür sind Nichtlinearitäten der Interferometer. Die Standardabweichungen der Winkelmesswerte steigen auf bis zu $0,05''$ für die Drehungen um die x- und y-Achse (φ_x und φ_y). Diese Verkippungen entstehen, weil sich die Kraftangriffspunkte der horizontalen Antriebe unterhalb des Masseschwerpunktes des Messtisches befinden und damit Drehmomente um die x- und y-Achse ausgelöst werden. Verkippungen um die z-Achse (φ_z) entstehen durch die systematischen Abweichungen aller Führungen, sind sehr gut reproduzierbar und wurden mit $\leq 3''$ bestimmt [35]. Sie können zwar nicht ausgeregelt werden, da hierfür kein Antriebssystem zur Verfügung steht. Eine rechentechnische Korrektur der resultierenden Abweichungen ist jedoch möglich.

Die theoretischen Grenzwerte für Bewegungsgeschwindigkeit und -beschleunigung ergeben sich aus den maximalen Antriebskräften und dem zur Verfügung stehenden Verfahrbereich und sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Sie können jedoch in der Praxis nicht erreicht werden, da Reserven zur Korrektur von Regelabweichungen verbleiben müssen. Außerdem ist die variable Masse des Messobjektes zu berücksichtigen.

	maximale Geschwindigkeit	maximale Beschleunigung
x-Achse	0,25 m/s	1,2 m/s ²
y-Achse	0,33 m/s	2,2 m/s ²
z-Achse	0,6 m/s	35,5 m/s ²

Tabelle 2.1: Theoretische Grenzwerte für die Bewegung der NPM-Maschine [35]

Die Positionierunsicherheit in der NPM-Maschine wird vor allem durch die thermische Ausdehnung der Messkette und die Abhängigkeit der Luftbrechzahl von den Umgebungsbedingungen verursacht. Die Temperatur hat daher den größten Einfluss auf die Messung.

Temperaturschwankungen entstehen vor allem durch die Verlustleistung der vertikalen Antriebssysteme. Zur Verringerung der eingetragenen Wärmemenge wird in Kapitel 4.4 (S. 63 ff.) eine Anordnung zur Kompensation der Gewichtskraft der vertikal bewegten Teile des Messtisches vorgestellt. Kapitel 4.5 (S. 69 ff.) zeigt die verbesserte Anordnung zur Klimatisierung des Messraumes, wodurch die Temperaturschwankungen deutlich verkleinert werden konnten. Zusätzlich wurde die Temperaturempfindlichkeit der Anordnung gesenkt. Die dazu notwendige konstruktive Neugestaltung der Interferometer wird in Kapitel 4.2 (S. 40 ff.) beschrieben. Da diese bisher aus Aluminium hergestellt wurden, lieferten sie den größten Beitrag zur thermisch bedingten Ausdehnung der Messkette. Durch Verringerung der Totstrecken der Interferometer wurden auch die Unsicherheiten bei der Brechzahlkorrektur verkleinert.

Ein weiterer Beitrag zur Messunsicherheit der interferometrischen Längenmessung entsteht durch die begrenzte Stabilisierung der Laserfrequenz. Durch die Neugestaltung der Interferometer konnte dieser Beitrag ebenfalls verringert werden.

Die trotz der Winkelregelung verbleibenden Verkippungen des Messtisches verursachen Längenmessabweichungen erster und zweiter Ordnung. Um die Unsicherheit bei der Winkelmessung zu verkleinern, wurde am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik ein neuer Winkelsensor entwickelt. In Kapitel 4.3 (S. 52 ff.) werden Verbesserungen für die Justierung und Kalibrierung dieses Sensors beschrieben.

Die Oberflächenkorrektur der Messflächen der Spiegelecke führt ebenfalls zu einem Beitrag zur Positionierunsicherheit. Zusätzlich entstehen Oberflächenabweichungen durch die Befestigung der Spiegelecke in der NPM-Maschine. Die verbesserte Lagerung und die Neukonstruktion der Spiegelecke werden in Kapitel 4.1 (S. 35 ff.) beschrieben. Weitere Quellen für die Messunsicherheit der Längenmessung sind die Abweichungen bei der Erfassung und Verarbeitung der interferometrischen Messsignale.

Ein in [35] angegebenes Budget bezieht sich auf die Positionierunsicherheit an einem einzelnen Punkt im Messbereich. Die kombinierte Standardunsicherheit wird dabei mit ca. 60 nm je Messachse angegeben. Eine typische Messaufgabe für die NPM-Maschine ist jedoch die Bestimmung des Abstandes zwischen zwei Punkten. Im nachfolgenden Kapitel wird daher das bestehende Budget erweitert, um die Bestimmung der Positionierunsicherheit bei Differenzmessungen zu ermöglichen. Neben der detaillierten Beschreibung der aktualisierten Modelle werden die nun auftretenden Korrelationen zwischen den Einflussgrößen berücksichtigt.

2.5 Weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der 3D-Nanopositionier- und Nanomesstechnik

Auf dem Gebiet der Nanopositionier- und Nanomesstechnik beschäftigen sich weltweit noch einige weitere Institutionen mit der Entwicklung von ähnlichen Geräten. Tabelle 2.2 enthält eine Zusammenstellung ausgewählter Entwicklungen. Die Verringerung der Messunsicherheit stellt im Allgemeinen das Hauptziel von Weiterentwicklungen dar. Alle diese Geräte sind Prototypen und wurden bisher nicht in Serie gefertigt.

Bezeichnung	Entwickler bzw. Hersteller
<i>UP-CMM (Ultra Precision Coordinate Measuring Machine)</i> [76] bzw. „ISARA“ [44]	TU Eindhoven/Delft, <i>Centre for Industrial Technology of Royal Philips Electronics N.V. / IBS Precision Engineering</i>
<i>High Precision 3D-CMM</i> [100]	TU Eindhoven
<i>High Precision „μ CMM“</i> bzw. „F25“ [10]	TU Eindhoven / Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH
<i>High Precision „3D Nano CMM“</i> [85]	TU Eindhoven
<i>Special CMM</i> [8]	Physikalisch- Technische Bundesanstalt
<i>Long Range Scanning Stage (LORS) bzw. Sub-Atomic Measuring Machine</i> [40]	<i>University of North Carolina at Charlotte, Massachusetts Institute of Technology (MIT)</i>
<i>Molecular Measuring Machine</i> [54]	NIST (<i>National Institute of Standards and Technology</i>)
<i>Nano Coordinate Measuring Machine</i> [19]	<i>National Taiwan University</i>
<i>Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer</i> [99]	Panasonic
<i>Small Coordinate Measuring Machine</i> [59]	NPL (<i>National Physical Laboratory</i>)
<i>Nano-CMM</i> [96]	<i>Department of Precision Machinery Engineering der Universität Tokio</i>
<i>Ultra-Precision CMM (UP-CMM)</i> [56]	„BUPE“ – Projekt (<i>Billionth Uncertainty Precision Engineering</i>) Südkorea

Tabelle 2.2: Ausgewählte Entwicklungen auf dem Gebiet der 3D-Nanopositionier- und Nanomesstechnik

3 Positionierunsicherheit in der NPM-Maschine bei Differenzmessungen

Ausgangspunkt für die Verringerung der Positionierunsicherheit ist der Entwicklungsstand der NPM-Maschine der Jahre 1998 bis 2002. Um die Haupteinflussgrößen auf die Positionierunsicherheit zu identifizieren, wird in diesem Kapitel das Unsicherheitsbudget vor den Verbesserungsmaßnahmen beschrieben.

Eine allgemein gültige Angabe zur Messunsicherheit der NPM-Maschine ist dabei nicht möglich, da die Messunsicherheit stets dem Ergebnis einer Messung und nicht einem Gerät zugeordnet wird. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Messobjekten, Messaufgaben und den dazu verwendeten Antastsystemen ergeben sich unzählige verschiedene Messabläufe. Die im Folgenden angegebenen Werte der Positionierunsicherheit beziehen sich daher stellvertretend auf einige definierte Bewegungen der NPM-Maschine entlang aller drei Achsen, vom Nullpunkt des Systems ausgehend, in Richtung des Messbereichendes. Ein Messobjekt und das Antastsystem werden dabei nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den bereits erfolgten Darstellungen in [35] zur Positionierunsicherheit an einem einzelnen Punkt im Messbereich wird nun also ein Budget zur Positionierunsicherheit bei Differenzmessungen (vgl. Abb. 3.1) entwickelt und speziell auf Veränderungen durch die konsequente Umsetzung des GUM [14] näher eingegangen. Einige Teilmodelle des Budgets aus [35] werden dabei übernommen bzw. weiterentwickelt.

Als gemessene Länge l_m wird der Betrag des Abstandes zwischen dem Startpunkt P_0 und dem Endpunkt P_1 der Positionierung definiert (vgl. Abb. 3.1). Das vollständige Messergebnis l enthält zusätzlich eventuell anzubringende Korrekturen Δl (vgl. Gl. 3.1), wie im GUM gefordert. Die Betrachtung der einzelnen Messachsen erfolgt zunächst getrennt. Die Indizes x , y und z werden zur Vereinfachung nicht verwendet (vgl. Gl. 3.2).

Da es sich um eine Differenzmessung handelt, müssen insbesondere die Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen am Anfang und Ende der Positionierung berücksichtigt werden.

Sollten diese in einzelnen Fällen nicht genau beurteilt und daher nicht mit einbezogen werden können, so wird die Positionierunsicherheit zumeist zu groß abgeschätzt.

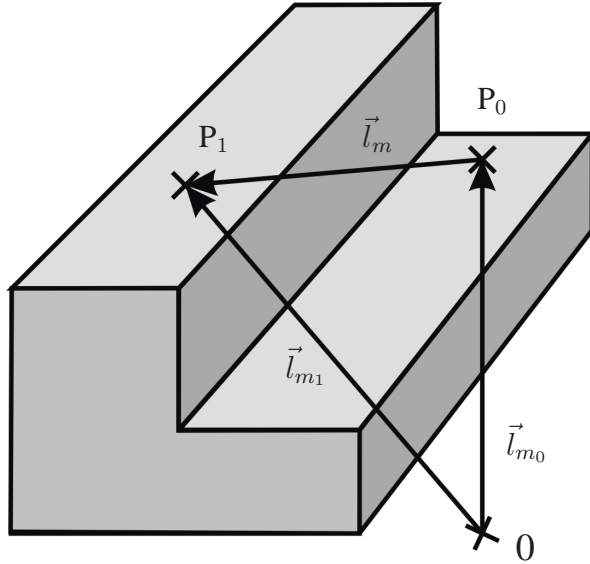


Abb. 3.1: Definition der Differenzmessung:

$$\vec{l}_{m_0} = \begin{pmatrix} l_{m_0x} \\ l_{m_0y} \\ l_{m_0z} \end{pmatrix} \quad \vec{l}_{m_1} = \begin{pmatrix} l_{m_1x} \\ l_{m_1y} \\ l_{m_1z} \end{pmatrix}$$

$$\vec{l}_m = \begin{pmatrix} l_{mx} \\ l_{my} \\ l_{mz} \end{pmatrix} = \vec{l}_{m_1} - \vec{l}_{m_0}$$

$$l_{x,y,z} = l_{m_{x,y,z}} + \Delta l_{x,y,z} = l_{m_1_{x,y,z}} - l_{m_0_{x,y,z}} + \Delta l_{x,y,z} \quad (3.1)$$

$$l = l_m + \Delta l = l_{m_1} - l_{m_0} + \Delta l \quad (3.2)$$

3.1 Frequenzstabilität der He-Ne-Laser

Den Maßstab der Längenmessung stellt die Wellenlänge λ des Lasers im Medium dar. Diese ist neben der Brechzahl n auch von der Frequenz f des Lasers abhängig. Aufgrund der begrenzten Stabilisierung von f entsteht der Beitrag $u_1(l)$ zur interferometrischen Längenmessunsicherheit (vgl. Gl. 3.6). Ausgangspunkt ist die interferometrische Grundgleichung 3.3. δ ist darin die Ordnungszahl der Interferenz, λ_0 die Wellenlänge im Vakuum, K_{IF} der Interferometerfaktor und c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Die Indizes „0“ und „1“ werden für δ , n und f ebenfalls für den Anfang und das Ende der Messbewegung verwendet.

$$l = l_m = \frac{\delta \cdot \lambda_0}{K_{IF} \cdot n} = \frac{\delta \cdot c_0}{K_{IF} \cdot n \cdot f} = l_{m_1} - l_{m_0} = \frac{\delta_1 \cdot c_0}{K_{IF} \cdot n_1 \cdot f_1} - \frac{\delta_0 \cdot c_0}{K_{IF} \cdot n_0 \cdot f_0} \quad (3.3)$$

Abbildung 3.2 zeigt die verschiedenen Strecken im Interferometer. l_d stellt die Differenz der optischen Weglängen zwischen Mess- und Referenzarm beim Nullen der Interferometer dar. l_r ist die Referenzarmlänge.

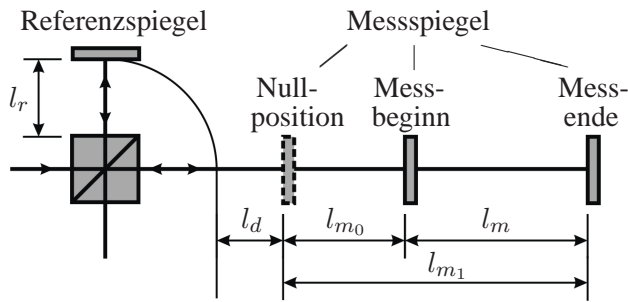


Abb. 3.2: Strecken im Laserinterferometer: Wird der Messstrahl nur in Luft geführt, so gilt: $l_d = l_t$
Die Totstrecke l_t ist der optische Gangunterschied zwischen Mess- und Referenzarm in Luft beim Nullen der Interferometerzähler.

Zur Bestimmung der interferometrischen Längenmessunsicherheit aufgrund der relativen Frequenzunsicherheit bei der Laserstabilisierung von $u(f)/f \leq 2 \cdot 10^{-8}$ [107] müssen die partiellen Ableitungen von l nach f_0 und f_1 gebildet werden (vgl. Gl. 3.4 und 3.5). Der δ_0 bzw. δ_1 enthaltende Bruch in diesen Gleichungen muss durch den kompletten optischen Gangunterschied zwischen Mess- und Referenzarm $l_{m_0} + l_d$ bzw. $l_{m_1} + l_d$ ersetzt werden.

$$\frac{\partial l}{\partial f_0} = -\frac{1}{f_0} \cdot \frac{\delta_0 \cdot c_0}{K_{\text{IF}} \cdot n_0 \cdot f_0} = -\frac{1}{f_0} \cdot (l_{m_0} + l_d) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial l}{\partial f_1} = -\frac{1}{f_1} \cdot \frac{\delta_1 \cdot c_0}{K_{\text{IF}} \cdot n_1 \cdot f_1} = -\frac{1}{f_1} \cdot (l_{m_1} + l_d) \quad (3.5)$$

Bei der Kombination der Unsicherheitsbeiträge am Anfang und am Ende der Messung nach Gl. 3.6 sind keine Korrelationen berücksichtigt, da ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und den systematischen Abweichungen der Laserfrequenz nur vermutet, aber nicht quantifiziert werden kann. Tabelle 3.1 enthält die resultierende, interferometrische Längenmessunsicherheit $u_1(l)$ für verschiedene Messlängen und Achsen.

$$\begin{aligned} u_1(l) &= \sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial f_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial f_1}\right)^2} \cdot \frac{u(f)}{f} \\ &= \sqrt{(l_{m_1} + l_d)^2 + (l_{m_0} + l_d)^2} \cdot \frac{u(f)}{f} \\ &= \sqrt{(l_{m_1} + l_d)^2 + (l_d)^2} \cdot \frac{u(f)}{f} \quad \text{für } l_{m_0} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

x- und y-Achse	z-Achse
$u_1(l_{xy}) = 1,39 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 0$	$u_1(l_z) = 2,89 \text{ nm}$ für $l_z = 0$
$u_1(l_{xy}) = 1,57 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 12,5 \text{ mm}$	$u_1(l_z) = 2,92 \text{ nm}$ für $l_z = 2,5 \text{ mm}$
$u_1(l_{xy}) = 1,78 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 25 \text{ mm}$	$u_1(l_z) = 2,96 \text{ nm}$ für $l_z = 5 \text{ mm}$

Tabelle 3.1: Messunsicherheit der interferometrischen Längenmessung durch begrenzte Laserfrequenzstabilisierung

3.2 Erfassung und Demodulation der Interferenzsignale

Aus den beiden photoelektrisch erzeugten Quadratursignalen U_A und U_B (Sinus und Kosinus) der Interferometer wird mittels des Arcustangens-Verfahrens [28] (vgl. Abb. 3.3) der Phasenwinkel φ ermittelt, dessen Änderung ein Maß für die Messlänge l_m ist.

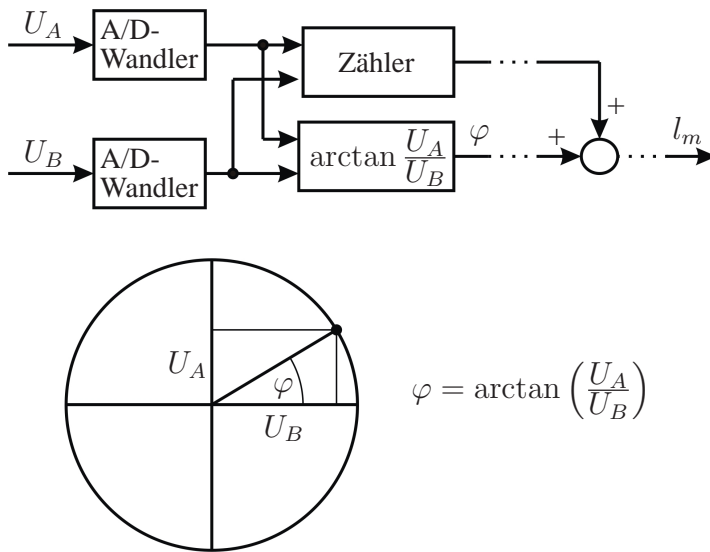


Abb. 3.3: Bestimmung des Phasenwinkels nach dem Arcustangens-Verfahren

Trotz Justierung und Signalregelung treten Abweichungen in den Amplituden ($\Delta\hat{U}_A/\hat{U}_A = \Delta\hat{U}_B/\hat{U}_B \leq 3\%$), Offsets ($\Delta\bar{U}_A/\bar{U}_A = \Delta\bar{U}_B/\bar{U}_B \leq 3\%$) und der Phase ($\Delta\varphi_{\text{PhE}} \leq 1,5^\circ$) der Quadratursignale auf. Daraus resultieren periodische Nichtlinearitäten für den Phasenwinkel φ bei der Demodulation der originalen Phasenlage Φ_{org} der Interferenzsignale (vgl. Gl. 3.7). Die Nichtlinearitäten können mit Hilfe der partiellen Ableitungen von Gleichung 3.7 berechnet werden. Alle fünf Anteile sind jedoch von den unbekanntenen originalen Phasenlagen am Start- und Endpunkt der Messung abhängig. Für die Bestimmung der kombinierten Unsicherheit des Demodulationswinkels $u_1(\varphi) = 1,342^\circ$ wurde daher wie in [35] die ma-

ximale Abweichung innerhalb der Periode von Φ_{org} verwendet. Die Eingangsgrößen werden als gleichverteilt und unkorreliert angenommen.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{U_A}{U_B}\right) = \arctan\left(\frac{\hat{U}_A \cdot \sin(\Phi_{org} + \varphi_{PhE}) + \bar{U}_A}{\hat{U}_B \cdot \cos(\Phi_{org}) + \bar{U}_B}\right) \quad (3.7)$$

Ersetzt man die Ordnungszahl δ in Gl. 3.3 (S. 14) durch den entsprechenden Winkel $\varphi/2\pi$, so ergibt sich die Ausgangsgleichung zur Überführung des Demodulationswinkels in die entsprechende Länge (vgl. Gl. 3.8). Korrelationen der Eingangsgrößen am Start- und Endpunkt der Messung können nicht berücksichtigt werden, da die Abweichungen in Amplitude und Offset überwiegend zufällig oder unbekannt systematisch auftreten. Die systematischen Phasenabweichungen hängen vom unbekanntem Winkel Φ_{org} am Start- und Endpunkt ab. Sie sind damit ebenfalls unbekannt.

$$l_m = l_{m_1} - l_{m_0} = \frac{\lambda_0}{K_{IF} \cdot n \cdot 2\pi} \cdot (\varphi_1 - \varphi_0) \quad (3.8)$$

Für die Berechnung der entstehenden interferometrischen Längenmessunsicherheit durch Abweichungen der analogen Interferenzsignale $u_2(l)$ variieren in Gleichung 3.8 nun φ_0 und φ_1 (vgl. Gl. 3.9). $u_2(l)$ ist unabhängig von der Lage des Start- und Endpunktes.

$$u_2(l) = \sqrt{\left\{ \left(\frac{\partial l_m}{\partial \varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial l_m}{\partial \varphi_1}\right)^2 \right\} \cdot u_1^2(\varphi)} = \sqrt{2} \cdot \frac{\lambda_0}{K_{IF} \cdot n \cdot 2\pi} \cdot u_1(\varphi) = 1,66 \text{ nm} \quad (3.9)$$

Weitere Abweichungen bei der Bestimmung des Demodulationswinkels entstehen durch Rundungsabweichungen bei der A/D-Wandlung der analogen Signale und durch die Umsetzung der Arcustangens-Funktion, deren Funktionswerte in einem arctan-Register begrenzter Breite abgelegt sind [28]. Zur Bestimmung des digitalisierten Demodulationswinkels φ_d (vgl. Gl. 3.10) werden in Gl. 3.7 ideale Sinus- und Kosinussignale eingesetzt. $W = 500$ repräsentiert den genutzten Wertebereich, der sich aus der Auflösung von 10 bit und der Aussteuerung von ca. 98 % des A/D-Wandlers ergibt.

$$\varphi_d = \arctan\left(\frac{\text{floor}[W \cdot \sin(\Phi_{org})] + 0,5}{\text{floor}[W \cdot \cos(\Phi_{org})] + 0,5}\right) \quad (3.10)$$

Der Anteil φ_d einer ganzen Interferenzordnung von 2π wird auf die durch die Registerbreite $r = 14$ bit verfügbaren $K_{TF} = 2^r$ Teilungsschritte durch Rundung abgebildet und in einen Zählerstand i überführt (vgl. Gl. 3.11). Aufgrund der fehlenden Differenzierbarkeit der Modellfunktionen 3.10 und 3.11 wird die Standardunsicherheit $u_2(\varphi) = 0,05^\circ$ ermittelt, indem

die Differenz zwischen φ_d und dem aus i ermittelbaren Winkel gebildet und mit einer Gleichverteilung bewertet wird.

$$i = \text{round} \left(\frac{K_{\text{TF}}}{2\pi} \cdot \varphi_d \right) \quad (3.11)$$

Zur Überführung in die Standardunsicherheit bei der interferometrischen Längenmessung $u_3(l)$ müssen wiederum die allgemein unkorreliert anzunehmenden Beiträge am Start- und Endpunkt der Messung berücksichtigt werden (vgl. Gl. 3.12).

$$u_3(l) = \sqrt{2} \cdot \frac{\lambda_0}{K_{\text{IF}} \cdot n \cdot 2\pi} \cdot u_2(\varphi) = 0,063 \text{ nm} \quad (3.12)$$

3.3 Referenzkoordinatensystem der Messspiegelecke

Die Oberflächen der Messspiegelecke dienen als Reflektoren für die Planspiegelinterferometer. Abweichungen bei der Bestimmung und Korrektur dieser Flächen führen daher zum Beitrag $u_4(l)$ zur Positionierungsunsicherheit. Die Bestimmung der Oberflächenabweichungen erfolgte durch den Hersteller mit einer Unsicherheit von 4,4 nm [11]. Diese muss mit den Abweichungen der Polynome, die der mathematischen Beschreibung und Korrektur der Oberflächen dienen, von den Messdaten kombiniert werden. Die Standardunsicherheiten der Korrekturpolynome betragen 2,13 nm für die x-Achse, 2,69 nm für die y-Achse und 4,09 nm für die z-Achse [35].

Um $u_4(l)$ (vgl. Tab. 3.2) zu erhalten, müssen die Beiträge jeweils am Start- und Endpunkt der Positionierung berücksichtigt werden. Korrelationen zwischen ihnen existieren nicht.

x-Achse	y-Achse	z-Achse
$u_4(l_x) = 6,91 \text{ nm}$	$u_4(l_y) = 7,29 \text{ nm}$	$u_4(l_z) = 8,49 \text{ nm}$

Tabelle 3.2: Positionierungsunsicherheit durch Abweichungen bei der Bestimmung und Korrektur der Oberflächen der Spiegelecke

3.4 Brechzahl der Luft

Die als Maßstab der Längenmessung verwendete Wellenlänge λ ist von der vorliegenden Brechzahl n des Mediums und der Vakuumwellenlänge λ_0 abhängig ($\lambda = \lambda_0/n$). Zur Be-

stimmung der Brechzahl an jeglichen Messpunkten wird die Parametermethode nach Edlen [17, 106, 49] verwendet. Dabei wird die aktuelle Brechzahl aus den Einflussgrößen Lufttemperatur ϑ in °C, Luftdruck p in Pa und absoluter Luftfeuchte p_w in Pa berechnet (vgl. Gl. 3.13).

$$n = 2,8793 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} \cdot \frac{p}{1 + 0,003671 \text{ °C}^{-1} \cdot \vartheta} - 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \cdot p_w + 1 \quad (3.13)$$

Die Messunsicherheit wird durch die verwendeten Messmethoden für die Parameter ($u(\vartheta) = 0,12 \text{ K}$ [87, 13], $u(p) = 25,4 \text{ Pa}$ [26] und $u(p_w) = 134,8 \text{ Pa}$ als Standardwert für nahezu geschlossene Messräume) und durch die Unsicherheit der verwendeten, empirisch bestimmten Formel $u_{\text{Edlen}}(n) = 5 \cdot 10^{-8}$ [17, 49] beeinflusst. Mit Hilfe der partiellen Ableitungen von Gleichung 3.13 ergibt sich die Standardunsicherheit $u(n) = 1,4498 \cdot 10^{-7}$ für die Brechzahlbestimmung nach der Parametermethode (vgl. Gl. 3.14).

$$u(n) = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \vartheta} \cdot u(\vartheta)\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \cdot u(p)\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial p_w} \cdot u(p_w)\right)^2} + u_{\text{Edlen}}^2(n) = 1,4498 \cdot 10^{-7} \quad (3.14)$$

Änderungen der Brechzahl beeinflussen nicht nur die durch Gl. 3.3 (S. 14) definierte Wegverschiebung l , sondern auch die Totstrecke l_t , die dem optischen Gangunterschied in Luft zwischen Mess- und Referenzarm des Interferometers beim Nullen der Zähler entspricht. Die Messlänge l_m muss daher korrigiert werden (vgl. Gl. 3.15). Da als Startpunkt $l_{m_0} = 0$ gewählt wurde, werden sämtliche Einflüsse durch Brechzahländerungen ausgeregelt, die zwischen dem Nullen und dem Beginn der Messung auftreten. Dadurch wird lediglich der Zählerstand i_0 beeinflusst und der Zusammenhang vereinfacht sich zu der bekannten Form aus [28, 35].

$$\begin{aligned} l_m = l_{m_1} - l_{m_0} &= i_1 \cdot \frac{\lambda_0}{K_{IF} \cdot K_{TF} \cdot n_1} - l_t \left(1 - \frac{n_N}{n_1}\right) - i_0 \cdot \frac{\lambda_0}{K_{IF} \cdot K_{TF} \cdot n_0} + l_t \left(1 - \frac{n_N}{n_0}\right) \\ &= i_1 \cdot \frac{\lambda_0}{K_{IF} \cdot K_{TF} \cdot n_1} - l_t \left(1 - \frac{n_N}{n_1}\right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Zur Berechnung der entstehenden Unsicherheit der interferometrischen Längenmessung $u_5(l)$ müssen die partiellen Ableitungen von Gl. 3.15 nach der aktuellen Brechzahl am Messende n_1 und beim Nullen des Zählers n_N gebildet werden.

Da beide Brechzahlen mit Hilfe des gleichen Druck- und Temperatursensors bestimmt werden, müssen die daraus resultierenden Korrelationen berücksichtigt werden. Die Luftfeuchte wird nicht gemessen und gilt daher als unkorreliert. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte und statistischer Analysen wird auf einen in [91, 92] beschriebenen Ausweg zur Berücksichtigung

der Korrelationen ausgewichen, indem die unkorrelierten Größen in den bekannten funktionalen Zusammenhang integriert werden. Die Temperaturen ϑ_0 am Startpunkt und ϑ_1 am Endpunkt der Messung sowie die Druckwerte p_0 und p_1 werden dabei durch die unkorrelierten Größen ϑ_0 , p_0 , $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$ und $p_0 + \Delta p$ ersetzt (vgl. Gl. 3.16 und 3.17).

$$n_N = 2,8793 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} \cdot \frac{p_0}{1 + 0,003671 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \vartheta_0} - 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \cdot p_{w0} + 1 \quad (3.16)$$

$$n_1 = 2,8793 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} \cdot \frac{p_0 + \Delta p}{1 + 0,003671 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot (\vartheta_0 + \Delta\vartheta)} - 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \cdot p_{w1} + 1 \quad (3.17)$$

Die Zuordnung von Unsicherheiten zu $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_0$ und $\Delta p = p_1 - p_0$ erfolgt durch experimentelle Analyse der Streuungen, welche vorwiegend durch die begrenzte Auflösung der Sensorelektronik bestimmt sind [30], zu $u(\Delta\vartheta) < 6 \text{ mK}$ und $u(\Delta p) = 8,1 \text{ Pa}$. Die systematischen Abweichungen entfallen durch die Differenzbildung. $u_{\text{Edlen}}(n)$ kann als vollkommen korreliert angenommen werden, da sie lediglich eine systematische Abweichung darstellt.

Die Bestimmung der interferometrischen Längenmessunsicherheit $u_5(l)$ durch Brechzahländerungen ist nun mit Hilfe von Gl. 3.18 möglich, wobei der in den partiellen Ableitungen (vgl. Gl. 3.19 bis 3.22) auftretende, unbekannte Zählerstand i mit Hilfe von Gl. 3.15 ersetzt wird und die Erwartungswerte für die Parameter $E[\Delta\vartheta] = 0$, $E[\Delta p] = 0$ und $E[p_{w1} - p_{w0}] = 0$ bereits eingesetzt wurden.

$$\begin{aligned} u_5^2(l) &= \left(\frac{\partial l_m}{\partial \vartheta_0} \right)^2 \cdot u^2(\vartheta_0) + \left(\frac{\partial l_m}{\partial \Delta\vartheta} \right)^2 \cdot u^2(\Delta\vartheta) \\ &+ \left(\frac{\partial l_m}{\partial p_0} \right)^2 \cdot u^2(p_0) + \left(\frac{\partial l_m}{\partial \Delta p} \right)^2 \cdot u^2(\Delta p) \\ &+ \left(\frac{\partial l_m}{\partial p_{w0}} \right)^2 \cdot u^2(p_{w0}) + \left(\frac{\partial l_m}{\partial p_{w1}} \right)^2 \cdot u^2(p_{w1}) \\ &+ \left(\frac{\partial l_m}{\partial n_0} - \frac{\partial l_m}{\partial n_1} \right) \cdot u_{\text{Edlen}}^2(n) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial l_m}{\partial \vartheta_0} = \frac{1}{n} \cdot l_m \cdot \frac{\partial n}{\partial \vartheta_0} \qquad \frac{\partial l_m}{\partial \Delta\vartheta} = \frac{1}{n} \cdot (l_m + l_t) \cdot \frac{\partial n}{\partial \Delta\vartheta} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial l_m}{\partial p_0} = \frac{1}{n} \cdot l_m \cdot \frac{\partial n}{\partial p_0} \qquad \frac{\partial l_m}{\partial \Delta p} = \frac{1}{n} \cdot (l_m + l_t) \cdot \frac{\partial n}{\partial \Delta p} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial l_m}{\partial p_{w0}} = \frac{1}{n} \cdot l_t \cdot \frac{\partial n}{\partial p_{w0}} \qquad \frac{\partial l_m}{\partial p_{w1}} = \frac{1}{n} \cdot (l_m + l_t) \cdot \frac{\partial n}{\partial p_{w1}} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial l_m}{\partial n_0} - \frac{\partial l_m}{\partial n_1} = \frac{1}{n} \cdot l_m \quad (3.22)$$

$u_5(l)$ ergibt sich nun nach Gl. 3.23. Da die Interferometer am Messbereichsanfang genullt werden, betragen die Totstrecken konstruktiv bedingt 37 mm für die x- und y-Achse und 102 mm für die z-Achse. Die resultierenden Längenmessunsicherheiten sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

$$\begin{aligned}
 u_5^2(l) = & \frac{1}{n^2} \cdot l_m^2 \cdot \left[\left(\frac{\partial n}{\partial \vartheta} \right)^2 \cdot u^2(\vartheta_0) + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)^2 \cdot u^2(p_0) + u_{\text{Edlen}}^2(n) \right] \\
 & + \frac{1}{n^2} \cdot l_t^2 \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial p_w} \right)^2 \cdot u^2(p_w) \\
 & + \frac{1}{n^2} \cdot (l_m + l_t)^2 \\
 & \cdot \left[\left(\frac{\partial n}{\partial \vartheta} \right)^2 \cdot u^2(\Delta\vartheta) + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)^2 \cdot u^2(\Delta p) + \left(\frac{\partial n}{\partial p_w} \right)^2 \cdot u^2(p_w) \right] \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

x- und y-Achse	z-Achse
$u_5(l_{xy}) = 2,67 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 0$	$u_5(l_z) = 7,36 \text{ nm}$ für $l_z = 0$
$u_5(l_{xy}) = 3,62 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 12,5 \text{ mm}$	$u_5(l_z) = 7,47 \text{ nm}$ für $l_z = 2,5 \text{ mm}$
$u_5(l_{xy}) = 5,08 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 25 \text{ mm}$	$u_5(l_z) = 7,59 \text{ nm}$ für $l_z = 5 \text{ mm}$

Tabelle 3.3: Unsicherheit bei der interferometrischen Differenzlängenmessung durch Unsicherheiten bei der Luftbrechzahlbestimmung

3.5 Thermische Ausdehnung der Messanordnung

Die temperaturbedingten Längenänderungen aller Bestandteile der Messkette in Messrichtung, die nach dem Start einer Messung entstehen, tragen durch Unsicherheiten der Temperaturänderungen zwischen Start- und Endpunkt der Messung $u(\Delta\vartheta_{\text{Stab},i})$, Grundlängen der Teilstrecken $u(l_i)$ und Ausdehnungskoeffizienten $u(\alpha_i)$ zur Positionierungsunsicherheit $u_6(l)$ bei (vgl. Gl. 3.24 und 3.25). Damit müssen nur die veränderten Verhältnisse am Endpunkt einbezogen werden. Die Abbildungen 3.4 (S. 22) und 3.5 (S. 23) zeigen die Teilstrecken der Ausdehnungsketten. Tabelle 3.4 (S. 24) bezeichnet die Teilstrecken und Materialien.

$$l = l_m + \Delta l_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}} = l_m + \sum_i (l_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta\vartheta_{\text{Stab},i}) \quad (3.24)$$

$$u_6^2(l) = u_{l_i}^2(l) + u_{\alpha_i}^2(l) + u_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}}^2(l) \quad (3.25)$$

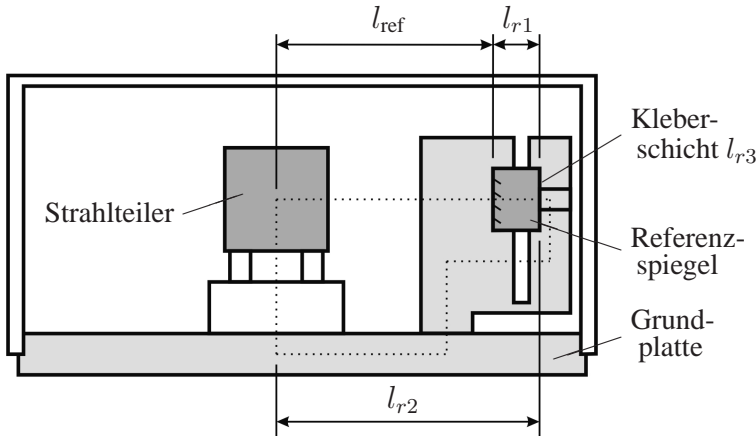


Abb. 3.4: Thermische Ausdehnungskette der Referenzarme der Interferometer (aus [35])

Durch die exakte Klimatisierung verschwinden die Erwartungswerte der $\Delta\vartheta_{\text{Stab},i}$ und das Messergebnis l_m muss nicht um den Term $\Delta l_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}}$ korrigiert werden. Die Unsicherheiten der einzelnen Komponenten müssen jedoch berücksichtigt werden. Die Unsicherheit der Temperaturmessung $u(\Delta\vartheta) = 6 \text{ mK}$ (vgl. S. 20) muss mit der Unsicherheit der Temperaturstabilisierung von $0,1 \text{ K}$ zu $u(\Delta\vartheta_{\text{Stab}})$ kombiniert werden. Die Unsicherheiten der Ausdehnungskoeffizienten ergeben sich aus den Toleranzen der Hersteller. Die Temperaturabhängigkeit von α kann aufgrund der kleinen auftretenden Temperaturänderungen vernachlässigt werden. Die Fertigungstoleranzen der im Modell relevanten Bauteillängen und die Ausrichtung beim Montieren werden mit kleiner als $\pm 0,05 \text{ mm}$ abgeschätzt. Da die effektiven Werte der l_i an Kontaktflächen zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizienten von der Art der Paarung und der dabei auftretenden Reibung abhängig sind, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Ausdehnung von der Mitte dieser Flächen aus gleichmäßig erfolgt [35].

Bei der Ermittlung der kombinierten Messunsicherheit $u_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}}(l)$ (vgl. Gl. 3.26) ist zu beachten, dass die Temperaturschwankung zur Ermittlung von $u(\Delta\vartheta_{\text{Stab}})$ nur an einer Stelle im Messaufbau bestimmt wurde. Deshalb müssen entweder alle Korrelationskoeffizienten zwischen den $\Delta\vartheta_{\text{Stab},i}$ mit 1 beziffert oder alle $\Delta\vartheta_{\text{Stab},i}$ im Modell nach Gl. 3.24 durch $\Delta\vartheta_{\text{Stab}}$ ersetzt werden. Damit ergibt sich $u_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}}(l)$ entsprechend Gl. 3.26. Die Annahme gleicher Temperaturdifferenzen in allen Bauteilen der Messkette gilt nur unter Voraussetzung des thermischen Gleichgewichtes oder sehr langsamen Temperaturänderungen. Ansonsten führen hohe Wärmekapazitäten und unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Materialien zu lokal abweichenden Temperaturänderungen.

$$u_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}}(l) = \frac{\partial l}{\partial \Delta\vartheta_{\text{Stab}}} \cdot u(\Delta\vartheta_{\text{Stab}}) = \sum_i (l_i \cdot \alpha_i) \cdot u(\Delta\vartheta_{\text{Stab}}) \quad (3.26)$$

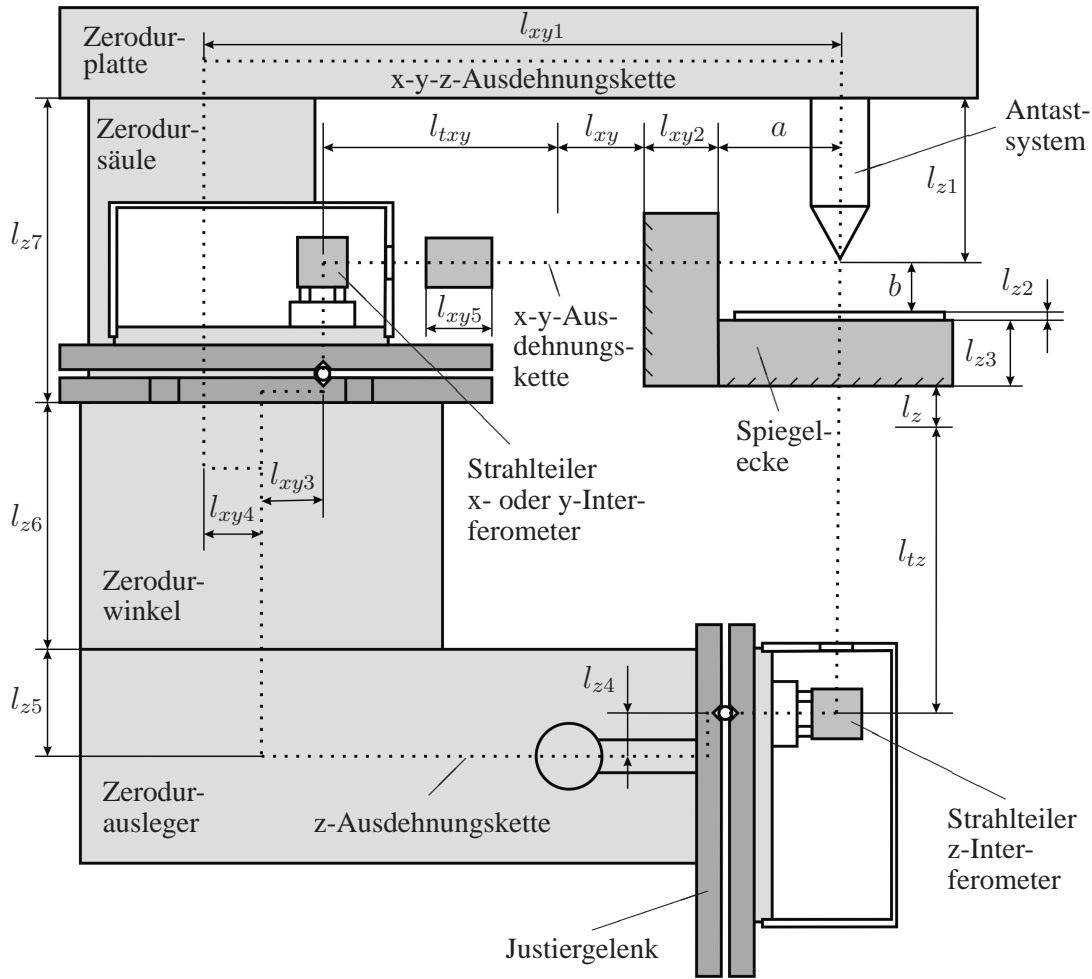


Abb. 3.5: Thermische Ausdehnungskette der NPM-Maschine (aus [35])

Zwischen den einzelnen α_i und l_i liegen keine Korrelationen vor. Die ersten und alle höheren nicht gemischten partiellen Ableitungen nach beiden Größen führen wegen $E[\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}] = 0$ zu verschwindenden Sensitivitätskoeffizienten. Dieser Sonderfall von multiplikativ verknüpften Größen wird durch den linearen Ansatz des GUM nicht abgedeckt. Die Lösung gibt Kessel in [50] durch Anwenden der Wahrscheinlichkeitstheorie an. Im Allgemeinen erhält man das Ergebnis auch durch Hinzunahme höherer und gemischter Ableitungen bei der Entwicklung der Taylorreihe mehrerer Eingangsgrößen ([46], S. 19). Im vorliegenden Fall entstehen nur Beiträge durch die einfachen, gemischten Ableitungen nach α_i und $\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}$ bzw. l_i und $\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}$ (vgl. Gl. 3.27 und 3.28), die nun neu mit ins Budget einbezogen werden.

$$u_{l_i}^2(l) = \sum_i \left[\frac{\partial^2 l}{\partial l_i \partial \Delta\vartheta_{\text{Stab.}}} \cdot u(l_i) \cdot u(\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}) \right]^2 = \sum_i [\alpha_i^2 \cdot u^2(l_i)] \cdot u^2(\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}) \quad (3.27)$$

Strecke	Bezeichnung und Material
l_{ref}	Referenzarmlänge des Interferometers
l_{r1}	Referenzspiegel aus Glas BK7 [70]
l_{r2}	Interferometergrundkörper aus Aluminium (AlZnMgCu 0,5) [12]
l_{r3}	Kleberschicht [60]
a	Abstand vom Antastpunkt zur seitlichen Spiegelplatte der Messspiegelecke
b	Abstand vom Antastpunkt zur Schutzglasplatte ($\hat{=}$ Messobjektdicke)
l_{txy}	Totstrecke des x- oder y-Interferometers
l_{tz}	Totstrecke des z-Interferometers
l_{xy}	Messlänge des x- oder y-Interferometers
l_{xy1}	Zerodurplatte zur Befestigung des Antastelementes [83]
l_{xy2}	seitliche Spiegelplatte der Messspiegelecke aus Glas SQ1 [70]
l_{xy3}	Justiergelenk des x- oder y-Interferometers aus Invar [31]
l_{xy4}	Zerodurwinkel [83]
l_{xy5}	Planplatte zur seitlichen Justierung des Messstrahls aus Glas BK7 [70]
l_z	Messlänge des z-Interferometers
l_{z1}	Antastsystem
l_{z2}	Schutzglasplatte aus Glas BK7 [70]
l_{z3}	untere Spiegelplatte der Messspiegelecke aus Glas SQ1 [70]
l_{z4}	Justiergelenk des z-Interferometers aus Invar [31]
l_{z5}	Zerodurausleger [83]
l_{z6}	Zerodurwinkel [83]
l_{z7}	Zerodursäule [83]

Tabelle 3.4: Teilstrecken der Ausdehnungsketten der NPM-Maschine (aus [35])

$$u_{\alpha_i}^2(l) = \sum_i \left[\frac{\partial^2 l}{\partial \alpha_i \partial \Delta \vartheta_{\text{Stab.}}} \cdot u(\alpha_i) \cdot u(\Delta \vartheta_{\text{Stab.}}) \right]^2 = \sum_i [l_i^2 \cdot u^2(\alpha_i)] \cdot u^2(\Delta \vartheta_{\text{Stab.}}) \quad (3.28)$$

Für die einzelnen Achsen ergeben sich die in Tabelle 3.5 dargestellten Standardunsicherheiten $u_6(l)$ aufgrund thermischer Ausdehnungen. Antastsystem und Messobjekt sind in ihren Eigenschaften variabel und bleiben daher unberücksichtigt, können aber bei Bedarf entsprechend in das Modell mit aufgenommen werden. Mit über 80 % stellt die Ausdehnung der Referenzarmstrecke l_{r2} (vgl. Abb. 3.4, S. 22) den absolut größten Anteil der Unsicherheit bei

der Positionierung mit dem bisherigen Aufbau dar, da die Grundplatten der Interferometer (vgl. Abb. 3.4, S. 22) aus Aluminium gefertigt wurden.

x- und y-Achse	z-Achse
$u_6(l_{xy}) = 56,50 \text{ nm}$ für $l = 0$	$u_6(l_z) = 57,82 \text{ nm}$ für $l = 0$
$u_6(l_{xy}) = 55,85 \text{ nm}$ für $l = 12,5 \text{ mm}$	$u_6(l_z) = 57,82 \text{ nm}$ für $l = 2,5 \text{ mm}$
$u_6(l_{xy}) = 55,20 \text{ nm}$ für $l = 25 \text{ mm}$	$u_6(l_z) = 57,82 \text{ nm}$ für $l = 5 \text{ mm}$

Tabelle 3.5: Positionierungsunsicherheit durch thermische Ausdehnung der Messkette bei einer Unsicherheit der Temperaturstabilisierung von 0,1 K

3.6 Winkelabweichungen

Verkippungen des Messobjektes führen zu Längenmessabweichungen erster ($\Delta l_{1.\text{Ord}}$) und zweiter ($\Delta l_{2.\text{Ord}}$) Ordnung (vgl. Abb. 3.6). Die Winkelregelung begrenzt die Verkippungen um die horizontalen Achsen auf $u(\varphi_x) = u(\varphi_y) = u(\varphi_{xy}) = 0,05''$. Für die Bestimmung von $u(\varphi_z) = 3,1''$ wurden die auftretenden Führungsabweichungen aller drei Führungen von $\leq 3''$ mit Gleichverteilungen bewertet und mit der Unsicherheit der Winkelmessung kombiniert. Dies ist notwendig, da die Winkelsensoren für φ_z als messende Systeme arbeiten. Für die Verkippungen um die x- und y-Achse ist jedoch nur die Nullpunktstabilität der Sensoren von Bedeutung. Die Unsicherheit der Winkelmessung von $0,76''$ setzt sich aus den Kalibrierabweichungen der linearen Sensorkennlinie (vgl. Kapitel 4.3.2, S. 53 ff.) von $0,7''$, der Messunsicherheit der Referenzmessung von $0,3''$ [98] und der dagegen kaum signifikanten Messunsicherheit bei der Spannungsmessung der Signale der Photoempfänger mittels A/D-Wandler von $0,0051''$ zusammen.

Längenmessabweichungen erster Ordnung entstehen jedoch erst, wenn die Messachsen der Interferometer nicht ideal auf den Antastpunkt ausgerichtet sind (vgl. Abb. 3.6(a)). Der maximale Versatz s wurde mit $0,1 \text{ mm}$ abgeschätzt [35], wodurch sich die Standardunsicherheit $u(s) = 0,06 \text{ mm}$ ergibt.

Für alle drei Achsen ergeben sich daraus Abweichungen erster Ordnung (vgl. Gl. 3.29) für beide jeweils senkrecht zur Messachse auftretenden Verlagerungen s bei zugehöriger Kippung in der durch die Messachse und den Versatz aufgespannten Ebene.

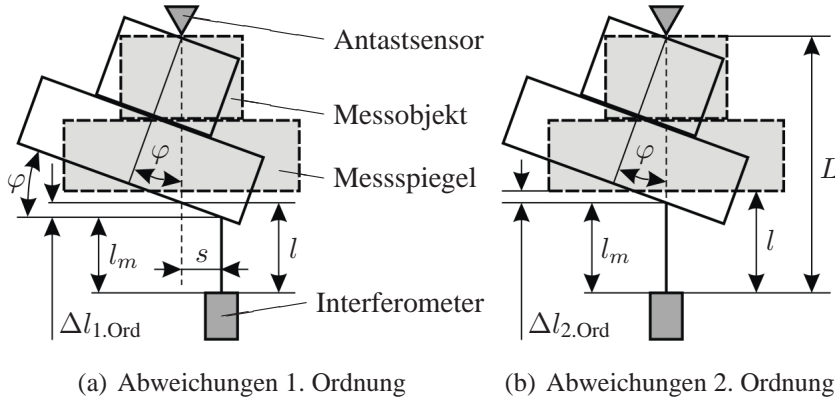


Abb. 3.6: Entstehung von Längenmessabweichungen durch Verkipfung des Messobjektes

$$l = l_m + \Delta l_{1.Ord} = l_m + s \cdot \tan(\varphi) \quad (3.29)$$

Zur korrekten Berechnung der Positionierungsunsicherheit $u_{1.Ord}(l)$ muss wiederum die gemischte Ableitung verwendet werden (vgl. Gl. 3.30), da beide partiellen Ableitungen erster Ordnung für $E[s] = 0$ und $E[\varphi] = 0$ verschwindende Sensitivitätskoeffizienten liefern.

$$u_{1.Ord}^2(l) = \frac{\partial^2 l}{\partial s \partial \varphi} \cdot u^2(s) \cdot u^2(\varphi) = (1 + \tan^2 \varphi) \cdot u^2(s) \cdot u^2(\varphi) = u^2(s) \cdot u^2(\varphi) \quad (3.30)$$

Die zunächst allgemein resultierenden Unsicherheitsbeiträge (vgl. Gl. 3.31 bis 3.36) entstehen am Start- und am Endpunkt gleichermaßen. Korrelationen müssen dabei nicht berücksichtigt werden, da die unbekannt systematischen Abweichungen für s zwar am Start- und Endpunkt nahezu vollständig korreliert sind, jedoch mit den zufällig positiv oder negativ auftretenden Winkelabweichungen multiplikativ verknüpft werden. Die Zusammenfassung erfolgt trotzdem erst später, da noch Korrelationen mit anderen Einflussgrößen zu berücksichtigen sind.

$$u_{1.Ord(\varphi_y)}(l_x) = u(s) \cdot u(\varphi_y) = 0,02 \text{ nm} \quad (3.31)$$

$$u_{1.Ord(\varphi_z)}(l_x) = u(s) \cdot u(\varphi_z) = 0,87 \text{ nm} \quad (3.32)$$

$$u_{1.Ord(\varphi_x)}(l_y) = u(s) \cdot u(\varphi_x) = 0,02 \text{ nm} \quad (3.33)$$

$$u_{1.Ord(\varphi_z)}(l_y) = u(s) \cdot u(\varphi_z) = 0,87 \text{ nm} \quad (3.34)$$

$$u_{1.Ord(\varphi_x)}(l_z) = u(s) \cdot u(\varphi_x) = 0,02 \text{ nm} \quad (3.35)$$

$$u_{1.Ord(\varphi_y)}(l_z) = u(s) \cdot u(\varphi_y) = 0,02 \text{ nm} \quad (3.36)$$

Bei Verkippungen entstehen außerdem Abweichungen zweiter Ordnung (vgl. Abb. 3.6(b)) und der Term $\Delta l_{2.\text{Ord}}$ muss im Modell berücksichtigt werden (vgl. Gl. 3.37). Zusätzlich geht der Abstand $L - l_m$ bzw. $L - l$ (vgl. Abb. 3.6(b)) zwischen Antastpunkt und Spiegelfläche ein, welcher sich aus den Längen $a + l_{xy2}$ für die x- und y-Achse bzw. $b + l_{z2} + l_{z3}$ für die z-Achse ergibt (vgl. Abb. 3.5, S. 23).

$$\begin{aligned} l &= l_m + \Delta l_{2.\text{Ord}} = l_m + (L - l_m) - (L - l) \quad \text{mit} \quad \cos(\varphi) = \frac{(L - l)}{(L - l_m)} \\ &= l_m + (L - l_m) \cdot [1 - \cos(\varphi)] \end{aligned} \quad (3.37)$$

Die erste Ableitung nach φ liefert erneut einen verschwindenden Sensitivitätskoeffizienten. Die zweite Ableitung ist jedoch verschieden von Null. Eine Lösung liefert wiederum Kessel in [50]. Der Erwartungswert für $\cos(\varphi)$ weicht dabei von Eins ab, da die Kosinus-Funktion im Ordinatenschnittpunkt symmetrisch verläuft. Der Erwartungswert η stellt für l das berichtigte Mittel dar und enthält zum unberichtigten Mittel $\eta' = E[l_m] = \eta - c$ eine Differenz c (vgl. Gl. 3.38), die eigentlich als Korrektur in die Auswertung mit aufgenommen werden muss. Die beizuordnende Unsicherheit $u(\eta)$ (vgl. Gl. 3.39) enthält das zentrale Moment vierter Ordnung $\mu_4(\varphi)$. Das Verhältnis von $\mu_4(\varphi)$ zu $u^4(\varphi)$ beträgt für die vorliegende rechteckförmige Verteilung $4/5$ [50].

$$\eta = E[l] = l_m + (L - l_m) \cdot \frac{1}{2} \cdot u^2(\varphi) = \eta' + c \quad (3.38)$$

$$u^2(\eta) = \frac{1}{4} \cdot (L - l_m)^2 \cdot |\mu_4(\varphi) - u^4(\varphi)| = \frac{1}{20} \cdot (L - l_m)^2 \cdot u^4(\varphi) \quad (3.39)$$

Da η selbst von der Unsicherheit der Eingangsgröße abhängt, wird die ohnehin sehr geringe Korrektur c nicht angebracht und eine entsprechend vergrößerte Unsicherheit dem unberichtigten Schätzwert η' zugeordnet (vgl. Gl. 3.40) [105, 14].

$$u_{2.\text{Ord}}^2(l) = u^2(\eta') = u^2(\eta) + c^2 = 0,3 \cdot (L - l_m)^2 \cdot u^4(\varphi) \quad (3.40)$$

In jeder Längennachse treten jeweils bei Verkippungen um die beiden korrespondierenden Achsen Messabweichungen auf, die am Anfang und Ende der Messung unabhängig und damit unkorreliert sind, aber ebenfalls später erst zusammengefasst werden (vgl. Gl. 3.41 bis 3.46).

$$u_{2.\text{Ord}(\varphi_y)}(l_x) = \sqrt{0,3} \cdot (70 \text{ mm} - l_{m_x}) \cdot u^2(\varphi_y) \leq 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.41)$$

$$u_{2.\text{Ord}(\varphi_z)}(l_x) = \sqrt{0,3} \cdot (70 \text{ mm} - l_{m_x}) \cdot u^2(\varphi_z) \leq 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \quad (3.42)$$

$$u_{2.\text{Ord}(\varphi_x)}(l_y) = \sqrt{0,3} \cdot (70 \text{ mm} - l_{m_y}) \cdot u^2(\varphi_x) \leq 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.43)$$

$$u_{2.\text{Ord}(\varphi_z)}(l_y) = \sqrt{0,3} \cdot (70 \text{ mm} - l_{m_y}) \cdot u^2(\varphi_z) \leq 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \quad (3.44)$$

$$u_{2.Ord(\varphi_x)}(l_z) = \sqrt{0,3} \cdot (34 \text{ mm} - l_{m_z}) \cdot u^2(\varphi_x) \leq 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.45)$$

$$u_{2.Ord(\varphi_y)}(l_z) = \sqrt{0,3} \cdot (34 \text{ mm} - l_{m_z}) \cdot u^2(\varphi_y) \leq 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.46)$$

Außerdem beeinflussen Winkelabweichungen durch die Kippung der Spiegelecke und gleichverteilte Unebenheiten der Spiegeloberflächen von maximal $\varphi_s = 2,2''$ [35] die Ausbreitungsrichtung der reflektierten ebenen Wellenfronten der Interferometerstrahlen. Die dadurch entstehende Abweichung zweiter Ordnung bei der Überlagerung der Wellenfronten in der Auswerteebene der Interferenzen $u_{Int}(l)$ (Wellenfrontfehler) ist am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik bekannt und wurde bereits in [3] erläutert. Die Beschreibung ist auf folgende Art und Weise möglich.

Die entstehende geometrische Weglängenänderung Δl_{geo} , die vom Abstand s_{Blende} zwischen der Messfläche der Spiegelecke und der Auswertebende des Interferometers abhängt (vgl. Abb. 3.7), führt zu einer Verkleinerung der Ordnungszahl der Interferenz $\Delta \delta$ und damit zur Messlängenänderung Δl_{Int} (vgl. Gl. 3.47 bis 3.49). Diese muss in das Modell (vgl. Gl. 3.50) mit einbezogen werden.

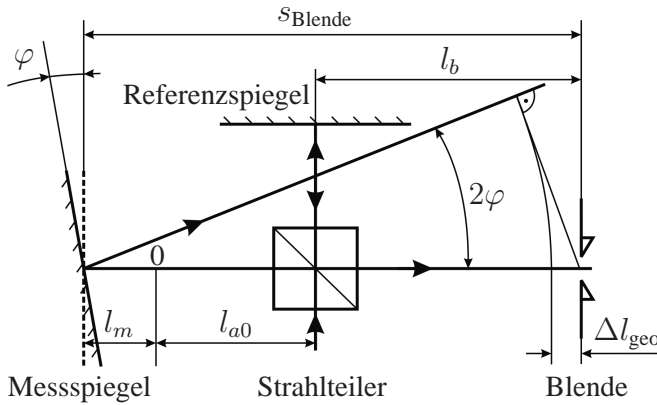


Abb. 3.7: Wellenfrontfehler im Interferometer

$$\Delta l_{geo} = s_{Blende} \cdot [1 - \cos(2 \cdot \varphi)] \quad (3.47)$$

$$\Delta \delta = \frac{\Delta l_{geo}}{\lambda} \quad (3.48)$$

$$\Delta l_{Int} = \frac{\Delta \delta \cdot \lambda}{K_{IF}} = \frac{s_{Blende} \cdot [1 - \cos(2 \cdot \varphi)]}{K_{IF}} \quad (3.49)$$

$$l = l_m + \Delta l_{Int} = l_m + \frac{s_{Blende} \cdot [1 - \cos(2 \cdot \varphi)]}{K_{IF}} \quad (3.50)$$

Analog zur neuen Vorgehensweise bei der Bestimmung der Abweichungen zweiter Ordnung im vorigen Abschnitt können auch die Unsicherheiten durch Wellenfrontfehler $u_{Int}(l)$ bestimmt werden (vgl. Gl. 3.51 bis 3.60). Sie sind ebenfalls am Start- und Endpunkt der Messung unkorreliert. Die Abweichungen durch die Spiegeloberflächenneigung φ_s müssen zusätzlich doppelt berücksichtigt werden, da sie um beide Achsen innerhalb der Spiegelebenen unabhängig voneinander auftreten [35]. Der Abstand s_{Blende} zwischen Spiegelebenenoberfläche und Auswertblende des Interferometers ergibt sich aus der Summe von jeweiliger Messlänge l_m , Länge des Messarmes beim Nullen der Zähler l_{a0} und dem Abstand der Blende von der Strahlteilermitte des Interferometers l_b (vgl. Abb. 3.7). Sämtliche Unsicherheitsbeiträge durch Abweichungen zweiter Ordnung sind als nicht signifikant einzustufen.

$$u_{Int}^2(l) = 0,3 \cdot \left(\frac{s_{Blende}}{K_{IF}} \right)^2 \cdot u^4(2 \cdot \varphi) = 4,8 \cdot \left(\frac{l_m + l_{a0} + l_b}{K_{IF}} \right)^2 \cdot u^4(\varphi) \quad (3.51)$$

$$u_{Int(\varphi_y)}(l_x) = \sqrt{4,8} \cdot \frac{l_{m_x} + 80,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_y) \leq 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.52)$$

$$u_{Int(\varphi_z)}(l_x) = \sqrt{4,8} \cdot \frac{l_{m_x} + 80,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_z) \leq 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ nm} \quad (3.53)$$

$$u_{Int(\varphi_s)}(l_x) = \sqrt{9,6} \cdot \frac{l_{m_x} + 80,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_s) \leq 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \quad (3.54)$$

$$u_{Int(\varphi_x)}(l_y) = \sqrt{4,8} \cdot \frac{l_{m_y} + 80,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_x) \leq 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.55)$$

$$u_{Int(\varphi_z)}(l_y) = \sqrt{4,8} \cdot \frac{l_{m_y} + 80,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_z) \leq 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ nm} \quad (3.56)$$

$$u_{Int(\varphi_s)}(l_y) = \sqrt{9,6} \cdot \frac{l_{m_y} + 80,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_s) \leq 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \quad (3.57)$$

$$u_{Int(\varphi_x)}(l_z) = \sqrt{4,8} \cdot \frac{l_{m_z} + 133,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_x) \leq 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.58)$$

$$u_{Int(\varphi_y)}(l_z) = \sqrt{4,8} \cdot \frac{l_{m_z} + 133,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_y) \leq 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ nm} \quad (3.59)$$

$$u_{Int(\varphi_s)}(l_z) = \sqrt{9,6} \cdot \frac{l_{m_z} + 133,5 \text{ mm}}{K_{IF}} \cdot u^2(\varphi_s) \leq 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \quad (3.60)$$

Die Gleichungen 3.61 bis 3.63 zeigen die Zusammenfassung aller Beiträge zur Positionierunsicherheit aufgrund von Verkippungen des Messtisches und der Messreflektoren der Interferometer zu $u_7(l)$ (vgl. Tab. 3.6). Zunächst werden die Beiträge für den Start- und den Endpunkt sowie die Achsen getrennt behandelt und die Korrelationen aller Abweichungen, die aus der

gleichen Winkelabweichung resultieren, berücksichtigt. Danach werden die unkorrelierten Anteile am Start- und Endpunkt der Messung (Index „0“ bzw. „1“) zusammengefasst.

$$\begin{aligned}
 u_7^2(l_x) &= u_7^2(l_{x0}) + u_7^2(l_{x1}) \\
 &= \left[u_{1.Ord(\varphi_y)}(l_{x0}) + u_{2.Ord(\varphi_y)}(l_{x0}) + u_{Int(\varphi_y)}(l_{x0}) \right]^2 \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_z)}(l_{x0}) + u_{2.Ord(\varphi_z)}(l_{x0}) + u_{Int(\varphi_z)}(l_{x0}) \right]^2 \\
 &\quad + u_{Int(\varphi_s)}^2(l_{x0}) \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_y)}(l_{x1}) + u_{2.Ord(\varphi_y)}(l_{x1}) + u_{Int(\varphi_y)}(l_{x1}) \right]^2 \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_z)}(l_{x1}) + u_{2.Ord(\varphi_z)}(l_{x1}) + u_{Int(\varphi_z)}(l_{x1}) \right]^2 \\
 &\quad + u_{Int(\varphi_s)}^2(l_{x1})
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

$$\begin{aligned}
 u_7^2(l_y) &= u_7^2(l_{y0}) + u_7^2(l_{y1}) \\
 &= \left[u_{1.Ord(\varphi_x)}(l_{y0}) + u_{2.Ord(\varphi_x)}(l_{y0}) + u_{Int(\varphi_x)}(l_{y0}) \right]^2 \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_z)}(l_{y0}) + u_{2.Ord(\varphi_z)}(l_{y0}) + u_{Int(\varphi_z)}(l_{y0}) \right]^2 \\
 &\quad + u_{Int(\varphi_s)}^2(l_{y0}) \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_x)}(l_{y1}) + u_{2.Ord(\varphi_x)}(l_{y1}) + u_{Int(\varphi_x)}(l_{y1}) \right]^2 \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_z)}(l_{y1}) + u_{2.Ord(\varphi_z)}(l_{y1}) + u_{Int(\varphi_z)}(l_{y1}) \right]^2 \\
 &\quad + u_{Int(\varphi_s)}^2(l_{y1})
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

$$\begin{aligned}
 u_7^2(l_z) &= u_7^2(l_{z0}) + u_7^2(l_{z1}) \\
 &= \left[u_{1.Ord(\varphi_x)}(l_{z0}) + u_{2.Ord(\varphi_x)}(l_{z0}) + u_{Int(\varphi_x)}(l_{z0}) \right]^2 \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_y)}(l_{z0}) + u_{2.Ord(\varphi_y)}(l_{z0}) + u_{Int(\varphi_y)}(l_{z0}) \right]^2 \\
 &\quad + u_{Int(\varphi_s)}^2(l_{z0}) \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_x)}(l_{z1}) + u_{2.Ord(\varphi_x)}(l_{z1}) + u_{Int(\varphi_x)}(l_{z1}) \right]^2 \\
 &\quad + \left[u_{1.Ord(\varphi_y)}(l_{z1}) + u_{2.Ord(\varphi_y)}(l_{z1}) + u_{Int(\varphi_y)}(l_{z1}) \right]^2 \\
 &\quad + u_{Int(\varphi_s)}^2(l_{z1})
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

x- und y-Achse	z-Achse
$u_7(l_{xy}) = 1,27 \text{ nm}$	$u_7(l_z) = 0,03 \text{ nm}$

Tabelle 3.6: Positionierungsunsicherheit durch Verkippungen des Messtisches

3.7 Zusammenfassung der Messunsicherheiten

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Beiträge $u_i(l)$ (vgl. Tab. 3.7) zur Positionierunsicherheit beziehen sich auf die Bestimmung des Abstandes zwischen zwei Positionen im Messbereich der NPM-Maschine und nicht mehr, wie bisher, auf einen einzelnen Punkt. Trotz Berücksichtigung des Entwicklungsstandes der NPM-Maschine zu Beginn der vorliegenden Dissertation ergeben sich daher Unterschiede zu den in [35] genannten Werten.

Die Beiträge zur kombinierten Positionierunsicherheit werden zunächst nach Messachsen getrennt zusammengefasst (vgl. Tabelle 3.8). Weitere Korrelationen sind dabei nicht zu berücksichtigen, da die Ursachen der einzelnen Beiträge unabhängig voneinander sind.

Die Unabhängigkeit der Parameter gilt jedoch nicht vollständig für die Zusammenfassung der Beiträge der einzelnen Achsen zur Bestimmung der Gesamtunsicherheit bei der Positionierung des Messtisches entlang der Diagonalen durch den gesamten Messbereich. Für die Frequenzstabilität ($u_1(l)$), die Erfassung und Demodulation der Interferenzsignale ($u_2(l)$ und $u_3(l)$) und die Oberflächenabweichungen der Spiegelecke ($u_4(l)$) ist die Unabhängigkeit der Einflussgrößen noch gegeben, da unterschiedliche Messsysteme bzw. unterschiedliche Flächen der Spiegelecke Einfluss nehmen. Bei der Korrektur der Brechzahl ($u_5(l)$) ist sie aber nur für die Temperatureinflüsse gegeben, da die Temperatur für jede Achse separat gemessen wird. Luftdruck und Feuchte gehen jedoch in die Brechzahlbestimmung aller Achsen gleichermaßen ein und sind somit vollständig korreliert. Dies gilt ebenfalls für die thermische Ausdehnung der einzelnen Messketten ($u_6(l)$). Sie unterliegen dem gemeinsamen Parameter der Temperaturänderung $\Delta\vartheta_{\text{stab.}}$. Bei den durch Winkelabweichungen verursachten Messabweichungen ($u_7(l)$) treten die drei Kippwinkel ebenfalls in allen Achsen auf, und die entsprechenden Korrelationen müssen beim Zusammenfassen beachtet werden.

Gleichung 3.64 zeigt das Modell zur Berechnung der Messlänge der Diagonalen aus den Messwerten der einzelnen Achsen l_x , l_y und l_z . Die im vorigen Abschnitt genannten Beiträge zu $u(l)$, die von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig sind, können ohne die Berücksichtigung von Korrelationen nach Gleichung 3.65 quadratisch zusammengefasst werden. Beiträge, die durch die gleiche Einflussgröße verursacht werden, müssen linear verknüpft werden (vgl. Gl. 3.66).

Tabelle 3.9 zeigt die Zusammenfassung der Beiträge zunächst nach den einzelnen Ursachen getrennt und schließlich die resultierende Positionierunsicherheit entlang der Diagonalen. Die geschilderte Herangehensweise erlaubt die Bestimmung der Positionierunsicherheit für jeden beliebigen Endpunkt im gesamten Messbereich.

$$l = \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} \quad (3.64)$$

$$u_{\text{unkorr.}}(l) = \frac{1}{l} \cdot \sqrt{\sum_i \{(l_x \cdot u_i(l_x))^2 + (l_y \cdot u_i(l_y))^2 + (l_z \cdot u_i(l_z))^2\}} \quad (3.65)$$

$$u_{\text{kor.}}(l) = \frac{1}{l} \cdot \sqrt{\sum_i \{l_x \cdot u_i(l_x) + l_y \cdot u_i(l_y) + l_z \cdot u_i(l_z)\}^2} \quad (3.66)$$

$$u(l) = \sqrt{u_{\text{unkorr.}}^2(l) + u_{\text{kor.}}^2(l)} \quad (3.67)$$

$u_1(l)$	Frequenzstabilität der He-Ne-Laser
$u_2(l)$	Abweichungen der analogen Interferenzsignale
$u_3(l)$	Demodulationsabweichungen der Interferenzsignale
$u_4(l)$	Referenzkoordinatensystem der Messspiegelecke
$u_5(l)$	Brechzahl der Luft
$u_6(l)$	Thermische Ausdehnung der Messanordnung
$u_7(l)$	Winkelabweichungen

Tabelle 3.7: Einflussgrößen auf die Positionierunsicherheit

Beitrag	Standardmessunsicherheit					
	x-Achse		y-Achse		z-Achse	
	$l_x = 0$	$l_x = 25 \text{ mm}$	$l_y = 0$	$l_y = 25 \text{ mm}$	$l_z = 0$	$l_z = 5 \text{ mm}$
$u_1(l)$	1,39 nm	1,78 nm	1,39 nm	1,78 nm	2,89 nm	2,96 nm
$u_2(l)$	1,66 nm					
$u_3(l)$	0,06 nm					
$u_4(l)$	6,91 nm		7,29 nm		8,49 nm	
$u_5(l)$	2,67 nm	5,08 nm	2,67 nm	5,08 nm	7,36 nm	7,59 nm
$u_6(l)$	56,50 nm	55,20 nm	56,50 nm	55,20 nm	57,82 nm	
$u_7(l)$	1,27 nm		1,27 nm		0,03 nm	
$u_c(l)$	57,04 nm	55,93 nm	57,09 nm	55,98 nm	59,00 nm	59,03 nm

Tabelle 3.8: Kombinierte Positionierungsunsicherheit $u_c(l)$ für Langzeitmessungen mit dem bisherigen Aufbau, getrennt nach Messachsen

Beitrag	Standardmessunsicherheit				
	$l = 1 \text{ mm}$	$l = 10 \text{ mm}$	$l = 20 \text{ mm}$	$l = 30 \text{ mm}$	$l = 35,7 \text{ mm}$
$u_1(l)$	1,44 nm	1,53 nm	1,63 nm	1,74 nm	1,81 nm
$u_2(l)$	1,66 nm				
$u_3(l)$	0,06 nm				
$u_4(l)$	7,13 nm				
$u_5(l)$	4,80 nm	5,30 nm	6,08 nm	7,00 nm	7,58 nm
$u_6(l)$	87,16 nm	86,70 nm	86,19 nm	85,68 nm	85,39 nm
$u_7(l)$	1,77 nm				1,78 nm
$u_c(l)$	87,63 nm	87,20 nm	86,75 nm	86,31 nm	86,07 nm

Tabelle 3.9: Kombinierte Positionierungsunsicherheit $u_c(l)$ für Langzeitmessungen mit dem bisherigen Aufbau, entlang der Diagonalen durch den gesamten dreidimensionalen Messbereich

Die Analyse des aktualisierten Budgets zeigt deutlich, dass die thermische Ausdehnung den mit Abstand größten Anteil zur Positionierungsunsicherheit beiträgt. Dies ist neben der Materialwahl für Referenzarm und Grundplatte der Interferometer (vgl. Abb. 3.4, S. 22) durch die begrenzte Temperaturkonstanz in der Messkammer bedingt. Tabelle 3.10 enthält eine Zusammenstellung der ableitbaren Maßnahmen zur Reduzierung der Positionierungsunsicherheit.

$u(l)$	Bezeichnung	Maßnahmen
$u_1(l)$	Frequenzstabilität der He-Ne-Laser	konstruktive Verkürzung der Totstrecken der Interferometer
$u_2(l)$	Abweichungen der analogen Interferenzsignale	Reduzierung der Amplituden-, Offset- und Phasenabweichungen der Signale durch verbesserte Justierung
$u_3(l)$	Demodulationsabweichungen der Interferenzsignale	momentan keine Verbesserung erreichbar
$u_4(l)$	Referenzkoordinatensystem der Messspiegelecke	Verringerung der Oberflächendeformationen beim Einbau durch konstruktive Umgestaltung und verbesserte Lagerung der Spiegelecke
$u_5(l)$	Brechzahl der Luft	konstruktive Verkürzung der Totstrecken der Interferometer und bessere Stabilisierung und Bestimmung der Umweltbedingungen
$u_6(l)$	Thermische Ausdehnung der Messanordnung	konstruktive Umgestaltung der Interferometer unter Verwendung ausdehnungsärmerer Materialien für Referenzarm und Grundplatte (vgl. Abb. 3.4, S. 22) und verbesserte Temperaturstabilisierung
$u_7(l)$	Winkelabweichungen	Verringerung der Messunsicherheit der Winkelmessung

Tabelle 3.10: Maßnahmen zur Reduzierung der Positionierungsunsicherheit

In den folgenden Kapiteln werden die genannten Maßnahmen zur Reduzierung der Positionierungsunsicherheit ausführlicher beschrieben. Zunächst erfolgt die Verbesserung der Spiegelecke, dann der Planspiegelinterferometer und Winkelsensoren. Am Ende werden Maßnahmen zur weiteren Reduzierung des Temperatureinflusses behandelt. Dazu werden eine Gewichtskraftkompensation zur Entlastung der vertikalen Antriebssysteme und die verbesserte Klimatisierung des Messaufbaus vorgestellt.

4 Beiträge zur Reduzierung der Positionierunsicherheit

4.1 Spiegelecke

Abb. 4.1 zeigt die bisherige Spiegelecke der NPM-Maschine aus Quarzglas SQ1 [70]. Durch die relativ feste und statisch überbestimmte Einspannung an den vier Ecken des z-Spiegels kann es zu mechanischen Spannungen kommen. Da die Seitenspiegel lediglich angesprengt sind, können sie sich durch mechanische Impulse lösen.

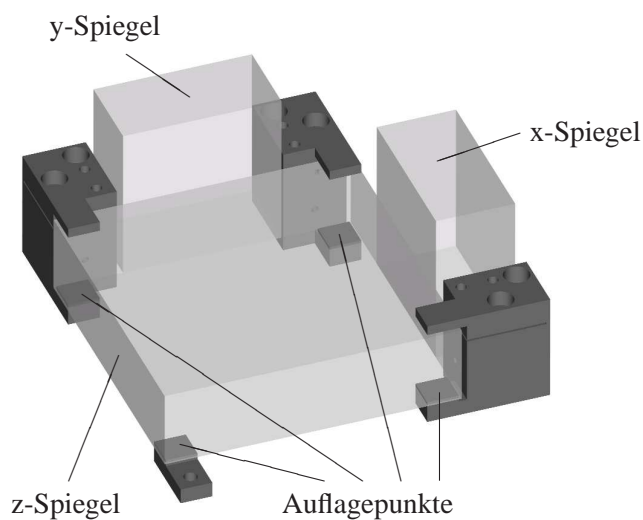
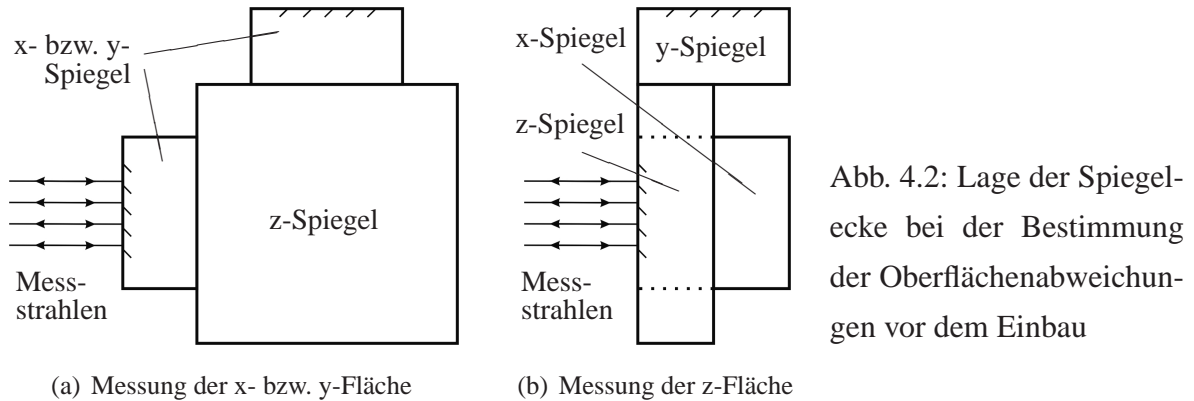


Abb. 4.1: Befestigung der Spiegelecke in der NPM-Maschine

Die Bestimmung der Oberflächenabweichungen der Messflächen der Spiegelecke beim Hersteller erfolgt in einer vom Einbauzustand (vgl. Abb. 4.1) abweichenden Lage (vgl. Abb. 4.2). Zur Abschätzung der daraus resultierenden Abweichungen, welche direkt in die Messergebnisse eingehen, wurden im Rahmen der Arbeit FEM-Berechnungen durchgeführt. Die Winkelabweichungen zwischen den einzelnen Messflächen sind danach kleiner als $0,03''$ und damit kaum signifikant. Die resultierenden maximalen Verformungen der einzelnen Spiegelflächen betragen ca. $0,5 \text{ nm}$ für die z-Fläche und ca. $0,05 \text{ nm}$ für die x- und y-Fläche. Die

RMS-Werte der Oberflächenänderungen liegen unterhalb von 0,1 nm für die z-Fläche bzw. 0,01 nm für die x- und y-Fläche und sind ebenfalls kaum signifikant [52].



Zur Bestimmung der resultierenden Oberflächengestalt im eingebauten Zustand werden im Kapitel 4.1.3 (S. 38 ff.) ein Messaufbau zur „in situ“ Kalibrierung und erste Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Die beschriebenen Abweichungen wurden zusätzlich durch den Einsatz einer neu entwickelten Spiegelecke und deren Lagerung minimiert. Diese wird im nächsten Kapitel näher beschrieben.

4.1.1 Konstruktive Veränderung der Spiegelecke

Abb. 4.3 zeigt die neu konstruierte Spiegelecke der NPM-Maschine. Im Vergleich zum bisherigen Aufbau besteht sie aus nur einem Körper und wurde aus Zerodur gefertigt. Dadurch konnte die mechanische und thermische Stabilität erhöht werden.

Die Rückseiten der Spiegelflächen sind jedoch durch die monolithische Bauweise nicht mehr für einen Polierprozess zugänglich. Dadurch geht die für die Einstellung des Strahlenschnittpunktes der Interferometer benötigte optische Teiltransparenz der Spiegelecke verloren. Durch das Aufkleben geschliffener planparalleler Zerodurplättchen (vgl. Abb. 4.3) wird jedoch lokal Transparenz erzeugt.

Etwas weiter vom Rand entfernte Auflagepunkte sorgen für eine Verminderung der Durchbiegung der Spiegelecke bei der Befestigung in der NPM-Maschine. Direkt über diesen Punkten kann nun auch ein Messobjekt befestigt werden, ohne dass die Spiegelecke belastet wird. Für die Zuführung der elektronischen Verbindungen zu einem Temperatursensor zur Bestimmung der Messobjekttemperatur wurde ein kleiner Freiraum am Rand der Spiegelecke geschaffen.

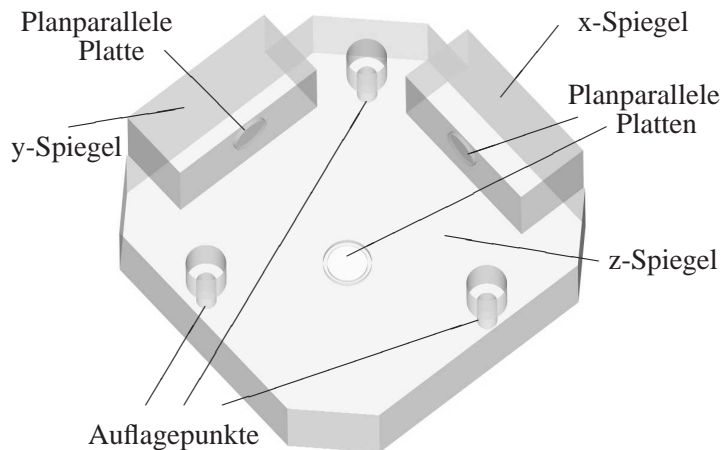


Abb. 4.3: Neue Spiegelecke der NPM-Maschine

Die Bestimmung der Oberflächenabweichungen der neuen Spiegelecke erfolgte ebenfalls durch den Hersteller. Zusammen mit der Standardunsicherheit bei der Approximation durch Korrekturpolynome ergibt sich der Beitrag zur Positionierungsunsicherheit $u_4(l)$ zu 6,44 nm für die x-Achse, 6,40 nm für die y-Achse und 6,55 nm für die z-Achse.

4.1.2 Lagerung der Spiegelecke

Die Lagerung der Spiegelecke erfolgt nun statisch bestimmt an drei Auflagepunkten (vgl. Abb. 4.3). Diese sind symmetrisch um den Schwerpunkt der Spiegelecke angeordnet, um eine gleichmäßige Lastverteilung zu erreichen. Die Verbindung zum darunter befindlichen z-Tisch erfolgt mit drei V-Nut-Kugel-Paarungen (vgl. Abb. 4.4). Durch die Orientierung der V-Nuten können die Verdrehsicherung um die Vertikale und die Zwangsfreiheit bei Temperaturänderungen gewährleistet werden.

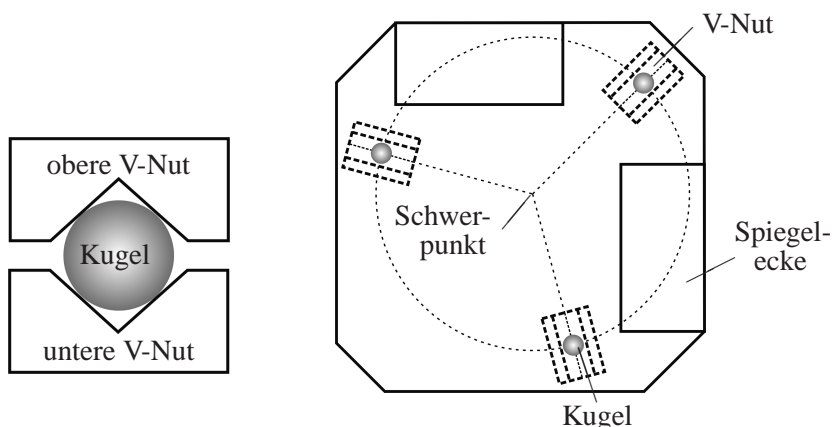


Abb. 4.4: Lagerung der Spiegelecke mit Hilfe von drei V-Nut-Kugel-Paarungen

(a) Einzelne V-Nut-Kugel-Paarungen (Seitenansicht)

(b) Symmetrische 120°-Anordnung der V-Nut-Kugel-Paarungen um den Schwerpunkt (Draufsicht)

4.1.3 Bestimmung der Spiegeleckttopographie mit einem Kalibrierinterferometer

Um die Oberflächenverformungen der Spiegelecke durch die veränderte Lage und Befestigung in der Einbauposition (vgl. Abb. 4.1, S. 35) im Vergleich zum Aufbau bei der Bestimmung der Oberflächenabweichungen durch den Hersteller (vgl. Abb. 4.2, S. 36) zu ermitteln, wurde ein neuartiger Messaufbau entwickelt (vgl. Abb. 4.5). Als Antastsystem wurde dazu ein weiteres Planspiegelinterferometer, wie in der NPM-Maschine verwendet, eingesetzt. Der Messkopf (vgl. Abb. 4.5, Nr. 3) wurde jedoch aus Invar gefertigt und von der optischen Auswerteeinheit (vgl. Abb. 4.5, Nr. 4) getrennt. Dieses sogenannte Kalibrierinterferometer zeichnet sich durch Totstreckenfreiheit, extrem kurze Messstrahl- und somit auch Referenzstrahllänge, kompakten Aufbau hoher Steifigkeit und mechanische sowie thermische Stabilität aus. Der Messaufbau lässt sich durch Einbringen eines Umlenkspiegels (vgl. Abb. 4.5, Nr. 6) in den Strahlengang des Kalibrierinterferometers auch für die Messung der Seitenspiegel umrüsten. Die elektronische Auswertung erfolgt analog zu der in der NPM-Maschine.

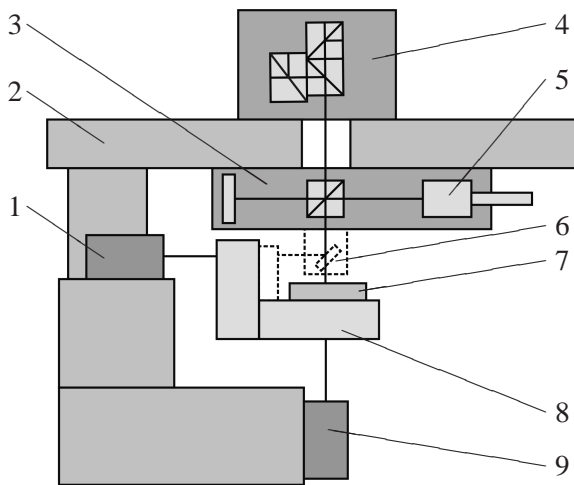


Abb. 4.5: Aufbau zur Oberflächenbestimmung mit dem Kalibrierinterferometer: 1 y-Interferometer, 2 Metrologierahmen, 3 Kalibrierinterferometer (Messkopf), 4 Kalibrierinterferometer (optische Auswerteeinheit), 5 LWL-Einkopplung, 6 Umlenkspiegel, 7 Messspiegel, 8 Spiegelecke, 9 z-Interferometer

Der Strahlteiler des Kalibrierinterferometers wurde modifiziert und besteht nun aus zwei unterschiedlich hohen Prismen, zwischen denen sich die optische Teilerschicht befindet. Dadurch ist die Anlage an der verlängerten Prismenseite möglich (vgl. Abb. 4.6) und die thermisch bedingte Ausdehnung des Strahlteilers beeinflusst die Messung nicht.

Als Messobjekt dient ein hochebener, planparalleler Spiegel, dessen Oberfläche mit einem Phasenschiebeinterferometer bestimmt wurde [110]. Dieser wird auf der Spiegelecke befestigt (vgl. Abb. 4.5, Nr. 7). Zuvor wird die Messachse des Kalibrierinterferometers auf das z-Interferometer der NPM-Maschine ausgerichtet, um Abweichungen erster und zweiter

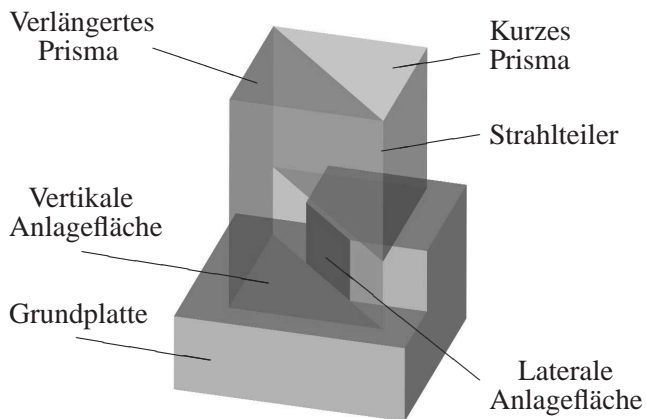


Abb. 4.6: Strahlteilerbefestigung beim Kalibrierinterferometer: Die Anlage erfolgt nur am verlängerten Prisma.

Ordnung zu minimieren (vgl. Abb. 4.7). Dies ist möglich, da ein Teil der Interferometerstrahlen die nicht zu 100 % verspiegelten Messflächen der Spiegelecke passieren kann. Diese Strahlen können gemeinsam mit dem an der gleichen Messfläche reflektierten Messstrahl des Kalibrierinterferometers beobachtet werden (vgl. Abb. 4.7).

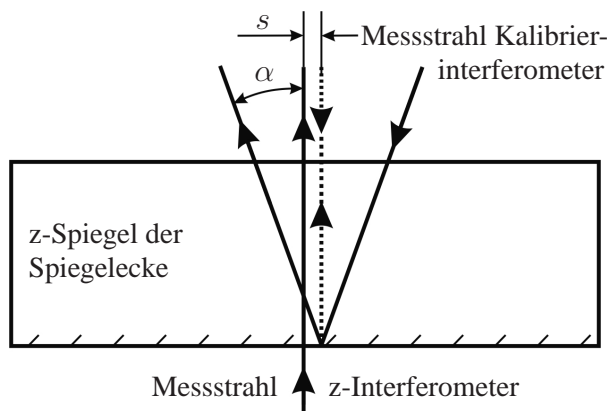


Abb. 4.7: Strahlverlauf bei der Justierung der Messrichtung des Kalibrierinterferometers: Zuerst wird α mit Hilfe eines Fluchtfernrohres und dann der verbleibende Strahlabstand s minimiert.

Aus der Bestimmung des Abstandes zwischen der Oberseite des aufgelegten Referenzspiegels und der Unterseite der Spiegelecke in Form eines rasterförmigen Scans über den gesamten lateralen Messbereich lassen sich die Formabweichungen der Spiegeleckenflächen ermitteln und mit den Herstellerdaten vergleichen. Zur Unterdrückung von Drifterscheinungen durch Temperaturschwankungen wird jede Scanlinie direkt nacheinander vorwärts und rückwärts durchfahren und nach Abschluss der kompletten Messung die Scanrichtung um 90° gedreht und das Verfahren wiederholt.

Für die bisherige Spiegelecke konnte eine Standardabweichung der z-Fläche (RMS-Wert) im Vergleich zu den Herstellerdaten zwischen 5 nm und 6 nm nachgewiesen werden. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens betrug 4 nm bis 5 nm [9]. Die gleiche Messung wurde mit der neuen Spiegelecke wiederholt. Es lagen allerdings günstigere Messbedingungen vor, da

der Messspiegel genauer bekannt war. Außerdem konnte die Temperaturstabilität während der Messung erhöht werden. Die Standardabweichung der z-Fläche betrug dann ca. 2,2 nm. Die Reproduzierbarkeit konnte auf < 2 nm verbessert werden [66].

Die erzielten Ergebnisse demonstrieren die prinzipielle Eignung des Verfahrens und die Verbesserung durch den Einsatz der neuen Spiegelecke. Die verbleibenden Abweichungen sind, neben der Verformung der Spiegeleckenflächen, der ungenügend genau bekannten Oberfläche des Messspiegels (vgl. Abb. 4.5, Nr. 7) sowie den Temperaturschwankungen während der Messung zuzuordnen.

4.2 Planspiegelinterferometer

4.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Zur Bestimmung der Position der Spiegelecke wurden bisher die Planspiegelinterferometer SP-500 der Firma SIOS Messtechnik GmbH verwendet [88] (vgl. Abb. 4.8), die in Kooperation mit dem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau entwickelt wurden.

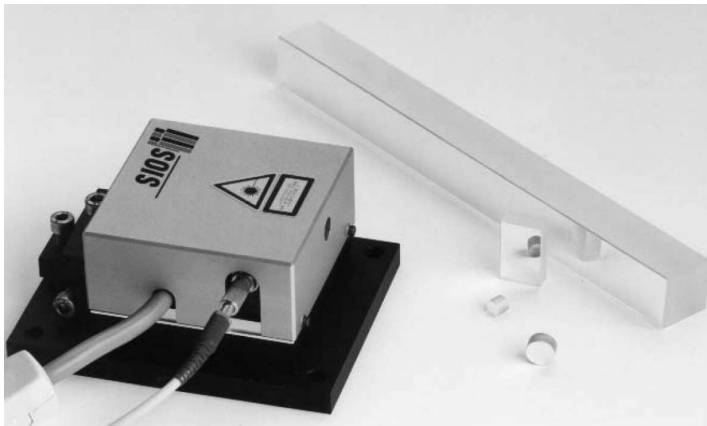


Abb. 4.8: Bisheriges Interferometer mit Planspiegelreflektor

Der Aufbau dieses homodynen Michelsoninterferometers ist in Abb. 4.9 dargestellt. Das über einen Lichtwellenleiter eingekoppelte Licht des frequenzstabilisierten Lasers wird durch einen polarisationsoptischen Strahlteiler in den Mess- und den Referenzarm aufgeteilt. Nach der Reflexion am Mess- bzw. Referenzspiegel durchlaufen die Teilstrahlen diesen Strahlteiler erneut und interferieren nach einer $\lambda/4$ -Platte. Der Durchmesser der nachfolgenden Blende, welcher die zulässigen Verkippungen des Messspiegels bestimmt [3], wurde bereits etwas verkleinert, um größere Verkippungen zuzulassen [35]. Die nachfolgende Kombination aus optischen und elektronischen Bauteilen dient der Auswertung der Interferenzsignale und er-

zeugt bei Messbewegungen vier sinusförmige, um jeweils 90° verschobene Messsignale. Die optische Anordnung wurde bereits verbessert, um die Verminderung der zur Verfügung stehenden Lichtleistung zu kompensieren, die aufgrund der kleineren Blende auftrat [35]. Durch Differenzbildung der komplementären Signale entstehen die Quadratursignale U_A und U_B [28] (vgl. Kap. 3.2, S. 16 ff.).

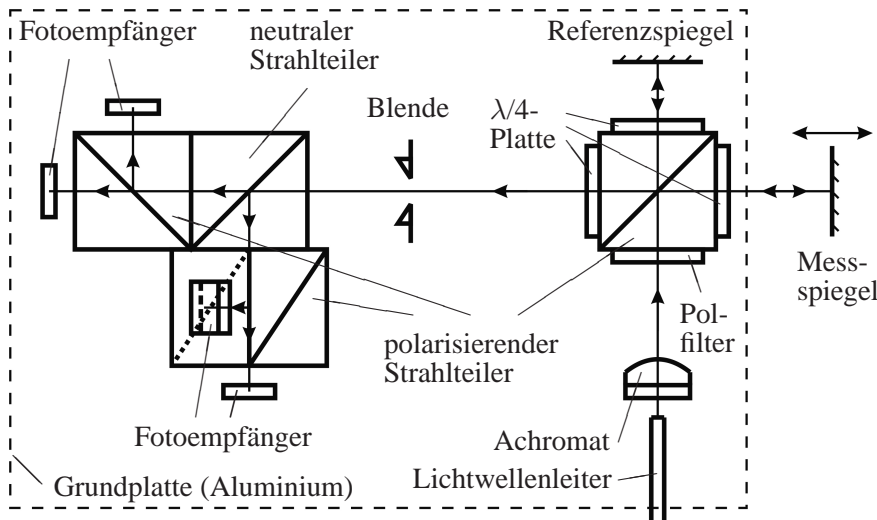


Abb. 4.9: Prinzip der Planspiegelinterferometer (Draufsicht auf den Messkopf)

Alle Komponenten des Messkopfes (vgl. Abb. 4.9) sind auf einer gemeinsamen Grundplatte aus Aluminium befestigt. Der Abstand zwischen Strahlteiler und Referenzspiegel wird durch die hohe, thermisch bedingte Ausdehnung dieser Grundplatte ($\alpha = 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) beeinflusst. Im nächsten Kapitel wird ein verbesserter Aufbau beschrieben, bei dem die Grundplatte aus dem ausdehnungsarmen Werkstoff Invar ($\alpha = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [31]) gefertigt ist.

Die thermische Ausdehnung des Referenzspiegels und des zur rückseitigen Befestigung verwendeten Klebers beeinflussen die Messunsicherheit ebenfalls negativ (vgl. Abb. 4.10). Um beide Einflüsse zu vermeiden, wird der Referenzspiegel im neuen Aufbau vorderseitig geklemmt. Das Justiergelenk des Referenzspiegels wurde bisher als schwingungsfähiges System konstruiert, um eine für die Signalregelung förderliche Anregung des Referenzspiegels zu ermöglichen [88]. Diese Schwingungen sind in der NPM-Maschine jedoch nicht erwünscht, da sie im Frequenzbereich der Positionsregelung liegen. Dies wird im neuen Aufbau durch einen mechanisch stabilen Referenzarm verhindert, der zur Verringerung der thermischen Längendehnung ebenfalls aus Invar gefertigt wird. Die Länge wurde unter Berücksichtigung des Einflusses der Totstrecke angepasst.

Durch den geringen Abstand zwischen Strahlteiler und Referenzspiegel entsteht eine recht große Totstrecke (37 mm für die x- und y-Achse und 102 mm für die z-Achse) beim Einsatz

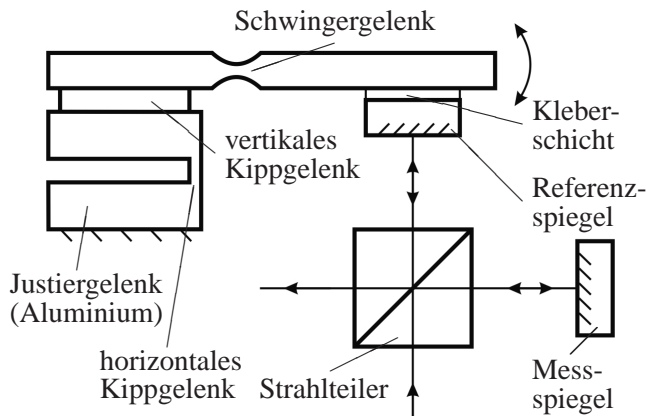


Abb. 4.10: Bisherige Befestigung des Referenzspiegels (Draufsicht)

der Interferometer in der NPM-Maschine. Durch Verlängerung der Referenzarme wird die daraus resultierende Unsicherheit der interferometrischen Längenmessung bei der Korrektur der Brechzahl der Luft (vgl. Kap. 3.4, S. 18 ff.) und durch die begrenzte Frequenzstabilisierung der He-Ne-Laser (vgl. Kap. 3.1, S. 14 ff.) verringert. Voraussetzung ist jedoch eine möglichst homogene Verteilung der Brechzahl entlang der Mess- und Referenzstrahlen. Die dazu notwendige gleichmäßige Temperaturverteilung wird durch Verminderung der in das System eingetragenen Wärmeenergie (vgl. Kap. 4.4, S. 63 ff.) und durch die effiziente Abführung der entstandenen Wärme (vgl. Kap. 4.5, S. 69 ff.) erreicht.

Die Befestigung des Strahlteilers erfolgt durch Kleben der Grundfläche auf einen Glasring, um mechanische Spannungen zu verringern (vgl. Abb. 4.11). Klebeverbindungen unterliegen jedoch zumeist enormen Drifterscheinungen. Im neuen Aufbau werden diese durch die seitliche Anlage des Strahlteilers deutlich reduziert.

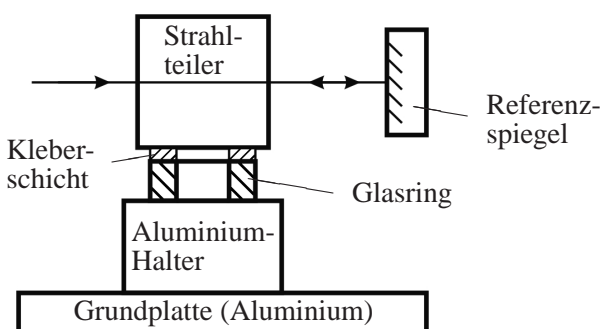


Abb. 4.11: Bisherige Befestigung des Strahlteilers

Aus der Analyse des Aufbaus der bisherigen Interferometer wurden mehrere Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet, die zur konstruktiven Überarbeitung des mechanischen Aufbaus geführt haben. Die Veränderungen sollen im nächsten Kapitel detaillierter beschrieben werden. Zusätzlich wurden die verbleibenden Abweichungen der analogen Interferenzsignale

verkleinert. Aus beiden Maßnahmen resultieren verbesserte messtechnische Eigenschaften, die im Kapitel 4.2.3 untersucht werden.

4.2.2 Konstruktive Veränderungen

Abb. 4.12 zeigt das veränderte Interferometer. Der prinzipielle Aufbau blieb gleich (vgl. Abb. 4.9, S. 41), die Befestigung des Referenzspiegels und des Strahlteilers wurden verbessert.

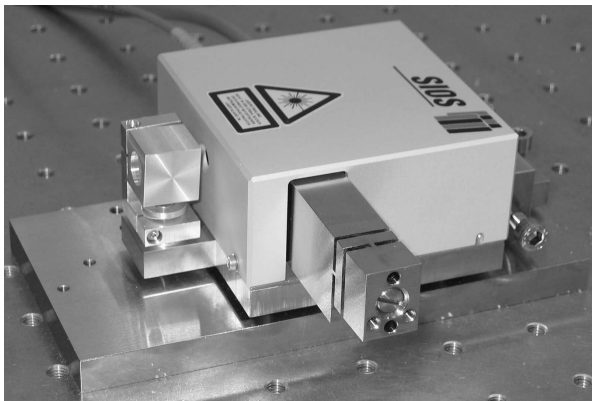


Abb. 4.12: Verbessertes Interferometer für die NPM-Maschine: Der verlängerte Referenzarm mit dem Justiergelenk für den Referenzspiegel ragt aus dem Gehäuse seitlich heraus.

Die Grundplatte und der verlängerte Referenzarm wurden aus dem ausdehnungsarmen Werkstoff Invar [31] gefertigt. Dessen Wärmeleitfähigkeit ist jedoch deutlich geringer als bei Aluminium. Der Vorteil eines schnellen Wärmeausgleiches ist dadurch zunächst nicht mehr vorhanden. Dieser wird in symmetrischen Interferometeraufbauten [41, 42, 43] oftmals ausgenutzt, um die kompensierende Wirkung gegenläufiger thermischer Ausdehnungen zu nutzen. Solch ein Kompensationsmechanismus ist im vorliegenden Fall jedoch nicht vorhanden. Um das notwendige thermische Gleichgewicht schneller zu erreichen, wird der Wärmeausgleich begünstigt, indem für den Referenzarm ein hoher Materialquerschnitt verwendet wird (vgl. Abb. 4.13, S. 44 und Abb. 4.15, S. 45). Dadurch wird zusätzlich die mechanische Stabilität zwischen Strahlteiler und Referenzspiegel erhöht.

Die thermische stabile Befestigung des Referenzspiegels erfolgt nun durch vorderseitige Klemmung (vgl. Abb. 4.13). Dabei wurde berücksichtigt, dass der generelle Aufbau von Funktions- und Verbindungsstellen so gewählt werden sollte, dass symmetrische Verhältnisse bei Temperaturänderungen vorliegen. Die Stabilität von Kontaktflächen, deren Normalen senkrecht zur Mess- bzw. Referenzstrahlrichtung angeordnet sind, ist von den Gleitreibungseigenschaften, Klemmkraften und Ausdehnungskoeffizienten der gepaarten Materialien abhängig (vgl. Abb. 4.14(a)). Erfolgt der Kontakt aber in Messrichtung, so ist nur zu gewährleisten, dass die Andruckkräfte stets groß genug sind, um für eine feste Anlage zu sorgen (vgl.

Abb. 4.14(b)). Die Verlagerung der gepaarten Teile in Messrichtung kann dann ausschließlich über die Längendehnung der beteiligten Materialien beschrieben werden. Dieses Prinzip wird auch bei der neuen Befestigung des Strahlteilers umgesetzt (vgl. Abb. 4.15, S. 45).

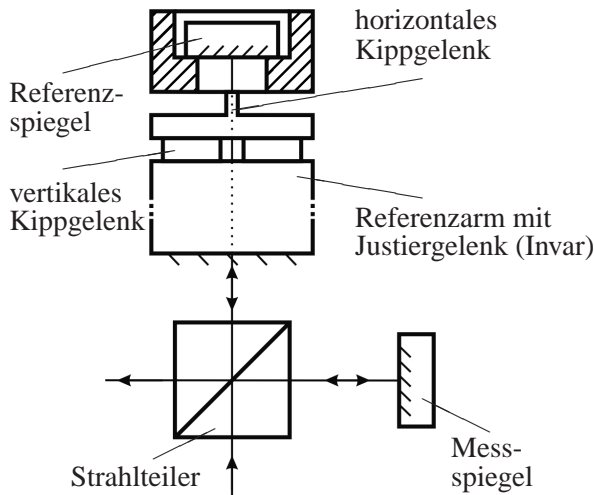


Abb. 4.13: Neue Befestigung des Referenzspiegels (Draufsicht)

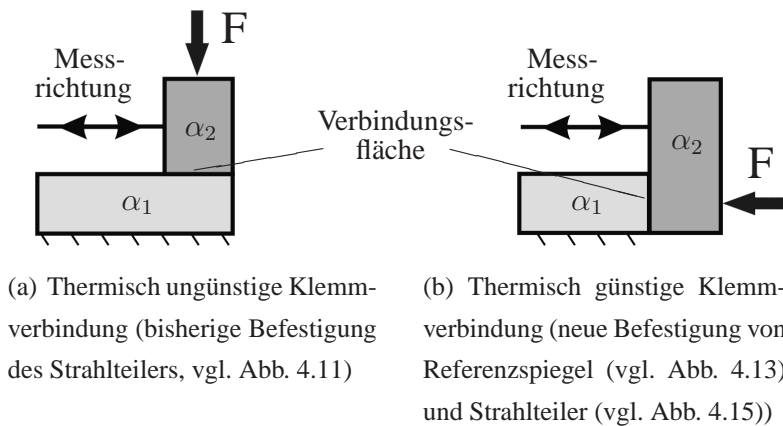


Abb. 4.14: Ausführung der Klemmverbindung zwischen Materialien unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten α_1 und α_2

(a) Thermisch ungünstige Klemmverbindung (bisherige Befestigung des Strahlteilers, vgl. Abb. 4.11)

(b) Thermisch günstige Klemmverbindung (neue Befestigung von Referenzspiegel (vgl. Abb. 4.13) und Strahlteiler (vgl. Abb. 4.15))

Die Verlängerung der Referenzarme zur Minimierung der Messunsicherheit bei der Korrektur der Brechzahl der Luft (vgl. Gl. 3.23, S. 21) und durch die begrenzte Frequenzstabilisierung der He-Ne-Laser (vgl. Gl. 3.6 und Abb. 3.2, S. 15) ist nur für die x- und y-Achse vollständig möglich. Dazu sind Mess- und Referenzarm in der Mitte des Messbereiches gleich lang. Für das z-Interferometer war dies aus baulichen Gründen nur bedingt möglich. Die Totstrecken betragen damit –12,5 mm für die x- und y-Achse und 19 mm für die z-Achse.

In Abbildung 4.15 ist die verbesserte, thermisch stabilere Befestigung des Strahlteilers durch seitliche Anlage am Referenzarm dargestellt. Die Verbindung des Referenzarmes zur

Grundplatte und damit zum metrologischen Rahmen (vgl. Abb. 3.5, S. 23) erfolgt mittig unter dem Strahlteiler, um thermisch symmetrische Verhältnisse zu erreichen.

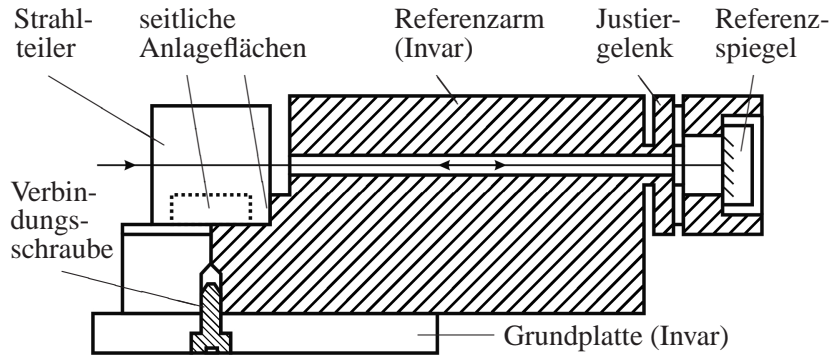


Abb. 4.15: Neue, thermisch stabilere Befestigung des Strahlteilers durch seitliche Anlage an den Referenzarm

Die seitliche Anlage müsste an beiden Prismen des Strahlteilers erfolgen, damit durch dessen Ausdehnung aufgrund von Temperaturänderungen keine Verlagerung der Teilerschicht in Mess- oder Referenzstrahlrichtung auftreten kann (vgl. Abb. 4.16(a)). Die zur Befestigung notwendigen Klemmkräfte führen jedoch zu mechanischen Spannungen in der Teilerschicht, wodurch die funktionsrelevanten Polarisations-eigenschaften negativ beeinflusst werden. Dies kann praktisch an der Deformation der Interferenzsignale gezeigt werden [71].

Die Anlage erfolgt daher an den beiden Außenseiten desselben Prismas (vgl. Abb. 4.16(b)). Dadurch verbleibt eine Temperaturabhängigkeit der Position der Teilerschicht des Strahlteilers aus dem Glas BK7 bezüglich der Verbindung zur Grundplatte (vgl. Abb. 4.15) von -54 nm/K . Zur sicheren Befestigung sind neben horizontalen auch senkrechte Klemmkräfte notwendig. Durch die gezielte Einstellung beider Kräfte ist die mechanische Belastung auf die Teilerschicht kontrollierbar.

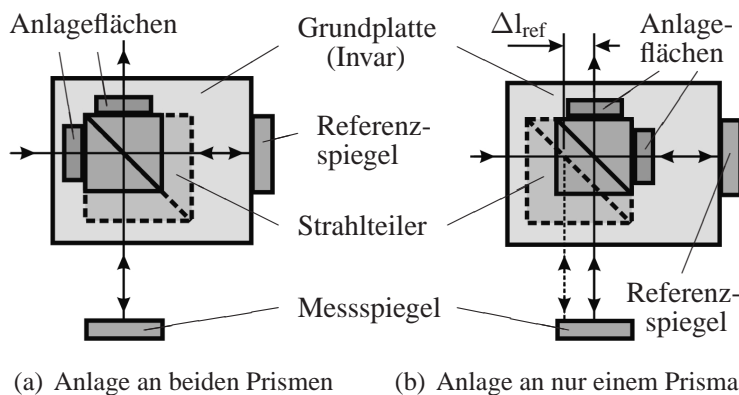


Abb. 4.16: Seitliche Anlage des Strahlteilers: Bei Anlage an nur einem Prisma verlängert sich der Referenzarm durch die thermische Ausdehnung des Strahlteilers um die Strecke Δl_{ref}

4.2.3 Eigenschaften und Messunsicherheit

Die beschriebenen konstruktiven Veränderungen führen zur Verringerung mehrerer Beiträge zur kombinierten Positionierunsicherheit $u_c(l)$. Durch die Anpassung der Totstrecken verringern sich die Beiträge $u_1(l)$ aufgrund der begrenzten Laserfrequenzstabilisierung (vgl. Tab. 4.1) und $u_5(l)$ durch die Unsicherheit bei der Luftbrechzahlbestimmung.

x- und y-Achse	z-Achse
$u_1(l_{xy}) = 0,01 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 0$	$u_1(l_z) = 0,27 \text{ nm}$ für $l_z = 0$
$u_1(l_{xy}) = 0,12 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 12,5 \text{ mm}$	$u_1(l_z) = 0,29 \text{ nm}$ für $l_z = 2,5 \text{ mm}$
$u_1(l_{xy}) = 0,25 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 25 \text{ mm}$	$u_1(l_z) = 0,31 \text{ nm}$ für $l_z = 5 \text{ mm}$

Tabelle 4.1: Verringerte Messunsicherheit bei der interferometrischen Längenmessung aufgrund der begrenzten Laserfrequenzstabilisierung

$u_5(l)$ wird jedoch noch durch die genauere Bestimmung der Einflussgrößen Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte verkleinert (vgl. Tab. 4.2), wodurch nun die Unsicherheit der Luftbrechzahlbestimmung $u(n) = 1,282 \cdot 10^{-7}$ beträgt (vgl. Gl. 3.14, S. 19). Voraussetzung ist aber, dass die ermittelte Brechzahl der mittleren Brechzahl entlang des Mess- und Referenzstrahles entspricht. Dazu sollte eine möglichst gleichmäßige, räumliche Brechzahlverteilung vorliegen.

Die Verwendung von Refraktometern oder Wellenlängen-Verfolgern (*Wavelength-Tracker*) würde direkt die mittlere Brechzahl liefern. Die erreichbaren Unsicherheiten liegen für Messungen mit Refraktometern bei $3 \cdot 10^{-9}$ [73, 94, 15] und mit *Wavelength-Trackern* bei $1,0 \cdot 10^{-7}$ [93, 36]. Für die dazu notwendige Anordnung nahe der Mess- und Referenzstrahlen des Interferometers ist in der NPM-Maschine jedoch kein Platz vorhanden. Auch die Bestimmung durch akustische Methoden [58] ist möglich. Sie erlauben eine verlässliche Bestimmung der Luftbrechzahl aber erst über Messentfernungen von mehr als einem Meter, da es sonst zu Abweichungen durch nichtlineare akustische Wellenanteile und Echos kommt [57].

Die Entlastung der vertikalen Antriebssysteme durch eine verbesserte Gewichtskraftkompensation (vgl. Kap. 4.4, S. 63 ff.) führt zur Verminderung der in das System eingebrachten Wärme und zusammen mit der verbesserten Klimatisierung der Messkammer (vgl. Kap. 4.5, S. 69 ff.) zur Reduzierung der Temperaturschwankungen auf $u(\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}) < 8 \text{ mK}$. Dadurch wird eine gleichmäßigere Verteilung der Temperatur, und damit auch der Luftbrechzahl, er-

Temperatur ϑ	
Beitrag	$u_i(\vartheta)$
Digitalmultimeter [2]	10,4 mK
PTB-kalibriertes PT1000 Vergleichsnorm	3 mK
Temperaturabweichung des Wasserbades bei der Kalibrierung	5,8 mK
Approximation der Kalibrierdaten	10 mK
kombinierte Messunsicherheit $u_c(\vartheta)$	15,8 mK
Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$	
kombinierte Messunsicherheit $u_c(\Delta\vartheta)$ aus gemessener Streuung bei konstanter Temperatur	2 mK
Luftdruck p	
kombinierte Messunsicherheit $u_c(p)$ RPT 200 durch Kalibrierung beim Hersteller [27]	2,9 Pa
Luftdruckdifferenz Δp	
kombinierte Messunsicherheit $u_c(\Delta p)$ aus gemessener Streuung bei konstantem Druck	0,9 Pa
Luftfeuchte p_w	
kombinierte Messunsicherheit $u_c(p_w)$ HIH-3602-A laut Hersteller [63]	15,6 Pa
Luftfeuchtedifferenz Δp_w	
kombinierte Messunsicherheit $u_c(\Delta p_w)$ aus gemessener Streuung bei konstanter Luftfeuchte	0,39 Pa

Tabelle 4.2: Messunsicherheiten bei der Parameterbestimmung der Luftbrechzahl

reicht und die Korrektur der Brechzahl durch die Bestimmung der Einflussgrößen verbessert (vgl. Tab. 4.3).

Der aufgrund der thermischen Ausdehnung entstehende Beitrag $u_6(l)$ wird durch die Verwendung des ausdehnungsärmeren Materials Invar und durch die thermisch stabilere Befestigung von Strahlteiler und Referenzspiegel deutlich verkleinert. Aus den übrigen Teilstrecken der Messkette aus Tabelle 3.4 (S. 24) ergeben sich nur Änderungen durch die neue Spiegellecke. Die Beiträge der Teilstrecken a und l_{xy2} für die x- und y-Achse sowie b und l_{z3} für die z-Achse ändern sich durch die Herstellung der Spiegellecke aus Zerodur und sind somit nicht mehr signifikant. Zusätzlich sorgen die reduzierten Temperaturschwankungen in der Mess-

kammer für eine Verringerung von $u_6(l)$. Tabelle 4.4 zeigt die resultierende Verbesserung für die Positionierunsicherheit durch thermische Dehnung.

x- und y-Achse	z-Achse
$u_5(l_{xy}) = 0,04 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 0$	$u_5(l_z) = 0,06 \text{ nm}$ für $l_z = 0$
$u_5(l_{xy}) = 0,66 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 12,5 \text{ mm}$	$u_5(l_z) = 0,15 \text{ nm}$ für $l_z = 2,5 \text{ mm}$
$u_5(l_{xy}) = 1,32 \text{ nm}$ für $l_{xy} = 25 \text{ mm}$	$u_5(l_z) = 0,27 \text{ nm}$ für $l_z = 5 \text{ mm}$

Tabelle 4.3: Verringerte interferometrische Längenmessunsicherheit durch reduzierte Unsicherheit bei der Luftbrechzahlbestimmung und erhöhte Temperaturstabilität ($u(\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}) = 8 \text{ mK}$)

x- und y-Achse	z-Achse
$u_6(l_{xy}) = 1,14 \text{ nm}$	$u_6(l_z) = 1,82 \text{ nm}$

Tabelle 4.4: Verringerte Positionierunsicherheit durch thermische Ausdehnung der Messkette bei Verwendung ausdehnungsärmerer Materialien für Spiegelecke und Interferometer und erhöhter Temperaturstabilität ($u(\Delta\vartheta_{\text{Stab.}}) = 8 \text{ mK}$)

Zur praktischen Überprüfung der verbesserten messtechnischen Eigenschaften wurden die Temperaturabhängigkeit der bisherigen und der neuen Interferometer und die Linearitätsabweichungen der Demodulationselektronik näher untersucht.

4.2.3.1 Bestimmung der Temperaturabhängigkeit

Die Bestimmung der thermischen Eigenschaften der bisherigen und der neuen Interferometer erfolgte mit Hilfe identischer Versuchsaufbauten. Beide Interferometer wurden gemeinsam in einer Klimakammer Temperaturschwankungen von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgesetzt. Die Interferometerköpfe wurden dabei mit gleichem, definierten Anzugsmoment auf einer Grundplatte aus dem nahezu ausdehnungsfreien Zerodur befestigt (vgl. Abb. 4.17), um die Beeinflussung durch den Messaufbau zu minimieren. Als Reflektoren dienten Zerodurplanspiegel, die direkt auf die Zerodurplatte geklemmt wurden. Der Abstand wurde so gewählt, dass keine Totstrecke vorhanden war. Da zusätzlich nur sehr geringe Messlängen auftraten, wurde der

Temperaturgang nahezu unabhängig von den Unsicherheiten bei der Brechzahlbestimmung ermittelt. Die Ergebnisse zeigen die erwartete, deutliche Verkleinerung der Temperaturabhängigkeit des neuen Aufbaus von ca. -1250 nm/K auf ca. -75 nm/K (vgl. Abb. 4.18).

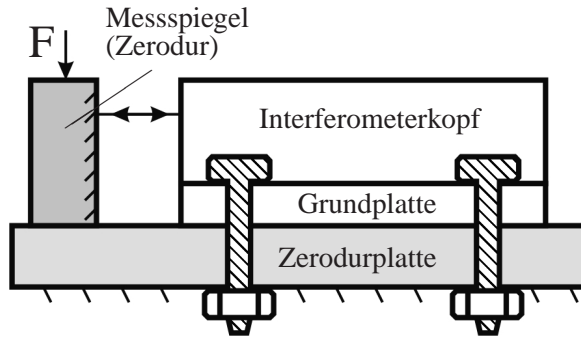


Abb. 4.17: Messaufbau zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit

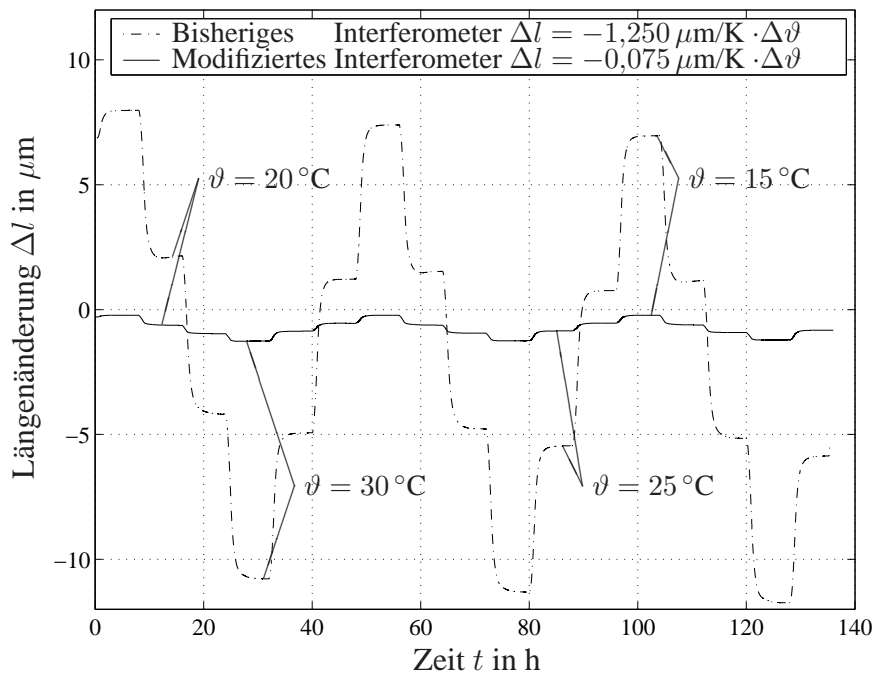


Abb. 4.18: Längenmessabweichungen der Interferometer bei sprungförmigen Temperaturänderungen

Die berechneten Werte liegen jedoch für den bisherigen Aufbau bei ca. -540 nm/K und für den neuen Aufbau bei ca. -162 nm/K . Die Abweichungen im bisherigen Aufbau können mit den ungenügend berücksichtigten bzw. unbekanntem Einflüssen der Kleberschichten begründet werden. Aber auch die Verbindung zur Zerodurplatte (vgl. Abb. 4.17) kann aufgrund des deutlich unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium nicht ausreichend modelliert werden. Im neuen Aufbau ist der Einfluss niedriger, da die Grundplatte aus dem ausdehnungsärmeren Invar gefertigt wurde. Hier kann jedoch der Einfluss der Schrauben zur Referenzspiegeljustierung nicht ausreichend berücksichtigt werden.

4.2.3.2 Verringerung der Nichtlinearitäten der Auswertelektronik

Die Untersuchung der Linearitätsabweichungen der Interferometerelektronik wurde durchgeführt, um die Verbesserungen durch die Reduzierung der Amplituden-, Offset- und Phasenabweichungen der Interferenzsignale zu bestimmen. Die einstellbaren Abweichungen sanken für langsame Bewegungen von ca. $80 \mu\text{m/s}$ für die Amplitude von $<3\%$ auf $<0,7\%$, für den Offset von $<3\%$ auf $<0,25\%$ und für die Phase von $<1,5^\circ$ auf $<0,1^\circ$. Dies führt zur Verkleinerung der Standardmessunsicherheit der interferometrischen Längenmessung durch Abweichungen der analogen Interferenzsignale $u_2(l)$ (vgl. S. 32 f.) von $1,66 \text{ nm}$ auf:

$$u_2(l) = 0,26 \text{ nm} \quad (4.1)$$

Die Verbesserung wurde möglich, da die Signalabweichungen nicht mehr anhand des visuellen Eindruckes auf einem Oszillographen beurteilt werden müssen, sondern mit Hilfe der am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik neu entwickelten Demodulationselektronik direkt bestimmt werden können [34].

Zur Bestimmung der vorhandenen Nichtlinearitäten wurden experimentelle Untersuchungen mit Hilfe der NPM-Maschine und eines neuartigen Messaufbaus durchgeführt (vgl. Abb. 4.19) [82]. Das zu untersuchende Interferometer wird als Antastsystem in die NPM-Maschine integriert. Da die elektronische Auswertung analog zu der in der NPM-Maschine erfolgt, gelten die Ergebnisse auch für deren Interferometer. Als Messobjekt dient ein leicht gekippter Messspiegel mit maximalen Oberflächenabweichungen von $\lambda/20$.

Messbewegungen werden senkrecht zur Kippachse des Messspiegels und auf konstanter Höhe durchgeführt. Abhängig vom Kippwinkel kann dadurch eine starke Untersetzung der

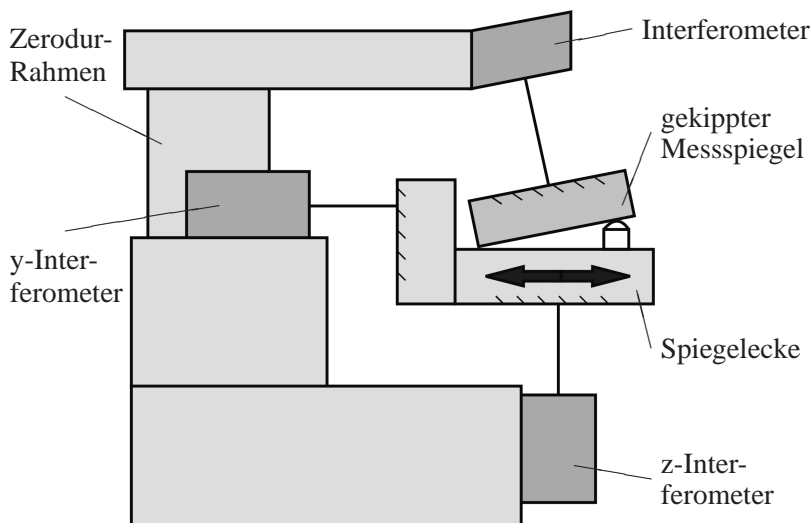


Abb. 4.19: Messaufbau zur Untersuchung der periodischen Nichtlinearitäten

Messlängenänderung zwischen dem zu untersuchenden Interferometer und dem x- oder y-Interferometer der NPM-Maschine von etwa 100 erzeugt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Nichtlinearitäten der NPM-Maschine nur um den Faktor 100 verkleinert in die Beurteilung der Nichtlinearitäten des zu untersuchenden Interferometers eingehen. Der Verfahrensweg beträgt nur ca. 1 mm und befindet sich etwa in der Mitte des Messspiegels. Da dessen Oberflächenabweichungen als etwa parabelförmig angenommen werden können und kurzweilige Anteile durch die integrierende Wirkung des Strahldurchmessers des Interferometers von ca. 0,1 mm gedämpft werden, ergeben sich maximale Abweichungen von 0,1 nm [23]. Somit enthält die Differenz der Messwerte des zu untersuchenden Interferometers und des z-Interferometers idealerweise einen gleichförmigen Anstieg. In den Abweichungen des Messwertverlaufes zu einer Geraden sind die Nichtlinearitäten sehr gut erkennbar. Die praktisch ermittelte Standardmessunsicherheit der interferometrischen Längenmessung aufgrund von Demodulationsabweichungen durch Amplituden-, Offset- und Phasenabweichungen kann mit $<0,3$ nm angegeben werden (vgl. Abb. 4.20). Die darin ebenfalls enthaltenen, unveränderten Rundungsabweichungen durch die A/D-Wandlung und Umsetzung der Arcustangens-Funktion von $u_3(l) = 0,06$ nm sind dagegen vernachlässigbar. Die Messergebnisse stimmen sehr gut mit dem theoretisch berechneten Wert von 0,26 nm überein (vgl. S. 50).

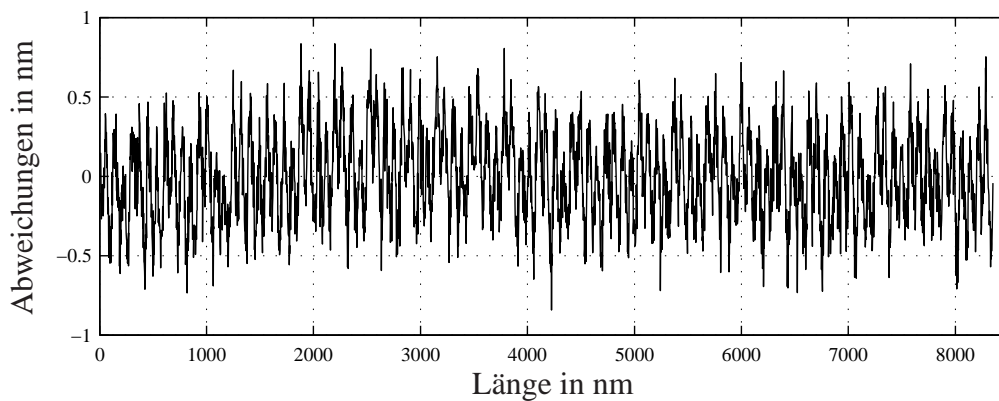


Abb. 4.20: Praktisch bestimmte Nichtlinearitäten der Interferometer bei bestmöglicher Justierung

4.3 Photoelektrisches Autokollimationsfernrohr

Um die Abweichungen erster und zweiter Ordnung durch Verkippungen des Messtisches (vgl. Kap. 3.6, S. 25 ff.) zu vermindern, müssen für die Bestimmung der Winkelabweichungen mit photoelektrischen AKF's besonders hohe Anforderungen an die Messauflösung und die erreichbare Messunsicherheit erfüllen werden. Diese sollen zunächst kurz definiert werden. Anschließend werden der veränderte Aufbau und die Funktionsweise des am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik bereits überarbeiteten AKF's [72] erläutert. An diesem wurden nun Verbesserungen bei der elektronischen Auswertung, Justierung und Kalibrierung erzielt. Danach werden die verbesserten messtechnischen Eigenschaften zusammengefasst.

4.3.1 Anforderungen an das integrierte Winkelmesssystem

Bewegungen des Messtisches zur Korrektur der Winkellage führen immer auch zu einer Veränderung der Position der Spiegelecke in mindestens einer Achse. Liegt im Mittel keine Abweichung von der idealen Winkellage vor, so verbleiben dennoch Regelschwingungen $\Delta\varphi$ des Winkels aufgrund der begrenzten Auflösung α_{\min} der Winkelsensoren. Diese sorgen in der Folge für periodische Abweichungen Δl der Position der Spiegelecke (vgl. Abb. 4.21). Um nicht zu einer Verschlechterung der erreichbaren Positionsschwingungen von $\Delta l \approx 0,3 \text{ nm}$ beizutragen, muss die Winkelmessauflösung $\alpha_{\min} < 0,002''$ sein (vgl. Gl. 4.2). $h \approx 30 \text{ mm}$ ist die baulich bedingte, positionsabhängige Strahlhöhe.

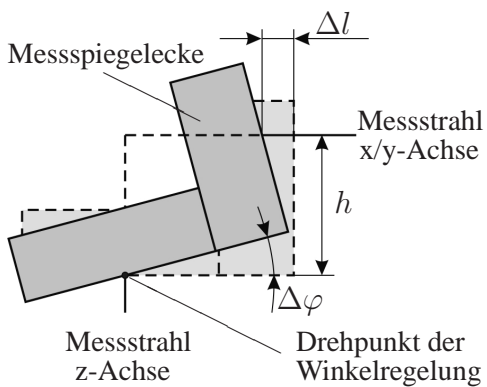


Abb. 4.21: Zusammenhang zwischen Winkel- und Längenabweichungen

$$\alpha_{\min} < \Delta\varphi = \arctan \frac{\Delta l}{h} = 0,002'' \quad (4.2)$$

Eine weitere Anforderung besteht in der recht hohen Messgeschwindigkeit von etwa 6,25 kHz. Auf dieser basiert das gesamte Regelungskonzept der NPM-Maschine [35].

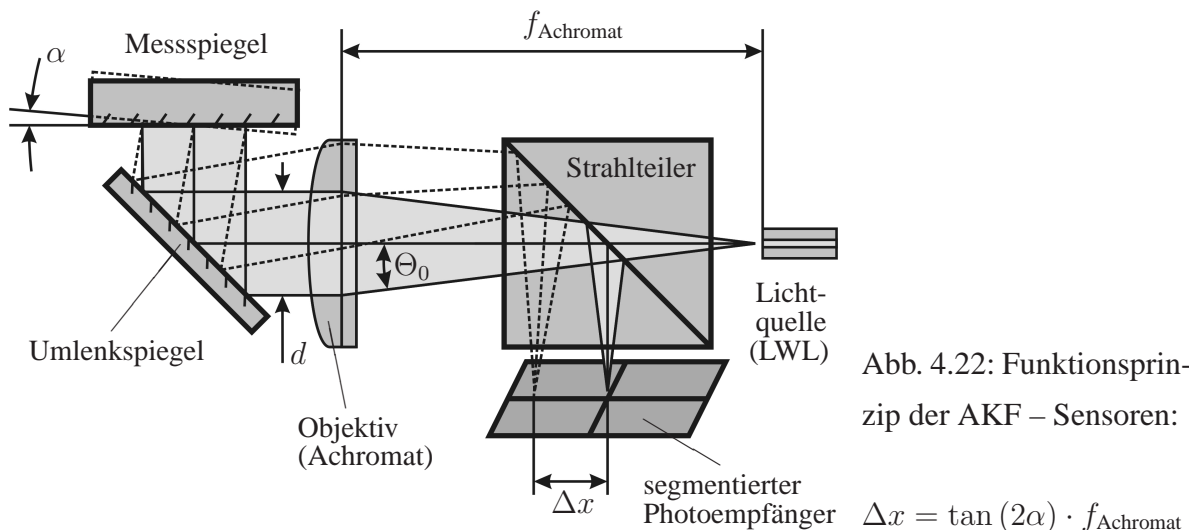
Die Verkippungen um die x- und y-Achse werden ausgeregelt. Die Winkelmessung für diese Achsen muss daher eine hohe Nullpunktstabilität aufweisen. Für Verkippungen um die z-Achse ist zusätzlich eine geringe Messunsicherheit notwendig, um die verbleibenden Winkelabweichungen präzise zu bestimmen und möglicherweise zu korrigieren.

Weitere Forderungen sind die Einhaltung des äußerst begrenzten Bauraumes in der NPM-Maschine und die Entfernungsunabhängigkeit, da der Abstand zur Spiegelecke mit der Messposition variiert.

Aufgrund der begrenzten lateralen Auflösung der eingesetzten CCD-Sensoren erreichen kommerziell verfügbare AKF's die geforderte Auflösung nur mit großen Brennweiten der Linsen von über einem Meter [65]. Für den Einsatz in der NPM-Maschine ist außerdem die Verarbeitungsgeschwindigkeit der CCD's zu gering.

4.3.2 Aufbau und Funktionsweise

Abbildung 4.22 zeigt die Funktionsweise der Winkelsensoren nach dem AKF-Prinzip. Zur Reduzierung chromatischer Abberationen wird als abbildende Linse ein geeigneter Achromat verwendet. Um auch sphärische Abberationen möglichst klein zu halten, ist er in der Brennweite von lediglich 40 mm und in seinem Durchmesser an die numerische Apertur der Lichtquelle angepasst. Im bereits überarbeiteten Aufbau [72] werden zur Beleuchtung jedoch nicht mehr Laserdioden eingesetzt, die direkt im Messkopf integriert sind und Wärmequellen darstellen. Stattdessen wird das Licht durch einen Lichtwellenleiter zugeführt.



Dies hat zusätzlich mehrere Vorteile. Erstens muss das stark divergente, elliptische Strahlprofil der Laserdiode nicht mehr mit Hilfe einer Blende im Messstrahl in ein kreisförmiges

umgewandelt werden [35], wodurch Vignettierung entstand. Dies führte, je nach Ausrichtung des Strahlprofils, zu unterschiedlichen Empfindlichkeiten mit Abweichungen von bis zu 10 % [80] sowie deutlich erhöhten Kennliniennichtlinearitäten. Zweitens ist eine deutlich bessere Anpassung der abgebildeten LWL-Austrittsfläche an die Größe des zweidimensional positionsempfindlichen, photoelektrischen Empfängers möglich. Dies soll im Folgenden begründet werden.

Zur Einhaltung der Entfernungsunabhängigkeit der Winkelmessung ist zunächst die Minimierung der Strahldivergenz erforderlich. Der Divergenzwinkel β_{Div} ist abhängig von der Brennweite des Achromats f_{Achromat} und der Ausdehnung der Lichtquelle r_{LWL} (vgl. Gl. 4.3 und Abb. 4.23). Die einsetzbare Brennweite beträgt aufgrund der baulichen Beschränkungen in der NPM-Maschine nur bis zu ca. 50 mm. Daher muss die Ausdehnung der Lichtquelle klein gehalten werden.

$$\tan \beta_{\text{Div}} = \frac{r_{\text{LWL}}}{f_{\text{Achromat}}} \implies \beta_{\text{Div}} = \arctan \frac{31,25 \mu\text{m}}{40 \text{ mm}} = 161'' \quad (4.3)$$

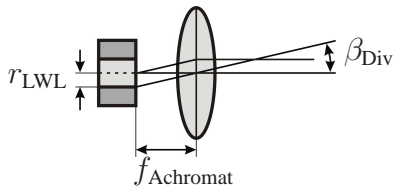


Abb. 4.23: Strahldivergenz aufgrund räumlich ausgedehnter Strahlquelle: r_{LWL} – Faserkernradius, f_{Achromat} – Achromatbrennweite, β_{div} – Divergenzwinkel

Aus der Vorgabe der Brennweite des eingesetzten Achromats $f_{\text{Achromat}} = 40 \text{ mm}$ und der geforderten Winkelauflösung $\alpha_{\text{min}} = 0,002''$ ergibt sich zudem die notwendige laterale Auflösung x_{min} des photoelektrischen Empfängers (vgl. Gl. 4.4 und Abb. 4.22).

$$x_{\text{min}} = \tan(2 \cdot \alpha_{\text{min}}) \cdot f_{\text{Achromat}} \approx 0,4 \text{ nm} \quad (4.4)$$

Um diese Mindestauflösung und die erforderliche hohe Messgeschwindigkeit zu erreichen, wird ein segmentierter Photoempfänger eingesetzt [24]. CCD's und CMOS-Sensoren besitzen nicht die notwendige Bandbreite und Lateraleffektdioden haben deutlich höhere Kennliniennichtlinearitäten [78]. Zur Minimierung von Nichtlinearitäten wurde eine Quadrantendiode mit besonders schmalen, lichtunempfindlichen Stegen zwischen den einzelnen Segmenten ausgewählt [33] (vgl. Abb. 4.24).

Bisher wurde die ca. $0,3 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ große, aktive Schicht der Laserdiode dennoch weitestgehend in diesen $5 \mu\text{m}$ breiten Stegen abgebildet und es erfolgte lediglich die Detektion der höheren Beugungsordnungen aufgrund der eingebrachten Blende [35]. Dies wäre ebenso

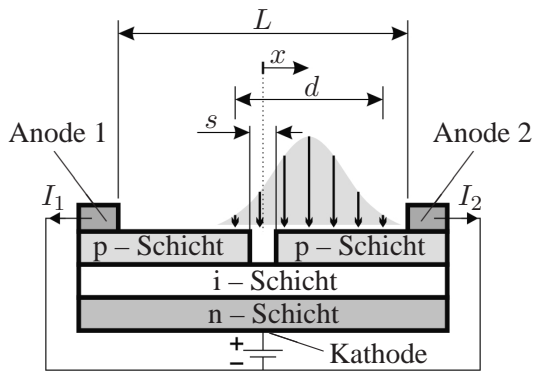


Abb. 4.24: Position $x = f(I_1, I_2)$, Spotdurchmesser $d = 62,5 \mu\text{m}$, Stegbreite $s = 5 \mu\text{m}$ und Empfängerbreite $L = 150 \mu\text{m}$ bei der Quadrantendiode. Der Messbereich ergibt sich für $s < d \leq \frac{L+s}{2}$ zu:

$$x = \pm \left(\frac{d - s}{2} \right) = \pm 28,75 \mu\text{m}$$

$$\text{mit } f_{\text{Achromat}} = 40 \text{ mm} \implies \alpha = \pm 74,1''$$

bei der Verwendung von Singelmodellichtwellenleitern mit Kerndurchmessern von $< 10 \mu\text{m}$ der Fall. Daher wird ein Multimodelichtwellenleiter mit $62,5 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser verwendet. Der dadurch theoretisch erzielbare Messbereich von ca. $150''$ (vgl. Abb. 4.24) ist ausreichend, da die zu erwartenden Winkelabweichungen durch die hohe Führungsqualität mit weniger als einer Winkelminute abgeschätzt werden können. Der Messbereich wird jedoch durch die elektronische Auswertung auf ca. $50''$ beschränkt.

Durch die Verwendung des Multimodelichtwellenleiters können nun keine Laserdioden mehr als Lichtquellen eingesetzt werden, da es sonst zu störenden Speckelerscheinungen kommt. Im neuen Aufbau wird daher eine besonders lichtstarke, infrarote LED verwendet. Die nach der Einkopplung in die Multimodefaser zur Verfügung stehende Lichtleistung beträgt ca. $300 \mu\text{W}$ bis $400 \mu\text{W}$ [64].

Aus der Apertur der Faser $N.A. = 0,275$ (halber Öffnungswinkel $\Theta_0 = 15,96^\circ$), der Luftbrechzahl $n_0 \approx 1$ und der Brennweite $f_{\text{Achromat}} = 40 \text{ mm}$ ergibt sich der Messstrahldurchmesser zu $d = 22 \text{ mm}$ (vgl. Gl. 4.5 und Abb. 4.22, S. 53). Die Fassung des Achromats wirkt allerdings als Aperturblende und begrenzt das gaußförmige Strahlprofil auf $d = 17 \text{ mm}$. Durch Unebenheiten der Reflexionsflächen auf der Spiegelecke entstehen im reflektierten Strahlprofil unterschiedliche Strahlrichtungen. Durch den mittelnden Effekt des relativ großen Strahldurchmessers bleibt die Position des Schwerpunktes der Abbildung auf dem Photoempfänger jedoch nahezu unbeeinflusst.

$$d = 2 \cdot f_{\text{Achromat}} \cdot \frac{N.A.}{n_0} = 2 \cdot f_{\text{Achromat}} \cdot \sin \Theta_0 \quad (4.5)$$

Ein weiterer Nachteil der bisherigen Konstruktion war die temperaturbedingte Driftneigung des separat aufgebauten Umlenkspiegels (vgl. Abb. 4.22, S. 53), der die Ausrichtung

der Messachsen auf die Solllage der Spiegelecke ermöglicht. Zur Erhöhung der thermischen Stabilität ist der Umlenkspiegel nun direkt in den Sensorkopf integriert (vgl. Abb. 4.25).



Abb. 4.25: Foto des neuen AKF-Sensors mit integriertem Umlenkspiegel

4.3.3 Elektronische Auswertung

Die Auswertung der Photoströme der einzelnen Quadranten erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst muss der von der Photodiode (PD) bei Bestrahlung erzeugte Photostrom (I_{PD}) in eine Spannung (U_{PD}) umgewandelt werden (vgl. Abb. 4.26).

Bisher wurde dazu der Spannungsabfall U_L über dem Lastwiderstand R_L mit einer invertierenden OPV-Stufe verstärkt. Diese wirkt als gegen gekoppelter Spannungsverstärker. Die Diode arbeitet im Elementbetrieb, wodurch ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Ausgangsspannung vorliegt. Durch den Eingangswiderstand des OPV's R_1 entsteht ein Stromteiler ($I_{PD} = I_L + I_1$), der die Empfindlichkeit der Schaltung herabsetzt.

In der modifizierten Schaltung wurden R_L und R_1 entfernt. Durch die Gegenkopplung wird der Spannungsabfall über der Diode ausgeregelt. Dieser Transimpedanzwandler wirkt als reiner Strom-Spannungs-Verstärker. Die Diode arbeitet dadurch als Stromquelle mit hohem Innenwiderstand im linearen Bereich. Diese Betriebsart ist deutlich rauschärmer und temperaturstabiler [29, 95].

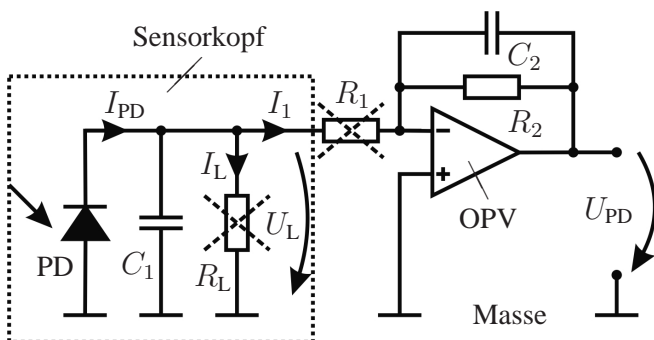


Abb. 4.26: Signalwandlung des Photostromes (I_{PD}) in die Ausgangsspannung (U_{PD}) mit Hilfe eines Transimpedanzwandlers: R_L und R_1 wurden dazu aus der bisherigen Schaltung entfernt.

In einer zweiten Elektronikstufe erfolgt die Normierung auf die gesamte gemessene Lichtleistung aller vier Quadranten [90]. Damit wird die Unabhängigkeit der Kennlinien von der Strahlleistung der Lichtquelle erreicht. Weitere Stufen dienen durch Summen- und Differenzbildungen der Positionsbestimmung des Lichtfleckes auf dem Empfänger und der Anpassung der Signalamplituden an den nachfolgenden A/D-Wandler. Dieser löst den Spannungsbereich von $\pm 2\text{ V}$ mit 16 bit auf. Bei einem geforderten Messbereich von $\pm 25''$ ist damit theoretisch eine Winkelauflösung von ca. $0,8 \cdot 10^{-3}''$ möglich.

4.3.4 Justierung des Sensors

Um die Entfernungsunabhängigkeit des AKF-Prinzips zu gewährleisten, müssen der Photoempfänger und die Lichtquelle (vgl. Abb. 4.22, S. 53) in der Brennebene des Achromats angeordnet werden.

Die Ausrichtung des Photoempfängers in die bildseitige Brennebene des Achromats erfolgt durch Beurteilung des Spotdurchmessers auf dem Photoempfänger bei Beleuchtung mit parallelem Licht aus einer fremden Quelle (vgl. Abb. 4.27). Befindet sich der Empfänger genau in der Brennebene, so wird der Durchmesser der Abbildung minimal und die Positionsempfindlichkeit maximal. Bei Kippung des einfallenden Strahlbündels um $\pm\alpha$ erreicht das Positionssignal $\pm x$ dann seine maximale Amplitude. Die Erzeugung einer definierten Verkipfung erfolgt durch Anregung des Umlenkspiegels mittels eines Piezoschwingers. Zur Fokuseinstellung wird die Verschiebung des Achromats genutzt, welche durch Drehen in einem Feingewinde mit ca. $50\ \mu\text{m}$ Empfindlichkeit möglich ist. Der Photoempfänger muss dadurch in Strahlrichtung nicht justiert und kann stabil befestigt werden.

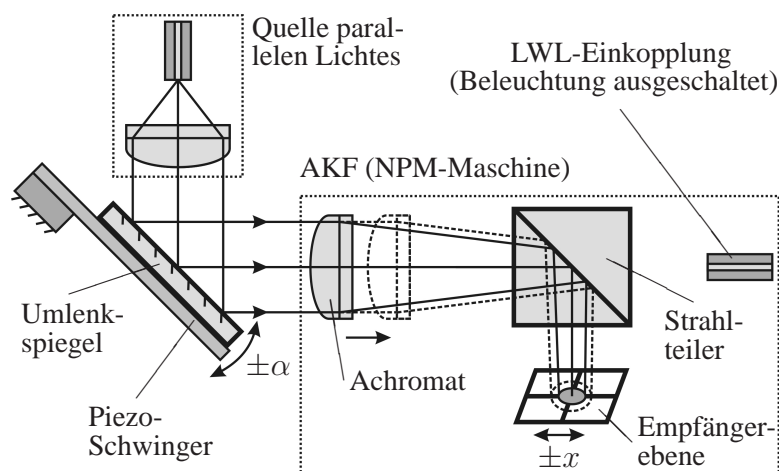


Abb. 4.27: Aufbau zur Einstellung des Abstandes zwischen Achromat und Empfänger: Die Kippung des Umlenkspiegels $\pm\alpha$ führt zur Verlagerung $\pm x$ und die Verschiebung des Achromats zur Durchmesseränderung der Abbildung in der Empfängerebene.

Aufgrund der ausgedehnten Lichtquelle verbleibt eine Restdivergenz des Messstrahls von etwa $160''$ (vgl. Gl. 4.3, S. 54). Die Einstellung des Abstandes zwischen Achromat und Austrittspunkt des Lichtes aus der LWL-Faser kann damit nicht durch die Beurteilung des Messstrahldurchmessers erfolgen, da dieser stets mit dem Abstand zum Achromat variiert (vgl. Abb. 4.23, S. 54). Stattdessen wird der parallele Anteil der Messstrahlung jetzt mit Hilfe eines dem Sensor genau gegenüber ausgerichteten Referenz-AKF's der Firma Trioptics [98] maximiert (vgl. Abb. 4.28). Dieses besitzt in der Brennebene seiner Abbildungslinse eine CCD-Matrix, deren Bild beobachtet werden kann. Damit können die Intensitäten der verschiedenen einfallenden Strahlrichtungen des zu prüfenden AKF's beurteilt werden.

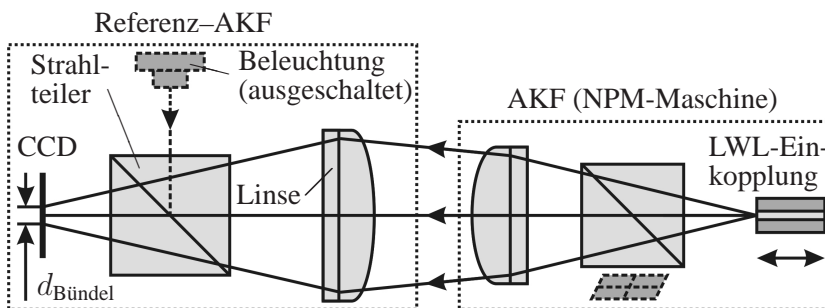
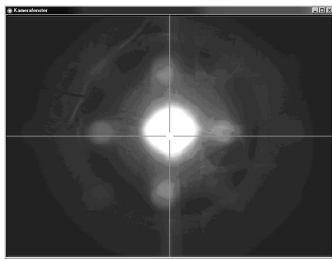


Abb. 4.28: Aufbau zur Einstellung der Parallelität der Messstrahlung: Durch Verschiebung der LWL-Einkopplung wird $d_{\text{Bündel}}$ minimiert.

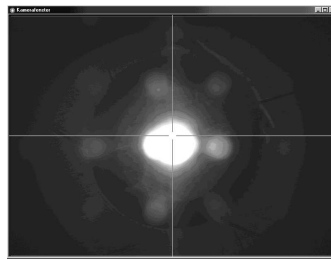
Die geringste Strahldivergenz liegt vor, wenn der Durchmesser der Abbildung ($d_{\text{Bündel}}$) auf der CCD-Matrix minimal ist. Die notwendige Einstellung ist mit und ohne den eingebauten Umlenkspiegel (vgl. Abb. 4.29) sehr feinfühlig möglich (vgl. Abb. 4.30). Die zusätzlich auf den Bildern zu erkennenden, periodisch angeordneten Leuchtflecken entstehen durch Mehrfachreflexionen am Strahlteiler des Referenz-AKF's.

Die Justierung des Abstandes zwischen Faseraustritt und Achromat erfolgt durch Drehen der Faserhalterung in einem Feingewinde und ist ebenfalls mit einer Empfindlichkeit von ca. $50 \mu\text{m}$ möglich. Die beobachtete minimale Strahldivergenz liegt im Bereich der berechneten (vgl. Gl. 4.3, S. 54). Zur Bestätigung wurde die Kennlinie des AKF's in verschiedenen Messentfernungen aufgenommen.

Der Nullpunkt des Sensors wird durch laterale Verschiebung des Photoempfängers innerhalb der Brennebene des Achromats so eingestellt, dass die gesamte Optik möglichst mittig durchlaufen wird. Damit werden Abweichungen durch sphärische Aberrationen minimiert und der Messbereich gestaltet sich symmetrisch.

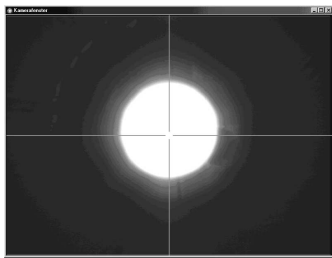


(a) Ohne Umlenkspiegel

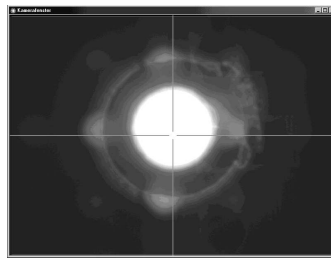


(b) Mit Umlenkspiegel

Abb. 4.29: CCD-Bilder der einfallenden Strahlung des zu prüfenden AKF's



(a) Fokus ca. 0,4 mm zu kurz



(b) Fokus ca. 0,3 mm zu lang

Abb. 4.30: CCD-Bilder der einfallenden Strahlung des zu prüfenden AKF's

4.3.5 Kalibrierung des Sensors

Die Kalibrierung erfolgt mit dem besten, zu diesem Zeitpunkt kommerziell verfügbaren und durch Kalibrierung rückgeführten AKF, dem Elcomat HR von Möller Wedel. Im verwendeten Messbereich von etwa $50''$ wird eine Messunsicherheit von ca. $0,04''$ bei einer Auflösung von $0,005''$ erreicht [65]. Der Kalibrieraufbau (vgl. Abb. 4.31) wurde vom bisherigen Winkelmesssystem übernommen [101]. Durch die Anordnung des Prüf- und Referenz-AKF's an den gegenüberliegenden, hochparallelen Seiten eines einseitig verspiegelten Reflektors beeinflussen Veränderungen der Winkellage oder Form des Spiegels die Kalibrierung nicht. Die Kennlinien werden durch schrittweises Abfahren des Messbereiches von $50'' \times 50''$ gewonnen.

Als Aktuatoren für die Kippung des Messspiegels werden nun empfindlichere Piezoelemente eingesetzt. Zur Verminderung von Drifterscheinungen zwischen beiden Winkelmesssystemen wurde die Messzeit durch Erhöhung der Schrittweite von über zwei Stunden auf etwa 10 Minuten verkürzt, der gesamte Aufbau auf einer gemeinsamen, besonders stabilen und schwingungs isolierten Grundplatte angeordnet und die Temperatur im Messraum auf etwa ein Kelvin stabilisiert.

Durch Verdrehung der beiden Winkelmesssysteme um die Messstrahlrichtung entsteht eine Querempfindlichkeit zwischen beiden Messachsen. Die daraus resultierenden Kennlinienabweichungen werden nun durch Hauptachsentransformation der Datensätze minimiert.

Der Zusammenhang zwischen der Auslenkung des Spots auf dem Photoempfänger und dem Kippwinkel ist nichtlinear über die Tangensfunktion definiert (vgl. Gl. 4.4, S. 54). Zur besseren Übereinstimmung mit den Messdaten wurde für die Kennlinien ein Polynomansatz dritter Ordnung, im Vergleich zum bisherigen linearen Ansatz, gewählt.

Für die nach allen Verbesserungsmaßnahmen verbleibenden Differenzen zwischen der approximierten Kennlinie und den Messpunkten ist eine Standardabweichung von $<0,07''$ erreichbar.

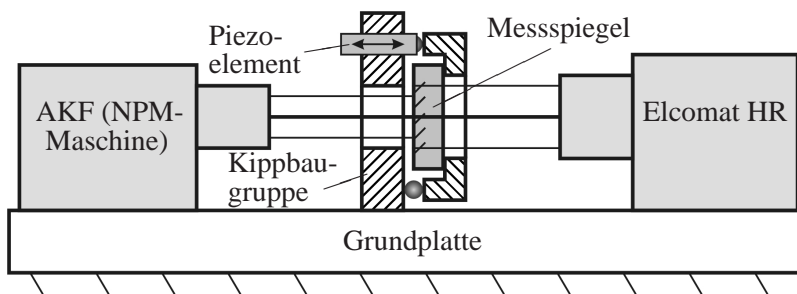


Abb. 4.31: Prinzip des Kalibrieraufbaus für die Winkelsensoren: Die Messstrahlen beider Sensoren werden auf der gleichen Seite des Messspiegels reflektiert.

4.3.6 Erzielte Ergebnisse

Messungen mit dem bisherigen AKF waren in einem Messbereich von ca. $16'' \times 16''$ mit einer Empfindlichkeit von ca. $0,0005''$ und einer Messunsicherheit von ca. $0,8''$ [80] möglich (vgl. Kap. 3.6, S. 25). Für das am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik neu entwickelte AKF konnte der Messbereich durch die bessere Anpassung von Lichtquelle und Photoempfänger auf etwa $50'' \times 50''$ vergrößert werden, während sich die Auflösung mit ca. $0,0008''$ kaum verschlechterte. Die Verwendung eines genaueren Referenzsystems und die Verbesserungen bei der Justierung und Kalibrierung führten zur Verringerung der Messunsicherheit auf $0,08''$.

Aus der verbesserten Bestimmung der verbleibenden Winkelabweichungen resultiert ein Beitrag zur Reduzierung der Positionierunsicherheit $u_7(l)$ durch Verkippungen des Messtisches (vgl. Tab. 4.5). Ein weiterer Beitrag entsteht aus der Verbesserung der Parameter der Positions- und Winkelregelung. Aus den dazu am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik durchgeführten Arbeiten [67, 102] resultierten die verkleinerten Winkelabweichungen für φ_x

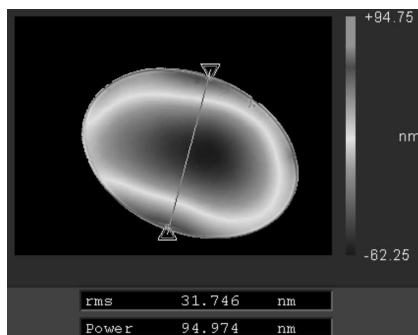
und φ_y bei Bewegungen des Messtisches von $< 0,005''$. Für φ_z konnten nach der Integration der neuen Spiegelecke und der verbesserten Gewichtskraftkompensation (vgl. Kap. 4.4, S. 63 ff.) verringerte Abweichungen von $< 1,3''$ gemessen werden. Leichte Änderungen ergaben sich zusätzlich durch die veränderten Oberflächen der neuen Spiegelecke (vgl. Kap. 4.1, S. 35 ff.) für den Wellenfrontfehler im Interferometer. Die maximale Winkelabweichung innerhalb der Spiegelflächen wurde mit ca. $0,4''$ bestimmt.

x- und y-Achse	z-Achse
$u_7(l_{xy}) = 0,43 \text{ nm}$	$u_7(l_z) = 0,002 \text{ nm}$

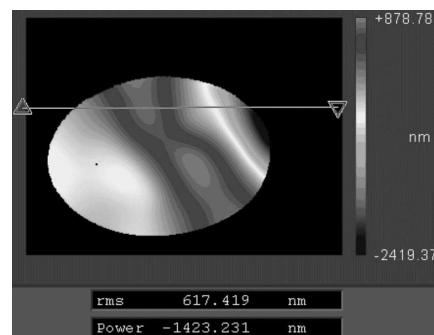
Tabelle 4.5: Reduzierte Positionierungsunsicherheit durch Verkippungen des Messtisches

Die Messauflösung bei mehreren zusätzlich aufgebauten AKF's schwankte jedoch zwischen $0,0006''$ und $0,0016''$. Ebenso liegen die Standardabweichungen der Differenzen zwischen der approximierter Kennlinie und den Messpunkten in einem relativ großen Bereich von $0,04''$ bis $0,12''$. Als Ursachen dafür gelten die Oberflächenbeschaffenheiten des Umlenkspiegels und der Empfängerdiode (vgl. Abb. 4.22, S. 53).

Die recht dünnen, elliptischen Umlenkspiegel im Sensorkopf des AKF's unterliegen nach dem großflächigen Klebprozess signifikanten Oberflächenverformungen (vgl. Abb. 4.32). Das Aushärten des Klebers ist offensichtlich nicht reproduzierbar und verändert die Oberflächenformen der geklebten Umlenkspiegel zufällig. Außerdem werden Ebenheitsabweichungen des Spiegelträgers teilweise auf den Spiegel übertragen. Dadurch wird die Richtung einzelner Teilstrahlen beeinflusst, womit sich der Durchmesser der Abbildung auf dem Photoempfänger verändert und die Messauflösung beeinflusst wird.



(a) Vor der Klebung (RMS-Wert: 32 nm)



(b) Nach der Klebung (RMS-Wert: $> 600 \text{ nm}$)

Abb. 4.32: Oberflächenänderung der Umlenkspiegel der Winkelsensoren durch die Klebung

Die Empfängerdiode ist mit einer transparenten Kunststoffschicht abgedeckt. Wölbungen der Oberfläche führen zur optischen Wirkung als Linse und damit ebenfalls zur Veränderung des Spotdurchmessers und der Messauflösung.

Um die Temperaturabhängigkeit des Sensors zu bestimmen, wurde ein äußerst stabiler Messaufbau in einer Klimakammer untersucht. Dazu wurde das Winkelmesssystem an einer Grundplatte aus Zerodur befestigt, auf die ein ebener Zerodurspiegel geklemmt wurde (vgl. Abb. 4.33). Die Untersuchungen ergaben eine Temperaturabhängigkeit von bis zu $2''/K$ für die Drehung um die Vertikale und bis zu $1,2''/K$ um die Horizontale. Die höhere Abhängigkeit um die Vertikale ist durch die in dieser Richtung thermisch unsymmetrisch befestigte Empfängerplatine erklärbar. Alle Untersuchungen wurden mit eingebautem Umlenkspiegel durchgeführt, welcher ebenfalls zur Temperaturabhängigkeit beiträgt.

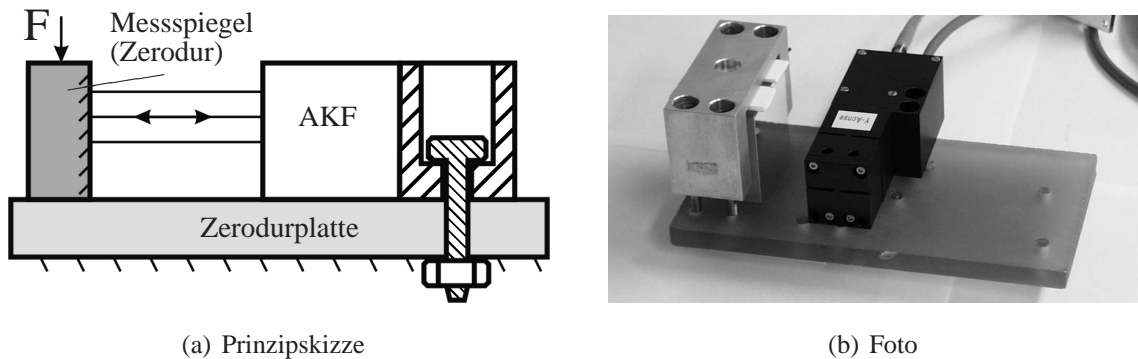


Abb. 4.33: Messaufbau zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des AKF's

Die Bestimmung des minimalen Winkelrauschens, welches nur durch die AKF-Sensoren ausgelöst wird, erfolgte im eingebauten Zustand in der NPM-Maschine mit inaktiven Antriebssystemen. Die Messung wurde in einer schall- und schwingungs isolierten Messkammer durchgeführt. Das Winkelrauschen liegt im Bereich von $\pm 0,005''$. Wird der Tisch durch die Antriebssysteme bewegt oder in Ruhe in einem definierten Zustand gehalten, kann das Zusammenspiel mit der Winkelregelung beobachtet werden. Da das Rauschen der Winkelmesswerte dabei nahezu unverändert bleibt, lässt sich schlussfolgern, dass es zum größten Teil den Winkelsensoren und nicht dem Regelungssystem zuzuordnen ist.

4.3.7 Weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Winkelsensoren

Hauptansatzpunkt für weitere Verbesserungen der AKF's ist das Sensorrauschen und die Driftneigung über längere Zeiträume.

Zur Verringerung des Rauschens sollte das Signal-Rausch-Verhältnis durch höhere Lichtleistung im System vergrößert werden. Stärkere, nichtkohärente Lichtquellen sind jedoch momentan nicht verfügbar. Durch den Einsatz von Lichtwellenleitern mit größerem Kerndurchmesser lässt sich die Lichtleistung aber erhöhen. Die Größe der Photoempfänger muss allerdings an die veränderte Abbildung angepasst sein. Als Empfänger sollten dabei, sobald verfügbar, Quadrantenphotodioden ohne Abdeckung eingesetzt werden, um Einflüsse auf die Abbildung zu vermeiden.

Bei der Ausführung der Strahlumlenkung mittels eines Oberflächenspiegels bietet sich die Möglichkeit der wellenlängenangepassten Verspiegelung. „Enhanced AL-Spiegel“ [70] oder Goldspiegel bieten höhere Reflexionsgrade für die verwendete Infrarotstrahlung. Auch damit kann die dem System zur Verfügung stehende Lichtleistung erhöht werden.

Zur Verringerung der Driftneigung sollte die Befestigung der Empfängerplatine thermisch stabil ausgeführt werden. Außerdem sollte bei der Befestigung des Umlenkspiegels die herkömmliche Klebung vermieden werden. Da eine zwangfreie Klemmung aufgrund des äußerst begrenzten Bauraumes nur schwer möglich ist, bietet sich ein als Passkleben bekanntes Verfahren an. Der Kleber ist dabei nicht Bestandteil der Messkette und wird nur punktwise eingesetzt, um Zwänge zu vermindern (vgl. Abb. 4.34). Die feste, direkte, mechanische Anlage erfolgt durch Kontraktion des Klebers beim Aushärten. Die Umsetzung der beiden Befestigungen ist mit größeren Veränderungen der Konstruktion verbunden und sollte in Verbindung mit einer Überarbeitung des gesamten AKF's erfolgen.

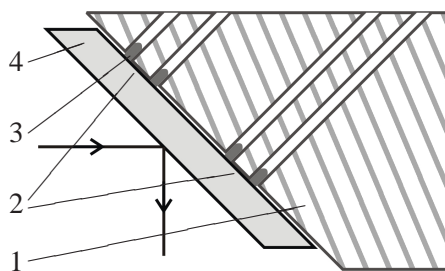


Abb. 4.34: Verfahren der Passklebung: 1 Spiegelträger, 2 Mechanische Anlageflächen, 3 Klebestellen, 4 Umlenkspiegel

4.4 Gewichtskraftkompensation

Die in der NPM-Maschine eingesetzten, elektrodynamischen Antriebssysteme (*voice coil actuators*) sind nicht selbsthemmend. Vor allem die vertikalen Antriebe sorgen deshalb für einen relativ großen Wärmeeintrag in das System, da sie permanent der Gewichtskraft von Spiegelecke und Messobjekt entgegenwirken müssen. Die direkte Kühlung der Antriebe ist aus

Platzgründen nicht möglich. Es erfolgte jedoch bisher eine Entlastung durch Druckfedern (vgl. Abb. 4.35).

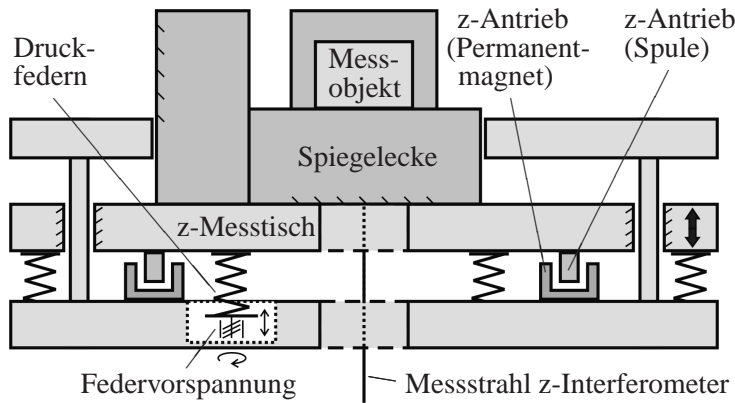


Abb. 4.35: Aufbau zur bisherigen Gewichtskraftkompensation mit Druckfedern

Die von den Druckfedern abgegebenen Entlastungskräfte verändern sich jedoch, auch bei Verwendung sehr kleiner Federkonstanten, mit der vertikalen Position des z-Messtisches. Selbst bei Anpassung der Federvorspannung (vgl. Abb. 4.35) verbleibt daher im Stillstand des z-Messtisches und ohne Messobjekt eine Gesamtverlustleistung für die vertikalen Antriebe von bis zu 300 mW. Die dynamischen Spitzenwerte betragen bis zu zwei Watt. Die Gewichtskraft eines zusätzlich aufgelegten Messobjektes kann mit dem bisherigen Aufbau nicht kompensiert werden.

4.4.1 Aufbau und Funktionsweise

Für den neuen Aufbau der Gewichtskraftkompensation (vgl. Abb. 4.36) wurden Schenkelfedern zur Erzeugung der Kompensationskräfte ausgewählt [69]. Sie besitzen besser anpassbare Parameter zur Erzeugung konstanter Kräfte im gesamten vertikalen Bewegungsbereich des z-Messtisches und zur Berücksichtigung unterschiedlich schwerer Messobjekte. Die Anpassung der Kompensationskraft an Messobjektmassen bis zu einem Kilogramm erfolgt durch Veränderung der Federschenkellänge. Dazu werden die Federn lateral verschoben (vgl. Abb. 4.36). Die Übertragung der Kompensationskraft erfolgt vom freien Federschenkel über ein Kugellager, das am z-Messtisch befestigt ist. Dadurch wird *Stick Slip* an der beweglichen Krafteinleitung vermieden. Das Abrollen der Feder erfolgt deshalb ebenfalls teilweise auf einem Kugellager. Der zweite Federschenkel kann zur Einstellung der Federvorspannung justiert werden (vgl. Abb. 4.37)

Um den Einfluss der Kompensationskräfte auf die Winkellage der Spiegelecke zu minimieren, werden vier identische Kompensationsmechanismen symmetrisch um den Schwerpunkt

des z-Messtisches angeordnet. Die Krafteinleitung erfolgt jeweils nahe der vertikalen Antriebssysteme, um einen direkten Kraftfluss zu gewährleisten.

Die gesamte Anpassung der Kompensationskräfte an die jeweils vorliegende Messobjektmasse erfolgt vor der eigentlichen Messung. Dadurch beeinflussen mechanische Schwingungen und der Wärmeeintrag der zur Verschiebung der Federn eingesetzten Schrittmotoren (vgl. Abb. 4.37) die Messung nicht.

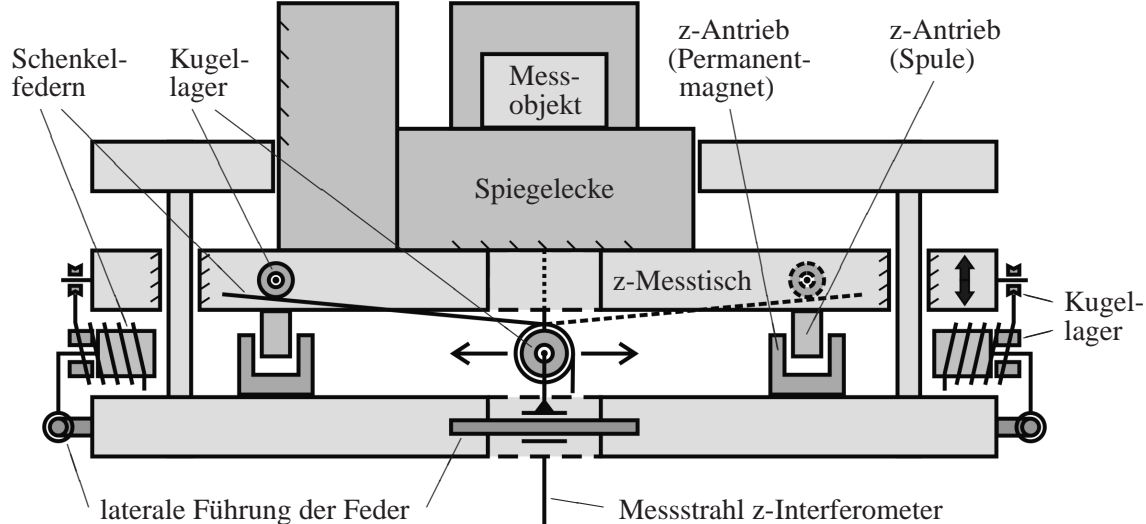


Abb. 4.36: Aufbau zur verbesserten Gewichtskraftkompensation mit Schenkelfedern

Durch Verschiebung des Krafteinleitungspunktes auf dem freien Federschenkel lässt sich die Länge des Hebelarmes l_s verändern und damit die aus der linearen Drehmomentkennlinie gewonnene Kraft F_s (vgl. Abb. 4.37) auf das zu kompensierende Gewicht einstellen. Der Federgrundkörper wird dazu durch einen motorischen Spindeltrieb und zusammen mit einem gleitgelagerten Schlitten lateral verschoben.

Durch die geeignete Anordnung der Feder ist es möglich, dass die vertikale Komponente F_v der Federkraft (vgl. Abb. 4.37) auch bei Bewegungen des Messtisches nahezu konstant bleibt [47]. Dies ist möglich, wenn mit Verkleinerung des Federschenkelwinkels α_s das Federmoment zunächst abnimmt, aber gleichzeitig die Hebelarmlänge kleiner und der vertikale Anteil der Federkraft größer wird.

Zur Beschreibung der in Abbildung 4.38 dargestellten Anordnung von Federgrundkörper, Startpunkt des Federschenkels P_2 und Krafteinleitungspunkt P_1 am Kugellager lässt sich das Gleichungssystem 4.6 aufstellen. Die Nebenbedingungen grenzen die vier möglichen Lösungen auf die in Abbildung 4.38 dargestellte ein.

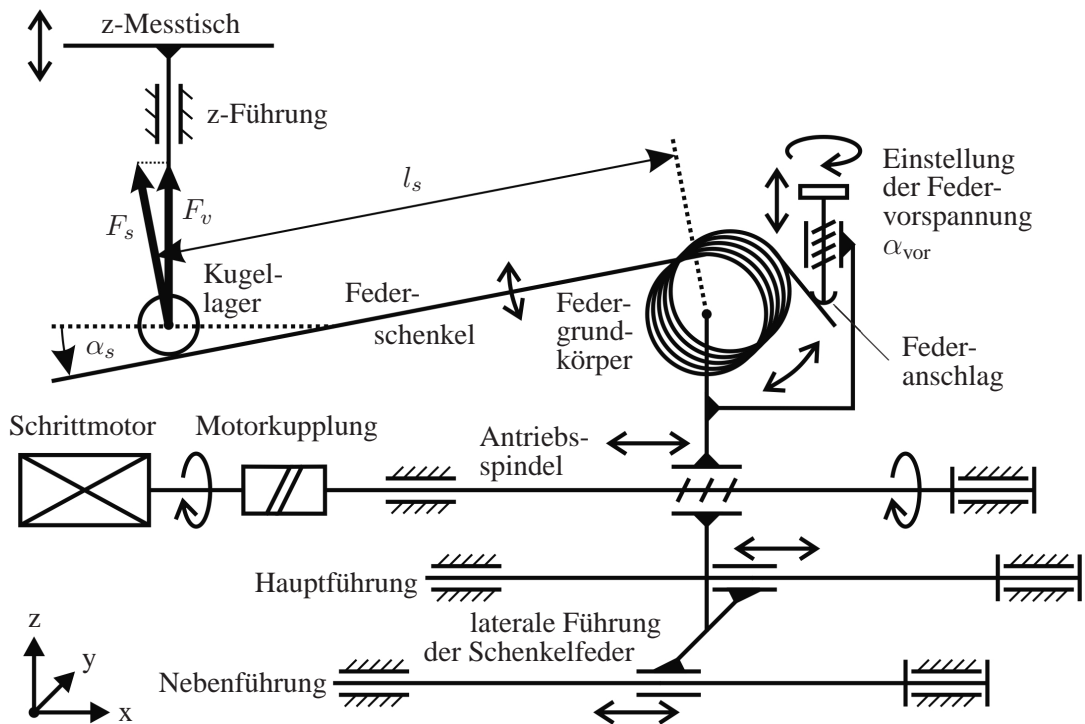


Abb. 4.37: Prinzip der verbesserten Gewichtskraftkompensation mit einer Schenkelfeder: Durch laterale Verschiebung des Federgrundkörpers (Federkonstante c_F) erfolgt die Anpassung der Federkraft $F_s = c_F \cdot (\alpha_s + \alpha_{vor})/l_s$ an unterschiedliche, zu kompensierende Massen. Die vertikale Komponente der Federkraft $F_v = F_s \cdot \cos \alpha_s$ bildet die Kompensationskraft. Sie bleibt während der vertikalen Bewegung des Messtisches nahezu konstant.

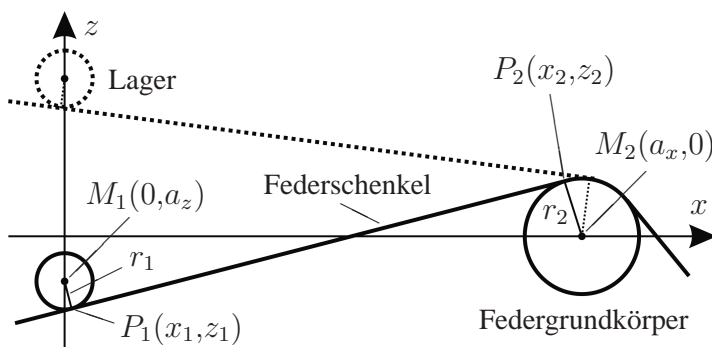


Abb. 4.38: Lage von Federschenkel und Kugellager zur Berechnung der Berührungspunkte P_1 und P_2 . a_x und a_z geben den Abstand der Mittelpunkte M_1 und M_2 an. r_1 und r_2 bezeichnen die Radien der Kreise.

$$\begin{aligned}
\text{Kreisgleichung Lager:} \quad r_1^2 &= x_1^2 + (z_1 - a_z)^2 \\
\text{Tangentengleichung Lager:} \quad r_1^2 &= x_1 \cdot x_2 + (z_1 - a_z) \cdot (z_2 - a_z) \\
\text{Kreisgleichung Feder:} \quad r_2^2 &= (x_2 - a_x)^2 + z_2^2 \\
\text{Tangentengleichung Feder:} \quad r_2^2 &= (x_1 - a_x) \cdot (x_2 - a_x) + z_1 \cdot z_2 \\
\text{Nebenbedingung 1:} \quad z_1 &< a_z \\
\text{Nebenbedingung 2:} \quad z_2 &> 0
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Die Lösung dieses nichtlinearen Gleichungssystems erfolgt mit einem numerischen Lösungsverfahren und liefert die Koordinaten für die Berührungspunkte P_0 und P_1 , woraus die Schenkellänge l_s und der Federschenkelwinkel α_s berechnet werden können (vgl. Gl. 4.7 und 4.8). Mit Gl. 4.9 kann dann die Kompensationskraft F_v berechnet werden.

$$l_s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \tag{4.7}$$

$$\alpha_s = \arctan \left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \right) \tag{4.8}$$

$$F_v = F_s \cdot \cos \alpha_s = \frac{c_F \cdot (\alpha_s + \alpha_{\text{vor}}) \cdot \cos \alpha_s}{l_s} \tag{4.9}$$

Durch Variation der Parameter r_1 (Lagerradius), r_2 (Federradius), α_{vor} (Federvorspannung), c_F (Federkonstante) und der Stellbereiche von a_x (lateraler Abstand zwischen Lager und Feder) und a_z (vertikaler Abstand zwischen Lager und Feder) lassen sich der Kraftbereich und die Abweichungen der Kompensationskraft in den unterschiedlichen vertikalen Messpositionen des z-Messtisches einstellen.

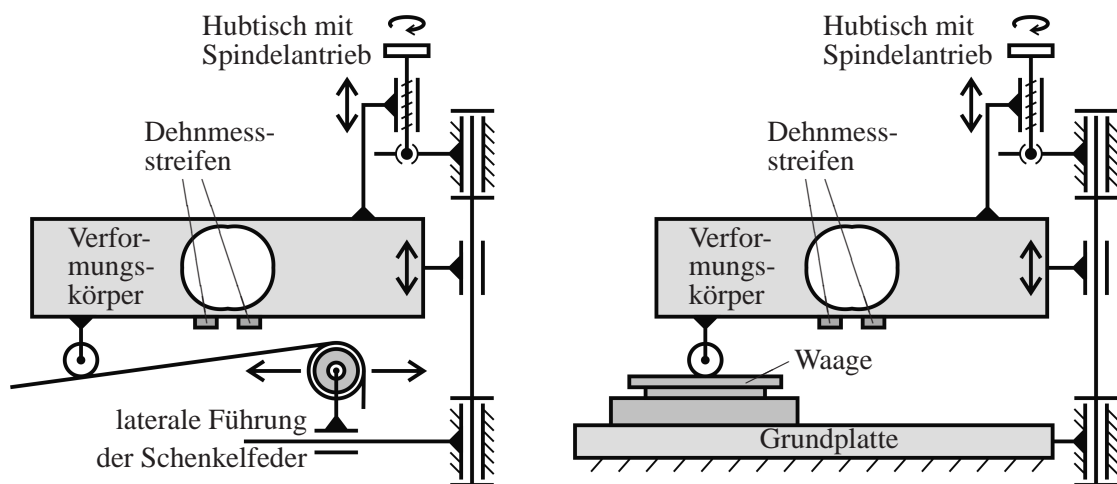
Einschränkungen bestehen dabei unter anderem bei den aufgrund der Durchbiegung begrenzten Federschenkelängen, den Kugellagerdurchmessern und beim Bauraum. Durch die Wahl einer großen Schenkellänge konnten große Variationsbereiche der Kraft und kleine Federschenkelwinkel erreicht werden, wodurch störende Querkräfte klein bleiben. Diese können sonst zu Verkippungen der Spiegelecke in allen drei rotatorischen Freiheitsgraden führen.

Die unter Verwendung einer kommerziell verfügbaren Feder gefundene Lösung deckt theoretisch einen Kraftbereich von 10 N bis 19 N ab, wobei die Abweichungen der Kompensationskraft bei etwa 2 % liegen, bei geringen Messobjektmassen auch darunter.

4.4.2 Eigenschaften

Um die theoretisch bestimmten Eigenschaften zu überprüfen, wurde zunächst ein einzelner Mechanismus aufgebaut und untersucht. Der Versuchsaufbau (vgl. Abb. 4.39(a)) ermöglicht die Messung der von der Feder abgegebenen Kraft im gesamten Bewegungsbereich des z-Messtisches. Dazu ist als Primärwandler ein Knochenverformungskörper der Firma Sartorius durch einen Hubtisch vertikal verschiebbar. Die Bestimmung der Verformung erfolgt mit Dehnmessstreifen. Dieser Kraftsensor wurde mittels einer sehr präzisen Waage (Sartorius LP620S, Reproduzierbarkeit $\leq \pm 1$ mg, Linearitätsabweichungen $\leq \pm 2$ mg) [77] kalibriert (vgl. Abb. 4.39(b)). Dabei wurden Hystereseerscheinungen von $< 0,01$ % festgestellt, die als nicht signifikant einzustufen sind [51].

Die ermittelten Abweichungen der Kompensationskraft über den maximal möglichen vertikalen Hub von 8 mm zum Mittelwert bleiben für den gesamten Kraftbereich $\leq \pm 1,11$ %. Darin ist eine Hysterese von ca. 1 % bereits enthalten. Zusätzlich tritt eine Hysterese bei der lateralen Verschiebung der Feder auf. Dadurch entstehen Abweichungen der Kompensationskraft von ca. 1 %, die bei der Anpassung an eine vorgegebene Gewichtskraft mit berücksichtigt werden müssen. Somit wird eine Kompensation der Gewichtskraft von mehr als ca. 97 % erreicht. Im Vergleich zum theoretischen Fall ohne Kompensation ergibt sich damit eine mögliche Reduzierung der statischen Verlustleistung aller vier vertikalen Antriebe von 5–23 W auf 5–24 mW.



(a) Versuchsaufbau mit individuellem Kompensationsmechanismus

(b) Kalibrierbau des Kraftsensors

Abb. 4.39: Untersuchung der Eigenschaften der Gewichtskraftkompensation

Im nächsten Schritt wurden die Eigenschaften der in die NPM-Maschine integrierten Gewichtskraftkompensation untersucht. Da die Erzeugung der Kompensationskräfte mittels Federn kein Dämpfungselement enthält, werden die dynamischen Eigenschaften der z-Achse der NPM-Maschine beeinflusst. Insbesondere ist mit einer erhöhten Schwingungsneigung des Systems zu rechnen. Aufgrund von Reibung an verschiedenen Teilen der Antriebe und Führungen ist dennoch ausreichend Dämpfung vorhanden. Der verbleibenden Schwingungsneigung kann durch das Regelungssystem ausreichend entgegengewirkt werden.

Die Zeit für die geregelte Einstellung der Entlastungskräfte auf die vorliegende Messobjektmasse vor der eigentlichen Messung beträgt etwa fünf Minuten. Die Anpassung ist auf einer frei wählbaren Messtischhöhe möglich. Das vollständige Entlasten bei maximaler Messobjektmasse benötigt weniger als eine Minute.

Die Untersuchung der verbleibenden Gesamtverlustleistung der vertikalen Antriebe erfolgte mit einem Messobjekt mittlerer Masse von ca. 430 g. Es ergab sich dabei eine Reduzierung von 0,6–1,65 W auf < 60 mW, jeweils abhängig von der Messhöhe und der lateralen Position des Messtisches. Verbleibt der z-Messtisch bei Messbewegungen annähernd auf der gleichen Höhe, auf der vor der Messung die Anpassung der Kompensationskraft stattfand, so treten noch geringere Werte von ≤ 11 mW auf. Das ist beispielsweise beim Messen von Stufenhöhennormalen geringer Höhe der Fall. Im Stillstand lassen sich an der optimalen Kompensationsposition sogar Leistungen von < 1 mW erreichen.

Durch diese signifikante Reduzierung der in das System eingebrachten Wärme und durch die im nächsten Kapitel beschriebene, verbesserte Anordnung zur Abführung dieser wurde eine deutlich höhere Stabilität der Temperatur in der Messkammer mit Standardabweichungen von < 8 mK erreicht.

4.5 Klimatisierung der Messanordnung

Zur Verringerung des Einflusses der Temperatur auf die Messung wurden in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturempfindlichkeit und im vorangegangenen Kapitel ein Aufbau zur Verringerung der eingebrachten Wärme beschrieben.

Zusätzlich wird die Temperatur in der geschlossenen Messhaube stabilisiert. Dies ist notwendig, um die verbleibende Wärme abzuführen, die vor allem durch die vertikalen Antriebe erzeugt wird. FEM-Berechnungen [103] zeigten, dass ein recht großer Anteil dieser Wärme durch Wärmeleitung direkt zur Spiegelecke und dem darauf befindlichen Messobjekt abge-

führt wird (vgl. Abb. 4.40). Dies wird durch die Anordnung des Spulenkörpers am z-Messtisch hervorgerufen. Der Wärmeaustausch durch Konvektion über die Umgebungsluft erfolgt seitlich neben dem z-Messtisch und in seinem Inneren nach oben. Dadurch werden die Temperaturprofile entlang der Messstrahlen der Laserinterferometer und damit die Bestimmung der Luftbrechzahl negativ beeinflusst. Zum teilweisen Wärmestau kommt es unterhalb der Spiegelecke und unter der Zerodurplatte, die zur Befestigung des Antastsystems dient.

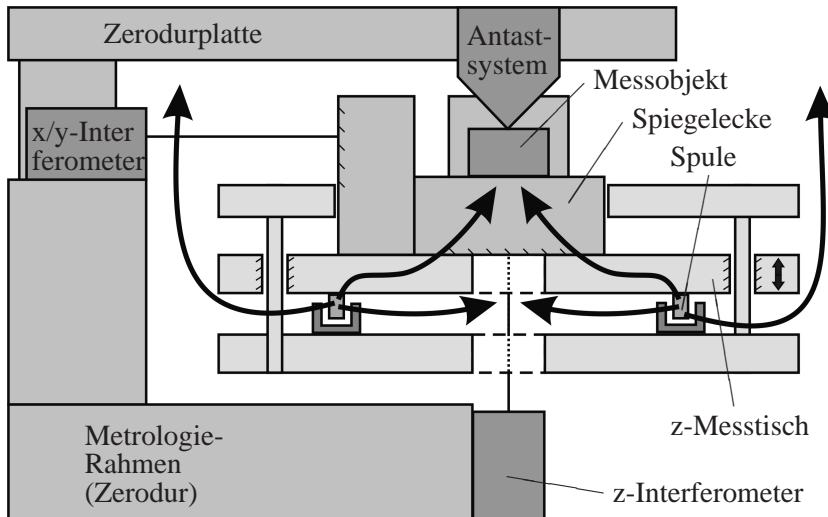


Abb. 4.40: Transport der von den vertikalen Antrieben erzeugten Wärme durch Wärmeleitung und Konvektion (FEM-Berechnungen [103])

Der bisherige Aufbau zur Temperierung der Messkammer bestand aus einem Thermostaten und einem Wärmetauscher, der aus Kupferplatten und wasserdurchströmten Kupferrohren aufgebaut wurde. Die Kupferplatten bedeckten allerdings nur einen Teil der Innenflächen seitlich neben der NPM-Maschine (vgl. Abb. 4.41). Dadurch betrug die Zeit zum Erreichen stabiler Temperaturverhältnisse bis zu 24 Stunden [81] und es konnte lediglich eine Temperaturstabilität mit Standardabweichungen von 0,1 K erreicht werden.

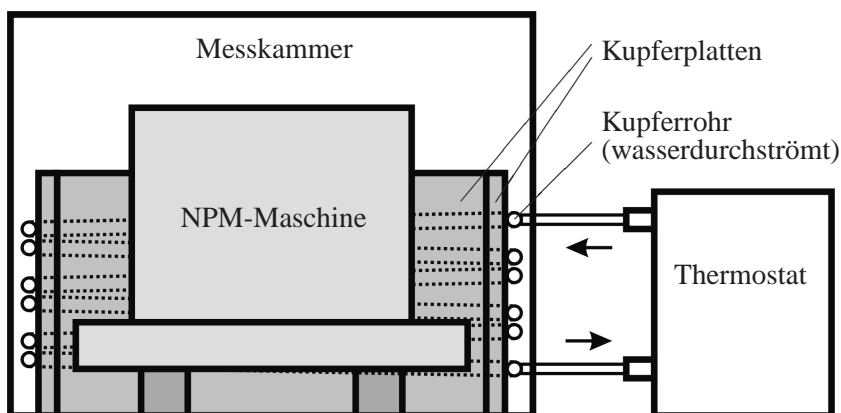


Abb. 4.41: Bisheriger Aufbau zur Temperierung der Messkammer

4.5.1 Verbesserter Aufbau

Der verbesserte Aufbau zur Temperaturstabilisierung der Messkammer wurde gemeinsam am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik entwickelt. Die Wärmetauscherelemente bedecken nun, bis auf die Grundfläche, die gesamte Innenfläche der Messkammer. Um die Übertragung von Schwingungen durch das strömende Kühlmedium auf die Messkammer zu vermindern, wurde der Wärmetauscher mit mechanischen Dämpfungselementen entkoppelt (vgl. Abb. 4.42). Außerdem wurde ein leistungstärkerer Thermostat verwendet, um eine verbesserte Dynamik bei der Temperaturregelung zu ermöglichen. Dieser gibt die entstehende Abwärme zudem über einen weiteren Wasserkreislauf ab und beeinflusst damit die Temperaturverhältnisse in der Umgebungsluft der Messkammer nicht.

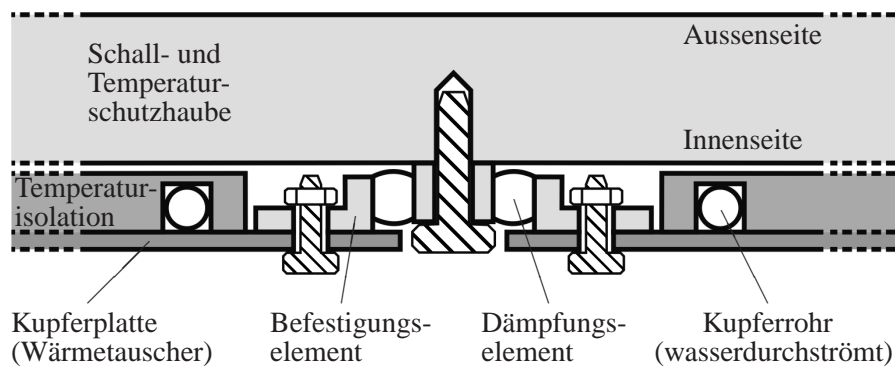


Abb. 4.42: Schwingungsgedämpfte Befestigung der neuen Wärmetauscherelemente an den Innenseiten der Messkammer

4.5.2 Eigenschaften

Durch den besseren Abtransport der entstehenden Wärme kann das thermische Gleichgewicht nach der Aktivierung der Antriebssysteme nun deutlich schneller erreicht werden. Für die Luft in der Umgebung der NPM-Maschine treten Zeitkonstanten von < 3 h auf, in der Nähe der Messstrahlen der Interferometer betragen sie sogar weniger als 1,5 h. Die Temperaturstabilität der Luft während einer Langzeitmessung konnte auf eine Standardabweichung von ca. 8 mK verbessert werden.

Zur Auswertung der Interferenzsignale befindet sich im Gehäuse der Interferometer neben den Fotoempfängern (vgl. Abb. 4.9, S. 41) eine erste Vorverarbeitungsstufe aus Operationsverstärkern. Durch die in Kapitel 4.4 (S. 63 ff.) beschriebene Reduzierung der von den An-

trieben in das System eingebrachten Wärme gewinnt die Verlustleistung dieser OPV's von ca. 0,16 Watt an Bedeutung [104]. Die Wärme gelangt im nahezu geschlossenen Interferometergehäuse durch Konvektion und Wärmeleitung in den Bereich des Referenzstrahles. Durch den hohen Materialquerschnitt und den nahezu geschlossenen Aufbau des Referenzarmes des neuen Interferometers aus Invar (vgl. Abb. 4.15, S. 45) wird die Temperaturverteilung jedoch homogenisiert. Die maximalen Temperaturdifferenzen entlang des Referenzstrahles betragen nur ca. 0,05 K [104].

Die erhöhte Temperaturstabilität in der Messkammer führt zur Verbesserung der Brechzahlkorrektur der Luft und zur Reduzierung der thermischen Ausdehnung der Messkette. Die resultierenden Verringerungen der entsprechenden Beiträge zur Positionierunsicherheit $u_5(l)$ und $u_6(l)$ wurden bereits in Kapitel 4.2.3 (vgl. Tab. 4.3 und 4.4, S. 48) genannt. Im nächsten Kapitel werden die Veränderungen aller Beiträge zur Positionierunsicherheit zusammenfassend dargestellt.

5 Verringerte Positionierunsicherheit in der NPM-Maschine

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Verbesserungen an der NPM-Maschine führten zu einer signifikanten Verringerung der Positionierunsicherheit. Zur Darstellung der Verbesserungen werden die gleichen Modelle verwendet und die neuen Unsicherheiten für die Eingangsgrößen eingesetzt. Die Tabellen 5.2 und 5.4 sowie 5.3 und 5.5 zeigen den direkten Vergleich der Budgets, getrennt nach Messachsen bzw. entlang der Diagonalen durch den Messbereich. Tabelle 5.1 benennt noch einmal die Beiträge $u_i(l)$ zur kombinierten Positionierunsicherheit und verweist auf die Kapitel, in denen die Verbesserungen quantifiziert wurden.

$u_1(l)$	Frequenzstabilität der He-Ne-Laser	Kap. 4.2.3	S. 46
$u_2(l)$	Abweichungen der analogen Interferenzsignale	Kap. 4.2.3.2	S. 50
$u_3(l)$	Demodulationsabweichungen der Interferenzsignale	Kap. 4.2.3.2	S. 51
$u_4(l)$	Referenzkoordinatensystem der Messspiegelecke	Kap. 4.1.1	S. 37
$u_5(l)$	Brechzahl der Luft	Kap. 4.2.3	S. 48
$u_6(l)$	Thermische Ausdehnung der Messanordnung	Kap. 4.2.3	S. 48
$u_7(l)$	Winkelabweichungen	Kap. 4.3.6	S. 61

Tabelle 5.1: Einflussgrößen auf die Positionierunsicherheit

Beitrag	Standardmessunsicherheit					
	x-Achse		y-Achse		z-Achse	
	$l_x = 0$	$l_x = 25 \text{ mm}$	$l_y = 0$	$l_y = 25 \text{ mm}$	$l_z = 0$	$l_z = 5 \text{ mm}$
$u_1(l)$	1,39 nm	1,78 nm	1,39 nm	1,78 nm	2,89 nm	2,96 nm
$u_2(l)$	1,66 nm					
$u_3(l)$	0,06 nm					
$u_4(l)$	6,91 nm		7,29 nm		8,49 nm	
$u_5(l)$	2,67 nm	5,08 nm	2,67 nm	5,08 nm	7,36 nm	7,59 nm
$u_6(l)$	56,50 nm	55,20 nm	56,50 nm	55,20 nm	57,82 nm	
$u_7(l)$	1,27 nm		1,27 nm		0,03 nm	
$u_c(l)$	57,04 nm	55,93 nm	57,09 nm	55,98 nm	59,00 nm	59,03 nm

Tabelle 5.2: Kombinierte Positionierunsicherheit $u_c(l)$ für Langzeitmessungen mit dem bisherigen Aufbau, getrennt nach Messachsen

Beitrag	Standardmessunsicherheit				
	$l = 1 \text{ mm}$	$l = 10 \text{ mm}$	$l = 20 \text{ mm}$	$l = 30 \text{ mm}$	$l = 35,7 \text{ mm}$
$u_1(l)$	1,44 nm	1,53 nm	1,63 nm	1,74 nm	1,81 nm
$u_2(l)$	1,66 nm				
$u_3(l)$	0,06 nm				
$u_4(l)$	7,13 nm				
$u_5(l)$	4,80 nm	5,30 nm	6,08 nm	7,00 nm	7,58 nm
$u_6(l)$	87,16 nm	86,70 nm	86,19 nm	85,68 nm	85,39 nm
$u_7(l)$	1,77 nm				1,78 nm
$u_c(l)$	87,63 nm	87,20 nm	86,75 nm	86,31 nm	86,07 nm

Tabelle 5.3: Kombinierte Positionierunsicherheit $u_c(l)$ für Langzeitmessungen mit dem bisherigen Aufbau, entlang der Diagonalen durch den gesamten dreidimensionalen Messbereich

Beitrag	Standardmessunsicherheit					
	x-Achse		y-Achse		z-Achse	
	$l_x = 0$	$l_x = 25 \text{ mm}$	$l_y = 0$	$l_y = 25 \text{ mm}$	$l_z = 0$	$l_z = 5 \text{ mm}$
$u_1(l)$	0,01 nm	0,25 nm	0,01 nm	0,25 nm	0,27 nm	0,31 nm
$u_2(l)$	0,26 nm					
$u_3(l)$	0,06 nm					
$u_4(l)$	6,44 nm		6,40 nm		6,55 nm	
$u_5(l)$	0,04 nm	1,32 nm	0,04 nm	1,32 nm	0,06 nm	0,27 nm
$u_6(l)$	1,14 nm		1,14 nm		1,82 nm	
$u_7(l)$	0,43 nm		0,43 nm		0,002 nm	
$u_c(l)$	6,56 nm	6,70 nm	6,52 nm	6,65 nm	6,81 nm	

Tabelle 5.4: Kombinierte Positionierunsicherheit $u_c(l)$ für Langzeitmessungen mit dem neuen Aufbau, getrennt nach Messachsen

Beitrag	Standardmessunsicherheit				
	$l = 1 \text{ mm}$	$l = 10 \text{ mm}$	$l = 20 \text{ mm}$	$l = 30 \text{ mm}$	$l = 35,7 \text{ mm}$
$u_1(l)$	0,04 nm	0,08 nm	0,14 nm	0,21 nm	0,25 nm
$u_2(l)$	0,26 nm				
$u_3(l)$	0,06 nm				
$u_4(l)$	6,42 nm				
$u_5(l)$	0,07 nm	0,52 nm	1,04 nm	1,56 nm	1,85 nm
$u_6(l)$	1,81 nm				
$u_7(l)$	0,60 nm				
$u_c(l)$	6,71 nm	6,73 nm	6,79 nm	6,89 nm	6,96 nm

Tabelle 5.5: Kombinierte Positionierunsicherheit $u_c(l)$ für Langzeitmessungen mit dem neuen Aufbau, entlang der Diagonalen durch den gesamten dreidimensionalen Messbereich

Die Zusammenstellung zeigt, dass die wirkungsvollsten Verbesserungen beim größten Beitrag zur Positionierunsicherheit, der thermisch bedingten Dehnung $u_6(l)$, erzielt werden konnten. Diese wurden durch die konstruktive Überarbeitung der Interferometer und die Erhöhung der Temperaturstabilität in der Messkammer möglich. Auch die Unsicherheit durch die Korrektur der Luftbrechzahl $u_5(l)$ konnte stark verringert werden. Für $u_1(l)$, $u_2(l)$, $u_3(l)$ und $u_7(l)$ konnten ebenfalls deutliche Verbesserungen erzielt werden. Diese Beiträge sind jedoch im bisherigen und auch im neuen Budget kaum signifikant. Für $u_3(l)$ war bislang keine Reduzierung möglich oder notwendig. Der größte Beitrag $u_4(l)$ nach den durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen resultiert aus der Messung und Darstellung der Oberflächenabweichungen der Spiegelecke.

6 Ausblick

In diesem Kapitel werden weitere Maßnahmen vorgestellt, die in der Zukunft zu einer Verringerung der Positionierunsicherheit beitragen können. Speziell wird dabei auf die Brechzahlkorrektur, die thermische Dehnung, die Abweichungen der analogen Interferenzsignale der Planspiegelinterferometer und die Winkelmessung mit Interferometern eingegangen.

Der Einfluss von Brechzahlschwankungen und -inhomogenitäten in den Messstrahlen der Interferometer kann durch eine weitere Reduzierung des Wärmeeintrages in die Messkammer, speziell durch die lateralen Antriebe, vermindert werden. Die verbleibende Verlustwärme muss dazu durch direkte Kühlung der Antriebe abgeführt werden.

Die Anordnung des mechanischen und optischen Grundaufbaus der NPM-Maschine im Vakuum führt zur weiteren Verringerung des Einflusses der Brechzahl. Die Reduzierung des Luftdrucks auf etwa 1 mbar (Übergang von Grobvakuum zu Feinvakuum) führt bereits dazu, dass die Unsicherheit bei der Brechzahlbestimmung fast nur noch von der Unsicherheit der verwendeten Parametermethode nach Edlen bestimmt wird. Im Vakuum muss die Verlustwärme der Antriebe über eine Kühlung abgeführt werden. Außerdem ist ein Nachweis der Funktionsfähigkeit aller Bauteile im Vakuum erforderlich. Speziell die Kittschichten der Strahlteiler der Interferometer müssen dazu untersucht werden.

Eine weitere Reduzierung der thermischen Ausdehnung ist durch konstruktive Maßnahmen für die Befestigung des Teilerwürfels an einer verlängerten Prismafläche (vgl. Abb. 4.6, S. 39) und die Ausführung des Referenzarmes möglich. Um auch bei stetig steigenden Längemessbereichen die Totstreckenfreiheit zu realisieren, müssen die Referenzarme entsprechend verlängert werden. Dazu kann ebenfalls der nahezu ausdehnungsfreie Werkstoff Zerodur eingesetzt werden (vgl. Abb. 6.1).

Eine Möglichkeit zur Verringerung der Abweichungen der analogen Interferenzsignale der Planspiegelinterferometer bietet die in [35] bereits vorgeschlagene, online durchführbare

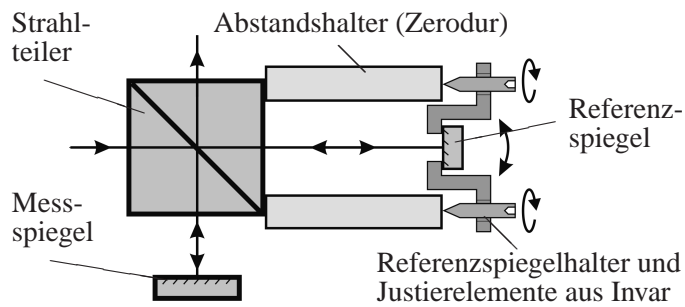


Abb. 6.1: Ausdehnungsoptimierte Halterung des Referenzspiegels durch Abstandshalter aus Zerodur und thermisch symmetrische Befestigung des Referenzspiegels

Ellipsenkorrektur nach dem Heydemann Algorithmus [5, 37]. Die erreichbaren Verbesserungen werden jedoch erst bei rauschärmeren Interferenzsignalen signifikant [68].

Eine Alternative für die Winkelmessung mit photoelektrischen AKF's ist der Einsatz zweier Laserinterferometer je Winkelachse. Um die geforderte Winkelauflösung zu erreichen, sind große Abstände zwischen den beiden Messstrahlen notwendig. Bei einem Rauschen der Längenmessung von 0,3 nm müsste der Strahlabstand beispielsweise mindestens 30 mm betragen. Die Spiegelecke muss um diese Basislänge in allen drei Dimensionen vergrößert werden, wodurch sich Masse, Dynamik, Regelung und benötigte Kräfte des Bewegungssystems verändern. Durch Leichtbau kann dem teilweise entgegengewirkt werden. Zu beachten bleiben der enorme Aufwand und der Kostenzuwachs durch den Einsatz zusätzlicher Interferometer.

Nach diesen Betrachtungen möglicher Maßnahmen zur weiteren Reduzierung der Positionierungsunsicherheit erfolgt im nächsten Kapitel eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten.

7 Zusammenfassung

Zielstellung der vorliegenden Arbeit war die Verringerung der Positionierunsicherheit beim Messen mit der am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der SIOS Messtechnik GmbH entwickelten Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPM-Maschine). Dieses dreidimensionale Positionier- und Messsystem erreicht in einem Messbereich von 25 mm x 25 mm x 5 mm eine Auflösung von 0,1 nm. Durch die Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips, die Korrektur der Winkellage des bewegten Messobjektes, die Verwendung von hochauflösenden Planspiegelinterferometern, den Einsatz eines stabilen metrologischen Rahmens aus Zerodur und die hochgenaue Stabilisierung und Bestimmung der Umweltbedingungen sind besonders geringe Messunsicherheiten erreichbar. Als Ergebnis der in der vorliegenden Dissertation beschriebenen Verbesserungsmaßnahmen konnte die kombinierte Positionierunsicherheit für Langzeitmessungen mit langsamen Bewegungen über den gesamten Messbereich von bis zu 88 nm auf kleiner als 7 nm verringert werden.

Als erster Schritt war die Analyse der vorliegenden Einflussgrößen und der resultierenden Unsicherheitsbeiträge zu Beginn der Arbeit notwendig. Die bereits vorhandenen Modelle für die Positionierunsicherheit an einem einzelnen Punkt wurden dazu erweitert. Als eher typische Messaufgabe wurde die Bestimmung des Abstandes zwischen zwei Messpositionen (Differenzmessung) untersucht. Dabei wurden insbesondere auftretende Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen am Anfang und Ende der Positionierung berücksichtigt und die Empfehlungen des „Leitfadens zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [14] umgesetzt.

Die größten Beiträge zur kombinierten Positionierunsicherheit entstanden bisher durch den Wärmeeintrag der Antriebe und die damit verbundenen Temperaturänderungen. Diese führen zur thermischen Dehnung der Bauteile der Messkette und zu Abweichungen bei der Korrektur der Brechzahl der Luft. Aber auch die Oberflächenabweichungen einer als Messreflektor dienenden Messspiegelecke tragen signifikant zur Positionierunsicherheit bei. Weitere Beiträge entstehen durch die begrenzte Frequenzstabilität des Laserlichtes der Interferometer, die

Abweichungen bei der Erfassung und Verarbeitung der interferometrischen Messsignale und durch die bei Verkippung des Messobjektes entstehenden Abweichungen erster und zweiter Ordnung.

Aus der Analyse der Positionierungsunsicherheit wurden Verbesserungsmaßnahmen für die Konstruktion der Spiegelecke und der Interferometer abgeleitet. Für die Winkelsensoren, die zur Bestimmung der Verkippung des Messobjektes dienen, wurde die Justierung und Kalibrierung verbessert, wodurch eine Verminderung der Unsicherheit bei der Winkelmessung erreicht wurde. Zur weiteren Reduzierung des Temperatureinflusses wurden die vertikalen Antriebe durch eine Gewichtskraftkompensation stärker entlastet und die Temperaturstabilität in der Messkammer durch eine verbesserte Klimatisierung erhöht.

Die neu konstruierte Spiegelecke ist monolithisch aufgebaut und aus Zerodur gefertigt. Dies führt zur Erhöhung der thermischen und mechanischen Stabilität. Zusätzlich wurden Befestigungspunkte an der Spiegelecke geschaffen, die eine statisch bestimmte Lagerung unter Verwendung von V-Nut-Kugel-Paarungen ermöglichen. Die Ausrichtung der Paarungen gewährleistet die Verdrehsicherung um die vertikale z-Achse. Die Befestigungspunkte sind symmetrisch um den Schwerpunkt angeordnet und ermöglichen zusätzlich die Auflage eines Messobjektes, ohne die Spiegelecke zu belasten. Dadurch werden mechanische Spannungen und Durchbiegungen vermindert.

Die wirkungsvollsten Verbesserungen wurden durch die Neugestaltung des mechanischen Aufbaus der Planspiegelinterferometer unter Verwendung des ausdehnungsarmen Materials Invar für die Grundplatte und den Referenzarm erzielt. Zur weiteren Verminderung der thermischen Ausdehnung werden keine Klebeverbindungen mehr im Aufbau eingesetzt. Der Referenzspiegel wird vorderflächig und der Strahlteiler seitlich geklemmt. Die robuste Konstruktion der verlängerten Referenzarme führt zur Erhöhung der mechanischen Stabilität bei gleichzeitiger Reduzierung der Totstreckenlänge. Zusammen mit der genaueren Bestimmung der Umweltparameter sinken dadurch die Einflüsse durch die Brechzahlkorrektur und durch die begrenzte Stabilisierung der Laserfrequenz. Die Abweichungen der analogen Interferenzsignale konnten durch verbesserte Justierkriterien verringert werden, indem die Signale direkt mit den A/D-Wandlern der NPM-Maschine bewertet werden können.

Die Untersuchung der am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik neu entwickelten Winkelsensoren nach dem AKF-Prinzip führte zu Verbesserungen bei der Verarbeitung der photoelektrischen Signale, der Justierung und der Kalibrierung. Die Wandlung der Photoströme in Messspannungen erfolgte bisher durch Auswertung des Spannungsabfalls über einem

Lastwiderstand. Dazu wird nun ein Transimpedanzwandler verwendet. Diese Betriebsart ist deutlich rauschärmer, temperaturstabiler und weist eine erhöhte Linearität auf. Verbesserungen bei der Justierung wurden durch die Verkleinerung der Strahldivergenz erreicht, indem die Messstrahlung auf eine CCD-Matrix fokussiert wurde. Die Richtung der unterschiedlichen Strahlbündel konnte dadurch beurteilt werden. Die Fokussierung der reflektierten Messstrahlung auf die Quadrantenphotoempfänger konnte ebenfalls verbessert werden. Dafür wurde das parallele Licht einer gesonderten Lichtquelle gezielt verkippt, um die Empfindlichkeit des AKF's zu beurteilen. Diese ist ein Maß für den Strahldurchmesser in der Empfängerebene. Als Lichtquelle für das AKF wird nun die Strahlung einer LED durch einen Multimodelichtwellenleiter zugeführt, wodurch sich der Messbereich von 16" x 16" auf 50" x 50" vergrößerte. Der Einsatz eines Referenzsystems, das geringere Messunsicherheiten ermöglicht, die rechen-technische Korrektur von Querempfindlichkeiten zwischen den Winkelachsen des Mess- und Referenzsystems und die Verringerung von Drifterscheinungen zwischen beiden Systemen durch Verkürzung der Messzeit führten zu reduzierten Abweichungen bei der Kalibrierung des Sensors. Die Messunsicherheit sank dadurch von 0,8" auf 0,08".

Die deutlich verbesserte Bestimmung der verbleibenden Winkelabweichungen des Messtisches führte zur Reduzierung der Positionierungsunsicherheit durch Abweichungen erster und zweiter Ordnung bei Verkipnungen des Messobjektes. Durch Verbesserungen bei der Positions- und Winkelregelung, die am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik erarbeitet wurden, entsteht ebenfalls ein Beitrag zur Verringerung dieser Unsicherheitskomponente. Begrenzte die Regelung die Verkipnungen um die horizontalen Messachsen bei Bewegungen des Messtisches bisher auf 0,05", so treten nun maximale Abweichungen von 0,005" auf. Diese können dem Rauschen der Winkelsensoren zugeordnet werden. Die Standardabweichung der nicht ausgeregelten Winkelabweichung um die vertikale Messachse verringerte sich nach dem Einbau der neuen Spiegelecke und dem neuen Aufbau zur Gewichtskraftkompensation von 3" auf 0,75". Die Positionierungsunsicherheit durch Abweichungen erster und zweiter Ordnung sank von etwa 1,8 nm auf 0,6 nm.

Zur Verminderung der eingetragenen Wärmemenge wurde ein neuartiger Mechanismus zur Kompensation der Gewichtskraft, der in vertikaler Richtung bewegten Teile des Messtisches, von mehr als 97% entwickelt. Anstatt von Druckfedern werden dazu Schenkelfedern eingesetzt. Die Kompensationskräfte sind dadurch von der vertikalen Messtischposition nahezu unabhängig. Die Gewichtskraft eines Messobjektes kann zusätzlich berücksichtigt werden. Durch die Variation der verwendeten Federschenkelänge ist die automatische Anpassung an Messobjektmassen bis zu etwa einem Kilogramm möglich. Im Vergleich zur Kompensation

mit Druckfedern sinkt die Gesamtverlustleistung der vertikalen Antriebe für ein Messobjekt mittlerer Masse von ca. 430 g von 0,6–1,65 W auf < 60 mW, abhängig von der Messhöhe und der lateralen Position des Messtisches. Verbleibt er bei Messbewegungen in etwa auf der gleichen Höhe, auf der vor der Messung die Anpassung der Kompensationskraft stattfand, so treten noch geringere Werte von ≤ 11 mW auf. Im Stillstand lassen sich an der optimalen Kompensationsposition Verlustleistungen von < 1 mW erreichen.

Der Einsatz einer am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik gemeinsam entwickelten, effizienteren Klimatisierung der Messkammer führt zu deutlich geringeren Schwankungen der Temperatur mit Standardabweichungen von etwa 8 mK. Dazu wurden Wärmetauscher-elemente an den gesamten Innenflächen der Messkammer, abgesehen von der Grundfläche, angeordnet und ein leistungsfähigerer Thermostat zur Regelung der Temperatur eingesetzt. Das thermische Gleichgewicht kann dadurch weitaus schneller, in wenigen Stunden, erreicht werden. Die im Gehäuse der Interferometer angeordneten Vorverstärker der Interferenzsignale bilden nun ebenfalls signifikante Wärmequellen. Deren thermischer Einfluss auf den Referenzstrahl des Interferometers wurde durch die geschirmte Bauweise des Referenzarmes verringert. Die darin auftretenden maximalen Temperaturdifferenzen betragen lediglich ca. 0,05 K.

Die erzielten Verbesserungen wurden im neuen Unsicherheitsbudget zusammengefasst und zeigen eine Verringerung der kombinierten Positionierunsicherheit $u_c(l)$ von ca. 88 nm auf kleiner als 7 nm für langsame Bewegungen entlang des gesamten Messbereiches. Der Hauptanteil der verbleibenden Positionierunsicherheit resultiert aus der Bestimmung und rechen-technischen Korrektur der Oberflächenabweichungen der Spiegelecke. Weitere signifikante Beiträge entstehen bei der Korrektur der Luftbrechzahl und durch die thermisch bedingte Ausdehnung der Messkette.

Im Anschluss werden zukünftige Maßnahmen zur Reduzierung der Unsicherheit beim Positionieren und damit auch Messen mit der NPM-Maschine erläutert. Durch die Kühlung der Antriebe kann der Wärmeeintrag in das System weiter reduziert werden. Dadurch treten geringere Brechzahlschwankungen entlang der Interferometerstrahlen auf, wodurch Abweichungen bei der Brechzahlkorrektur vermindert werden. Noch geringer werden diese, wenn der mechanische und optische Grundaufbau der NPM-Maschine im Vakuum angeordnet wird. Eine weitere Reduzierung der thermischen Dehnung ist durch die Befestigung des Teilerwürfels an der Teilerschicht und durch die Ausführung des Referenzarmes aus dem nahezu ausdehnungsfreien Werkstoff Zerodur möglich. Die Verringerung verbleibender Abweichungen

der analogen Interferenzsignale ist durch die Korrektur nach dem Heydemann Algorithmus möglich, sobald das Rauschen der Signale reduziert werden konnte. Als Alternative für die Winkelmessung mit photoelektrischen AKF's wird die Verwendung von zwei Laserinterferometern je Winkelachse diskutiert.

A Anhang: Korrekturdaten der neuen Messspiegelecke

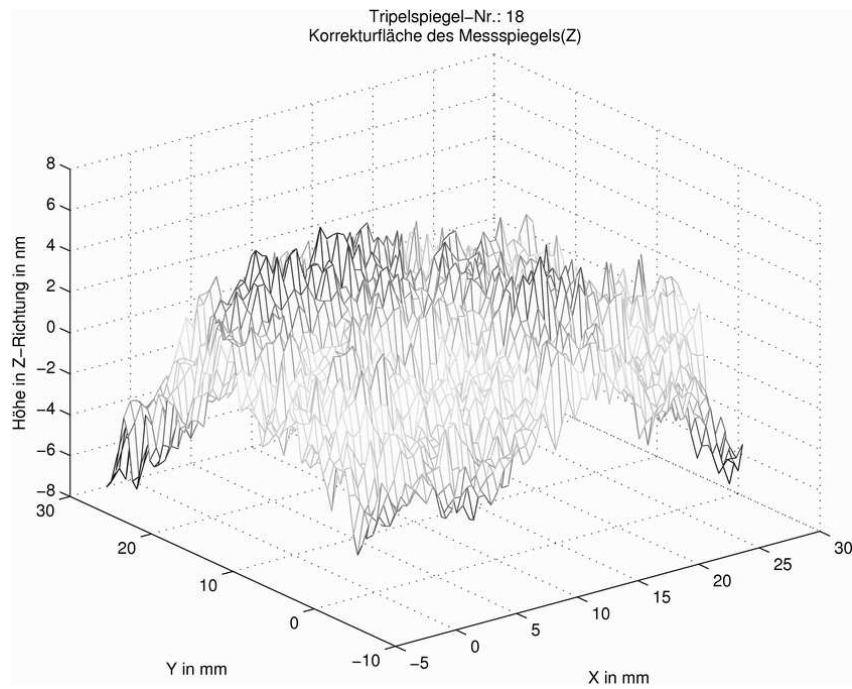


Abb. A.1: Zu korrigierende Fläche A_{mz} der z-Achse

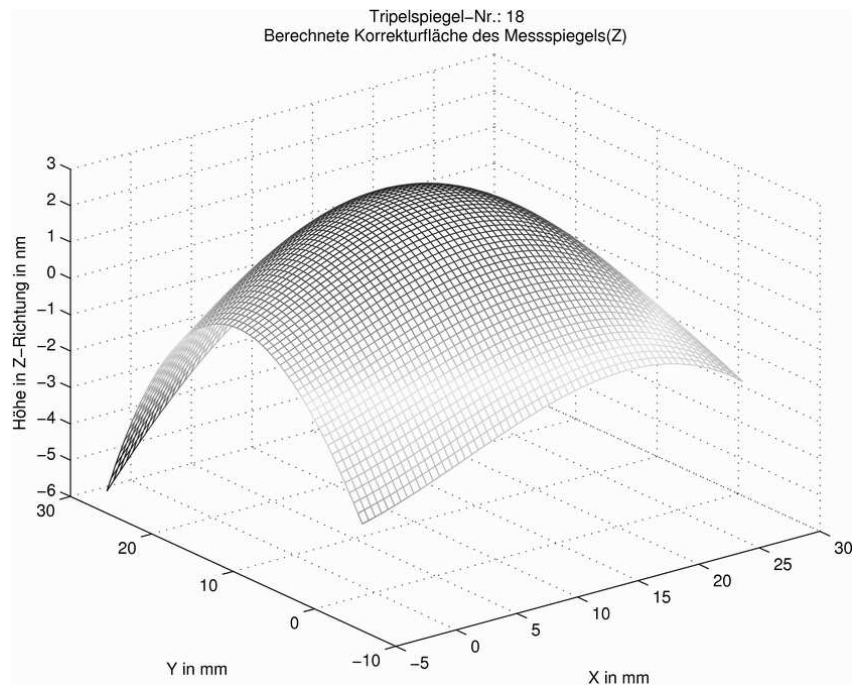


Abb. A.2: Korrekturfächenfunktion A_{rz} der z-Achse

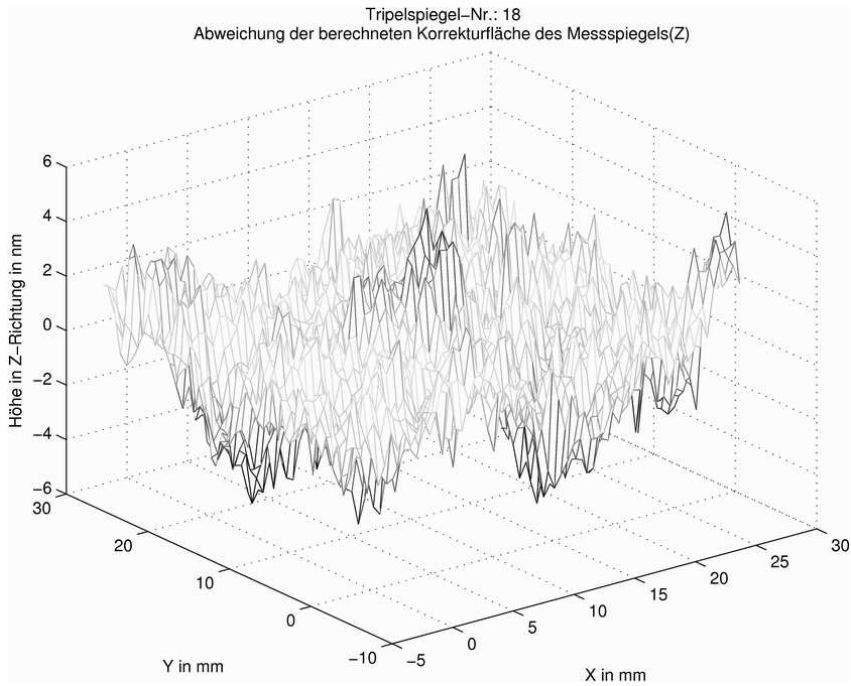


Abb. A.3: Differenz $A_{mz} - A_{rz}$ der z-Achse

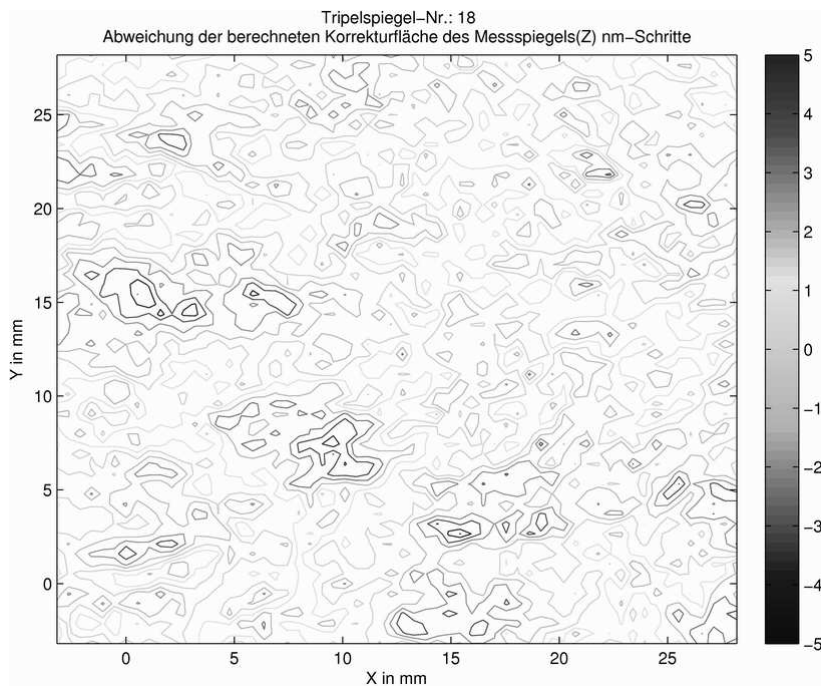


Abb. A.4: Differenz $A_{mz} - A_{rz}$ der z-Achse in nm-Stufen

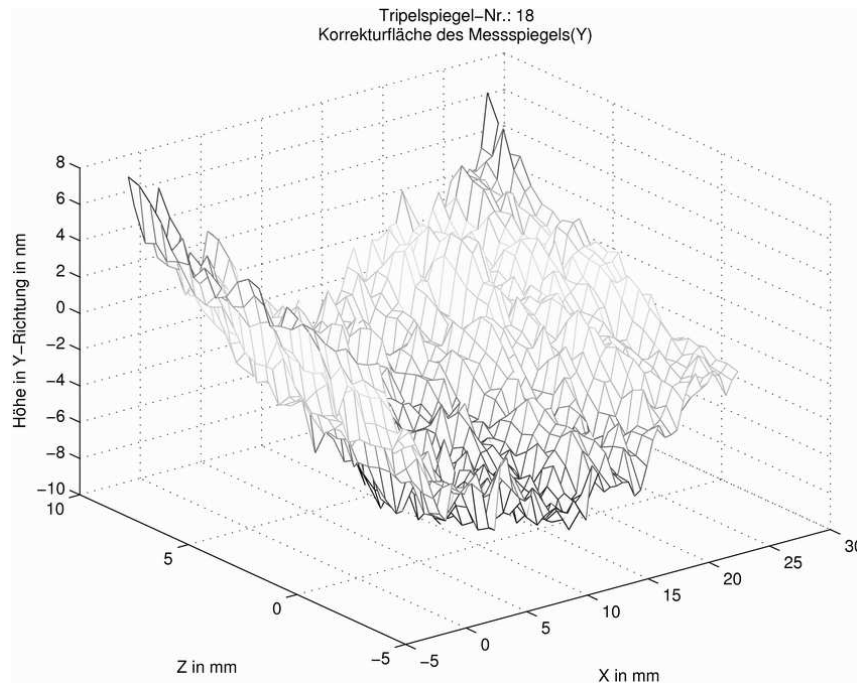


Abb. A.5: Zu korrigierende Fläche A_{my} der y-Achse

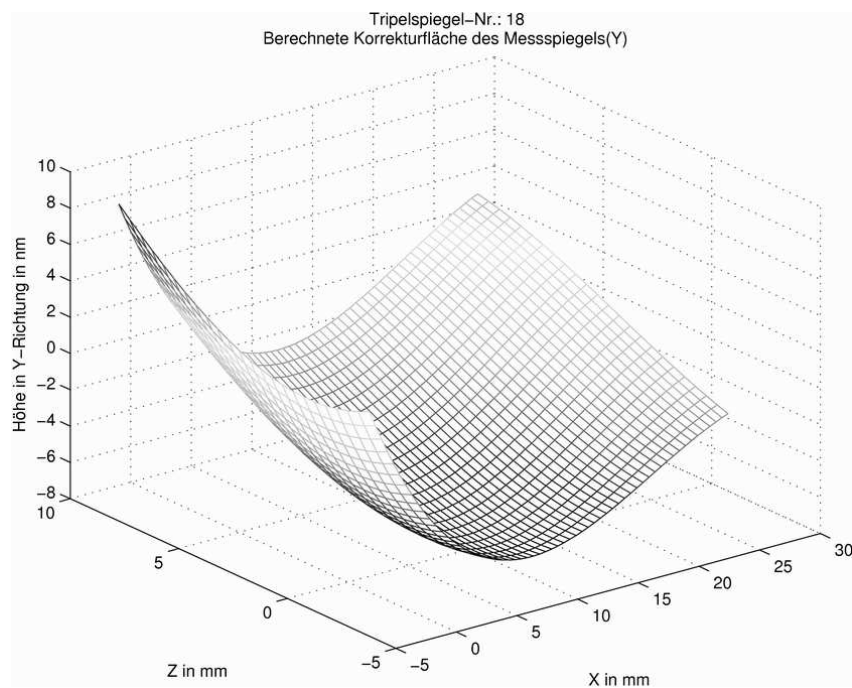


Abb. A.6: Korrekturfächenfunktion A_{ry} der y-Achse

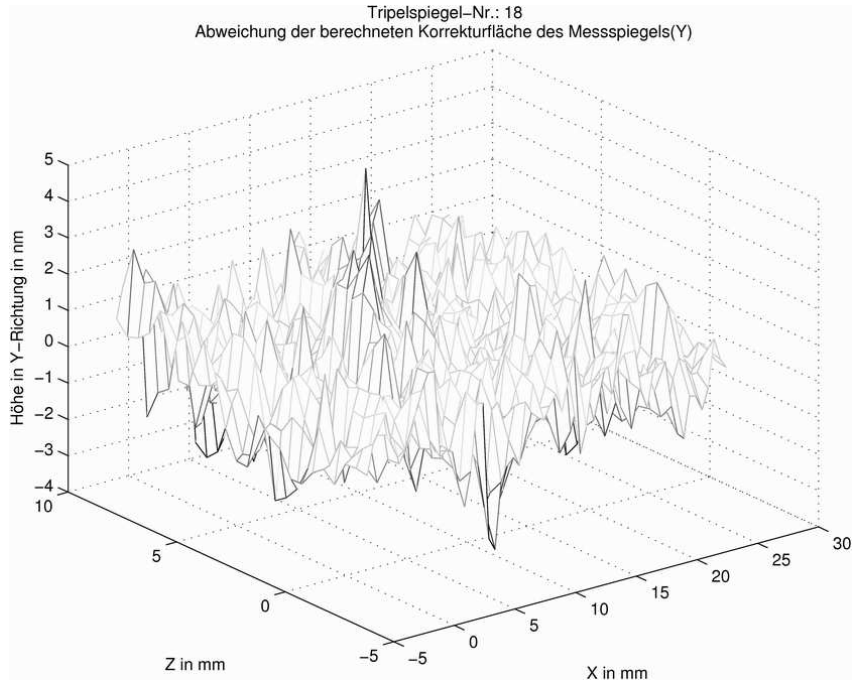


Abb. A.7: Differenz $A_{my} - A_{ry}$ der y-Achse

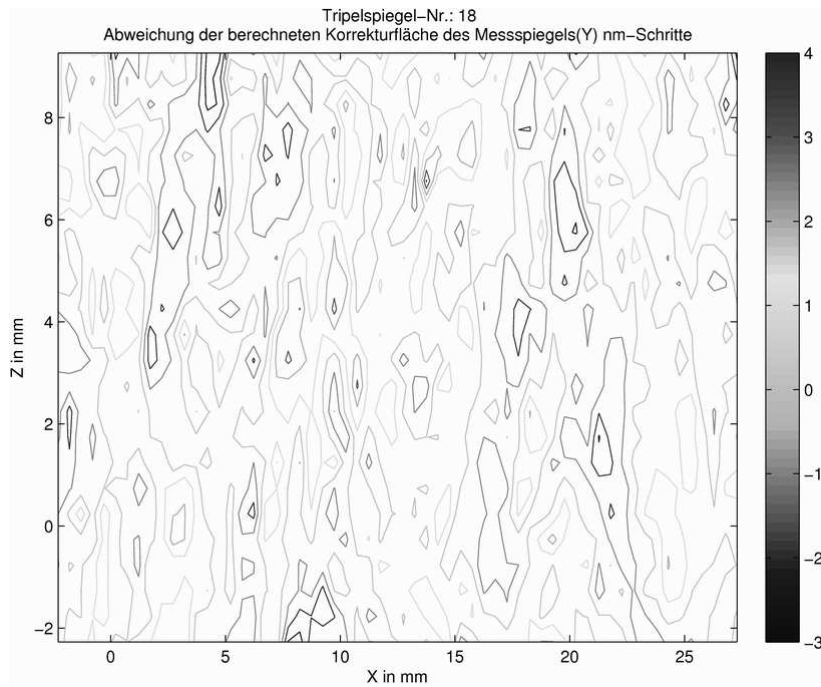


Abb. A.8: Differenz $A_{my} - A_{ry}$ der y-Achse in nm-Stufen

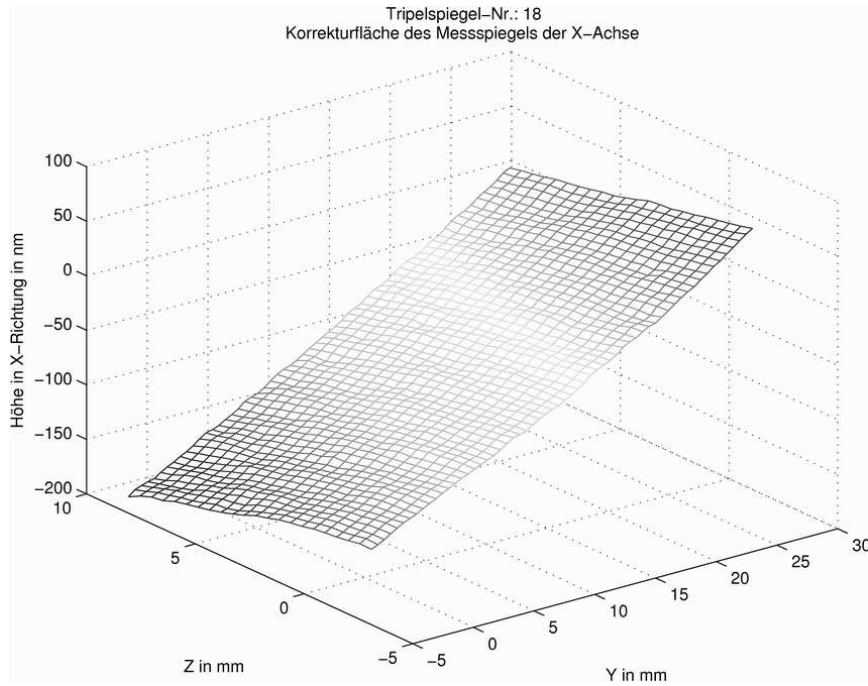


Abb. A.9: Zu korrigierende Fläche A_{mx} der x-Achse

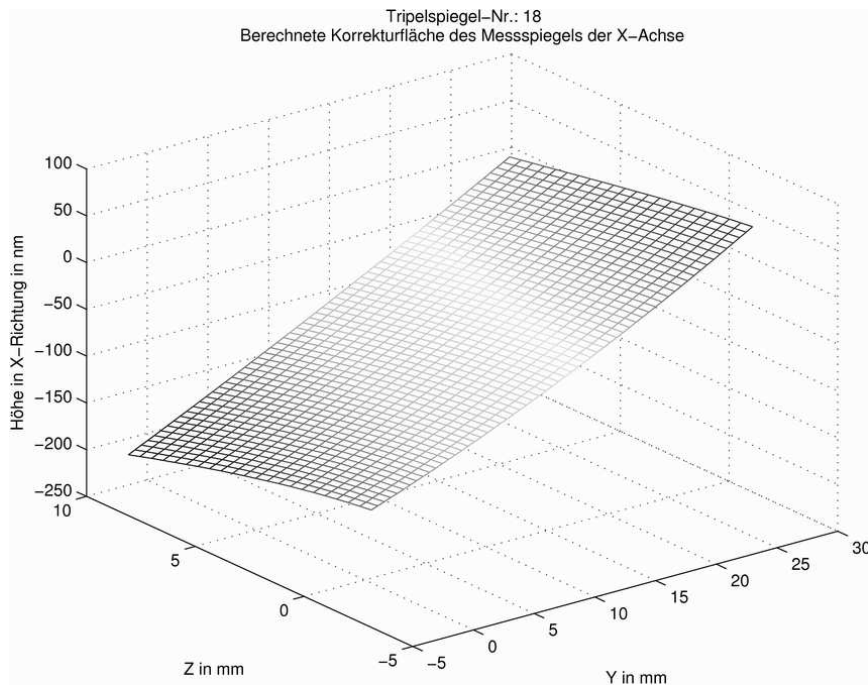


Abb. A.10: Korrekturfächenfunktion A_{rx} der x-Achse

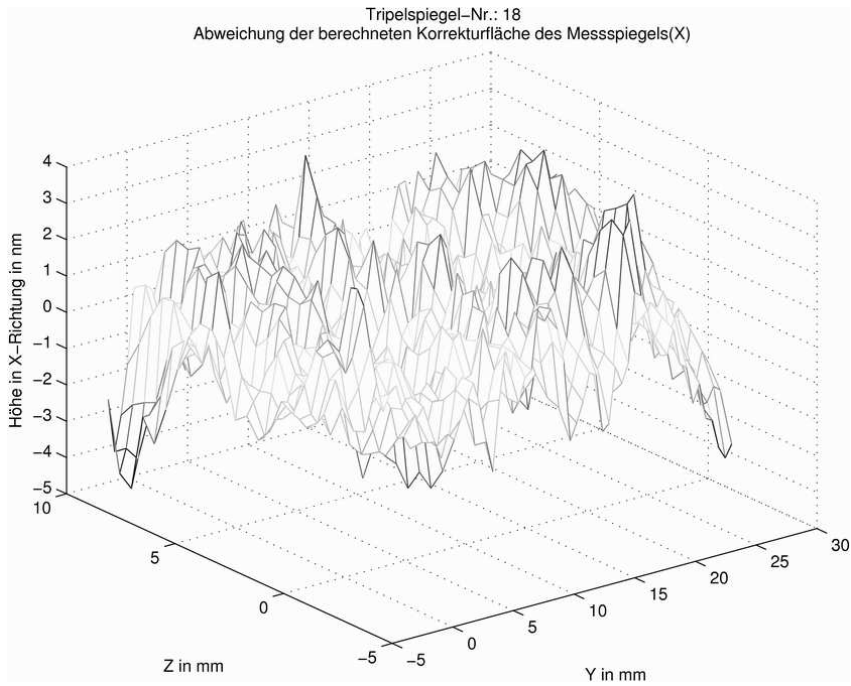


Abb. A.11: Differenz $A_{mx} - A_{rx}$ der x-Achse

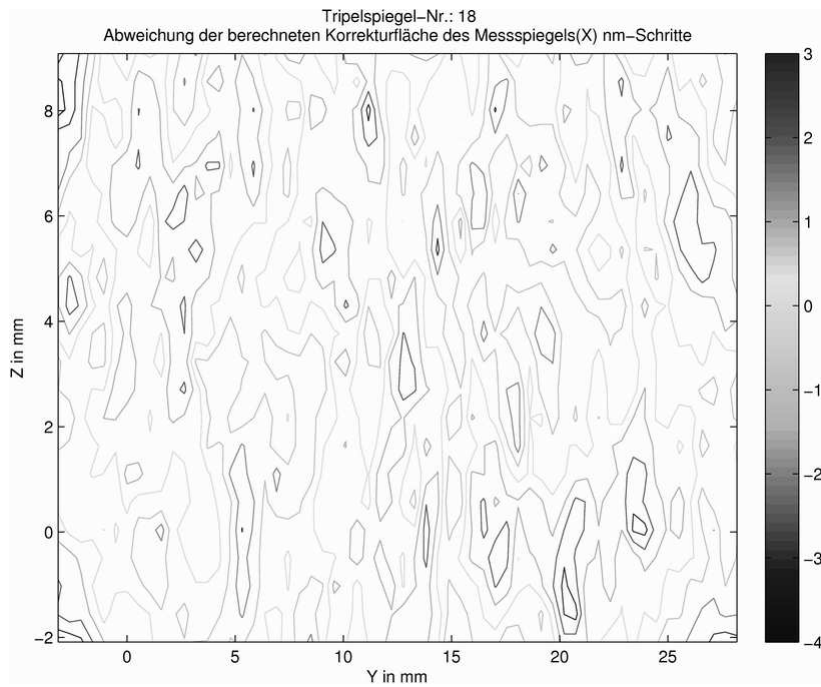


Abb. A.12: Differenz $A_{mx} - A_{rx}$ der x-Achse in nm-Stufen

Literaturverzeichnis

- [1] ABBE, Ernst: Meßapparate für Physiker. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 10 (1890), S. 446–448
- [2] AGILENT TECHNOLOGIES, INC.: *Datenblatt zum Messdatenerfassungs-/Schaltssystem 34970A*, Nov. 1999. – <http://www.home.agilent.com>
- [3] BÜCHNER, H. ; JÄGER, G.: Interferometrisches Meßverfahren zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Meßoberflächen. In: *Technisches Messen* 59 (1992), Februar, Nr. 2, S. 43–47
- [4] BEI SENSORS AND SYSTEMS COMPANY KIMCO MAGNETICS DIVISION: *Motors and Actuators*. REV. 4/97. San Marcos, CA 92069 USA, 1997
- [5] BIRCH, K. P.: Optical Fringe Subdivision with Nanometric Accuracy. In: *Precision Engineering* 12 (1990), Oktober, Nr. 4, S. 195–198
- [6] 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. – ISSN 0026–1394
- [7] BOVSUNOVSKA, Julia: *Untersuchung der Umweltbedingungen an der Nanopositionier- und Nanomessmaschine zur Abschätzung der Messunsicherheit*. 2006. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [8] BRAND, U. ; KLEINE-BESTEN, T. ; SCHWENKE, H.: Development of a Special CMM for Dimensional Metrology on Microsystem Components. In: *ASPE Conf.* Scottsdale Arizona, 22.-27. Oktober 2000, S. 542–546
- [9] BURAKOVA, Elena: *Untersuchungen zur Kalibrierung der Messspiegelecke der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. 2006. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit

- [10] CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH: *Datenblatt F25*. Carl-Zeiss-Str. 22, 73447 Oberkochen, 2006. – <http://www.zeiss.de/f25>
- [11] CARL ZEISS JENA GMBH: *Prüfprotokoll „Tripelspiegel gesprengt SQ1“*. Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena, 1998
- [12] CSN: *Aluminium - Physikalische Eigenschaften*. D-57276 Neunkirchen, Oktober 2000. – <http://www.csnmetals.de>
- [13] DIN: *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Meßwiderstände*. DIN EN 60751:1996-07. Deutsches Institut für Normung e.V., 1996
- [14] DIN: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Vornorm DIN V ENV 13005:1999. Deutsches Institut für Normung e.V., 1999
- [15] DOWNS, M. J. AND BIRCH, K. P.: Bi-directional fringe counting interference refractometer. In: *Precision Engineering* 5 (1983), S. 105–110
- [16] EBERLEIN, D.: *Lichtwellenleiter-Technik*. 6. Aufl. Renningen : expert-Verl., 2006. – 346 S. – ISBN 3–8169–2602–9
- [17] EDLÉN, B.: The refractive index of air. In: *Metrologia* 2(2) (1966), S. 71–80
- [18] FAN, K. C. ; CHU, C. L. ; MOU, J. I.: Development of a low-cost autofocusing probe for profile measurement. In: *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001), S. 2137–2146
- [19] FAN, K. C. ; FEI, Y. T. ; YU, X. F. ; CHEN, Y. J. ; WANG, W. L. ; CHEN, F. ; LIU, Y. S.: Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements. In: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), January, S. 524–532
- [20] FAN, K. C. ; LIN, C. Y. ; SHYU, L. H.: Development of a low-cost focusing probe for profile measurement. In: *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000), S. 1–7
- [21] FESTOZO, Bruno B.: *Vermessung der Spiegeloberfläche der Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM) mit dem Kalibrierinterferometer*. 2005. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [22] FÜSSL, R. ; JÄGER, G. ; GRÜNWARD, R. ; SCHMIDT, I.: A new vectorial model for the estimation of uncertainty in nano coordinate measuring machines. In: *Proceedings*

- of XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 2006
- [23] FRANCK, Jana: *Untersuchungen zu Nichtlinearitäten der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. 2006. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [24] FRÖHLICH, T.: *Praktisch erreichbare Auflösung segmentierter Photoempfänger*. 2005. – Technische Universität Ilmenau, Persönliche Mitteilung
- [25] FUJIWARA, Masanao ; TAKAMASU, Kiyoshi ; OZONO, Shigeo: Evaluation of Properties of Nano-CMM by thermal drift and tilt angle. In: *Proceedings of XVII IMEKO World Congress*. Dubrovnik, Croatia, June 2003, S. 1794–1797
- [26] GE DRUCK GMBH: *Datenblatt Drucksensoren der PDCR4000 Serie*. Postfach 11 04, 61211 Bad Nauheim, 2006. – <http://www.druck.com>
- [27] GE DRUCK GMBH: *Datenblatt Drucksensoren der RPT Serie*. Postfach 11 04, 61211 Bad Nauheim, 2006. – <http://www.druck.com>
- [28] GERHARDT, Uwe: *Signalverarbeitung in der interferometrischen Meß- und Sensortechnik*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 1997
- [29] GERHARDT, Uwe: *Verstärkerschaltungen für Photodioden*. 2005. – Technische Universität Ilmenau, Persönliche Mitteilung
- [30] GERHARDT, Uwe: *Eigenschaften der Auswerteschaltung für den Drucksensor PDCR 4000*. 2006. – Technische Universität Ilmenau, Persönliche Mitteilung
- [31] GOODFELLOW GMBH: *Invar - ausdehnungsniedrige Legierung*. D-61213 Bad Nauheim, September 2000. – <http://www.goodfellow.com/static/G\FE02.html>
- [32] HAFERKORN, H.: *Optik : physikal.- techn. Grundlagen u. Anwendungen*. Frankfurt/M. : Thun, 1981
- [33] HAMAMATSU PHOTONICS: *Si PIN photodiode S6795 - Multi-element photodiodes for surface mounting*, 2005. – Produktbeschreibung. <http://www.hamamatsu.com>

- [34] HAUSOTTE, T. ; SCHMIDT, I. ; MANSKE, E.: Nanopositionier- und Nanomessmaschine für die erweiterten Anforderungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt / Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik. 2002. – Sachbericht
- [35] HAUSOTTE, Tino: *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2002
- [36] HEWLETT-PACKARD COMPANY: *High performance motion control for precision equipment, HP 5527B Laser Position Transducer System*. 5301 Stevens Creek Blvd., Santa Clara 1990. – Produktbeschreibung
- [37] HEYDEMANN, Peter L. M.: Determination and Correction of Quadrature Fringe Measurement Errors in Interferometers. In: *Applied Optics* 20 (1993), Nr. 19, S. 3382–3384
- [38] HOCKEN, R.J. ; TRUMPER, D.L. ; WANG, C.: Dynamics and control of the UNCC-MIT sub-atomic measuring machine. In: *CIRP annals* 50 (2001), Nr. 1, S. 373–376. – ISSN 0007–8506
- [39] HOCKEN, R.J. ; WANG, C.: Progress on the Sub-Atomic Measuring Machine. In: *Nanotechnology and Precision Engineering* 1 (2003), December, Nr. 1, S. 1–6
- [40] HOLMES, Mike ; HOCKEN, Robert ; TRUMPER, David: The Long-Range Scanning Stage: A Novel Platform for Scanned-Probe Microscopy. In: *Precision Engineering* 24 (2000), S. 191–209
- [41] HOSOE, Shigeru: Laser interferometric system for displacement measurement with high precision. In: *Nanotechnology* 2 (1991), S. 88–95
- [42] HOSOE, Shigeru: Highly precise and stable laser displacement measurement with differential optical passes in practical use. In: *Nanotechnology* 4 (1993), S. 81–85
- [43] HOSOE, Shigeru: Highly precise and stable displacement-measuring laser interferometer with differential optical paths. In: *Precision Engineering* 17 (1995), S. 258–265
- [44] IBS PRECISION ENGINEERING: *Datenblatt ISARA*. Esp 201, 5633 AD Eindhoven, Niederlande, 2005. – <http://www.ibspe.com>
- [45] *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*. : *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*, 2004. – <http://public.itrs.net>

-
- [46] ISO: *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. International Organization for Standardization, 1995. – ISBN 92–67–10188–9
- [47] JÄGER, G.: *Fertigungsmess- und Lasermesstechnik*. 1999. – Technische Universität Ilmenau. Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Vorlesungsskript
- [48] JÄGER, G. ; MANSKE, E. ; HAUSOTTE, T. ; SCHOTT, W.: Operation and Analysis of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine. In: CARR, Jeffrey W. (Hrsg.) ; American Society for Precision Engineering (Veranst.): *Proceedings ASPE 2002 Annual Meeting* American Society for Precision Engineering, 2002, S. 299–304
- [49] JONES, F. E.: The refractivity of air. In: *J. National Bureau of Standards* 86(1) (1981), S. 27–32
- [50] KESSEL, Wolfgang: Messunsicherheit - einige Begriffe und Folgerungen für die messtechnische Praxis. (2001), Nr. 3, S. 226–244. – PTB-Mitteilungen 111
- [51] KIESEL, Felix: *Untersuchungen zur Gewichtskraftkompensation des Positioniersystems der z-Achse der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2006
- [52] KOCH, Amelia: *Numerische Berechnungen zur Verformung der Spiegelecke der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. 2005. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [53] KRAMAR, J. ; AMATUCCI, E. ; GILSINN, D. ; JUN, J.-S. ; PENZES, W. ; SCIRE, F.: Toward nanometer accuracy measurements. In: *Proceedings of SPIE Conference on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIII* Bd. 3677. Bellingham, Wash. : SPIE, 1999, S. 1017–1028
- [54] KRAMAR, J. ; JUN, J. ; PENZES, W. ; SCIRE, F. ; TEAGUE, C. ; VILLARRUBIA, J. ; AMATUCCI, E. ; GILSINN, D.: The Molecular Measuring Machine. In: *International Conference on Mechatronic Technology*. Gaithersburg, MD 20899 USA, 1998, S. 477–487
- [55] KRAMAR, John A.: Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), September, S. 2121–2128

- [56] LABORATORY FOR PRECISION ENGINEERING AND METROLOGY: *Billionth Uncertainty Precision Engineering (BUPE)*. Gusungdong Yusunggu, Taejon, South Korea: KAIST, November 2006. – <http://pem.kaist.ac.kr/bupe/>
- [57] LASSILA, A.: Studies on the acoustic method for determination of the effective air temperature and refractive index of air / EUROMET Length project 744. 2004. – Forschungsbericht. – <http://www.npl.co.uk/euromet/length/projects/forms/744-final.pdf>
- [58] LASSILA, A. ; KORPELAINEN, V.: An acoustic method for determination of the effective temperature and refractive index of air. In: DECKER, Jennifer E. (Hrsg.) ; BROWN, Nicholas (Hrsg.): *Proceedings of SPIE Recent Developments in Traceable Dimensional Measurement 2* Bd. 5190, SPIE, 2003, S. 316–326
- [59] LEACH, Richard ; HAYCOCKS, Jane ; JACKSON, Keith ; LEWIS, Andrew ; OLDFIELD, Simon ; YACOOT, Andrew: Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory. In: *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001), S. R1–R6
- [60] LOCTITE DEUTSCHLAND GMBH: *Technisches Datenblatt Produkt 366*. Arabellastraße 17 D-81905 München, Januar 1990. – <http://www.loctite.com>
- [61] MEISER, H.-P. ; LUHS, W. ; FRERKING, D.: Neue relative und absolute Laserinterferometer-Refraktometer für die Messung der Brechzahl von Luft, Gasen und Flüssigkeiten. In: *VDI-Bericht 749* (1989), S. 107 ff.
- [62] MELI, Felix ; KÜNG, Alain ; THALMANN, Rudolf: Ultrapräzises Koordinatenmessgerät für Mikroteile. In: *MetInfo* 12 (2005), Nr. 3, S. 4–10
- [63] MICRO SWITCH, HONEYWELL INC.: *Datenblatt Feuchtesensor H1H-3602-A*. 11 West Spring Street, Freeport, Illinois 61032, September 2006. – <http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/humiditymoisture/>
- [64] MITEL SEMICONDUCTOR: *High Performance LED 1A288 and 1A191*, 1994. – Product Information
- [65] MÖLLER-WEDEL OPTICAL GMBH: *Elcomat HR, Elektronischer Autokollimator*, 2003. – Bedienungsanleitung

-
- [66] ORLOB, Matthias: *Analyse und Vergleich der Topographie der Spiegelecken verschiedener Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit dem Kalibrierinterferometer*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2007
- [67] OTTO, Andreas: *Optimierung des Regelungssystems der Nanomessmaschine*. November 2004. – Technische Universität Ilmenau, Studienjahresarbeit
- [68] PERCLE, Brandon: *Ellipsenregression und deren Anwendung in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. 2006. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [69] PLASSKY, Norman: *3D-Koordinatenmessmaschine im Nanometerbereich*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Oktober 2002
- [70] PRÄZISIONS GLAS & OPTIK GMBH: *Produktkatalog*. Hegestück 11 D-58640 Iserlohn, Germany, November 2005. – <http://www.pgo-online.de>
- [71] PÖSCHEL, Wolfgang: *Beeinflussung der Polarisationsseigenschaften durch mechanische Spannungen*. 2005. – SIOS Messtechnik GmbH, Persönliche Mitteilung
- [72] RECKNAGEL, Kristin: *Entwicklung eines optischen Winkelmessgerätes*. April 2003. – Technische Universität Ilmenau, Studienarbeit
- [73] RENKENS, M. J. ; SCHELLEKENS, P. H.: An Accurate Refractometer Based on a Permanent Vacuum Chamber - Development and Results. In: *Annals of the CIRP* Bd. 41, 1993, S. 581–583
- [74] ROSS, Douglos A.: *Optoelektronik: Bauelemente und optische Abbildungsmethoden*. München : Oldenbourg. – 168 S. – ISBN 3–486–26741–8
- [75] ROTH, E. ; GAIDA, K-H.: Subpixeling verbessert die Auflösung von CCD-Längenmeßsystemen. In: *Messen Steuern Regeln* 11-12 (1992), S. 14
- [76] RUIJL, Theo Anjes M.: *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine*, Technische Universität Delft, Diss., February 2001
- [77] SARTORIUS AG: *Sartorius Master pro Serie. LP-Modelle. Elektronische Präzisionswaagen. Modell LP620S*. Weender Landstrasse 94-108, D-37075 Göttingen, Germany, 2006. – http://www.sartorius.de/fileadmin/sartorius_pdf/alle/MAN-LP-d.pdf

- [78] SCHAUMBURG, H.: *Sensoren*. B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 1992. – ISBN 3–519–06125–2
- [79] SCHÄFTER + KIRCHHOFF GMBH: *CCD-Zeilenkameras*, 2005. – Produktbeschreibung. <http://www.sukhamburg.de>
- [80] SCHMIDT, I.: *Aufbau und Untersuchung eines optischen Winkelmeßgerätes*, Technische Universität Ilmenau, Studienarbeit, April 2001
- [81] SCHMIDT, I.: *Untersuchung des Temperaturverhaltens der Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, September 2001
- [82] SCHMIDT, I. ; JÄGER, G. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; FÜSSL, R.: A new traceable method for determination of periodic nonlinearities of interferometers. In: CREATH, Katherine (Hrsg.) ; SCHMIT, Joanna (Hrsg.): *Proceedings of SPIE Optics and Photonics: Interferometry XIII: Techniques and Analysis* Bd. 6292, 629206. Bellingham, Wash. : SPIE, 2006
- [83] SCHOTT GLASWERKE: *Zerodur - Präzision aus Glaskeramik*. – Produktbeschreibung. http://www.schott.com/optics_devices/german/products/zerodur/
- [84] SEGGELEN, J.K.v.: *Nano Coordinate Measuring Machine*, 2006. – <http://www.nanocmm.eu/f51c9f987a134a101/index.html>
- [85] SEGGELEN, J.K.v. ; ROSIELLE, P. C. J. N. ; SCHELLEKENS, P. H. J. ; SPAAN, H. A. M. ; BERGMANS, R. H.: Design of a 3D-Coordinate Measuring Machine for measuring small products in array. In: *Proceedings of the 4th euspen International Conference*. Glasgow, Scotland UK : European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, May 2004
- [86] SEGGELEN, J.K.v. ; ROSIELLE, P. C. J. N. ; SCHELLEKENS, P. H. J. ; SPAAN, H. A. M. ; BERGMANS, R. H. ; KOTTE, G. J. W. L.: Design and calibration of an elastically guided CMM axis with nanometer repeatability. In: DECKER, Jennifer E. (Hrsg.) ; PENG, Gwo-Sheng (Hrsg.): *Proceedings of SPIE Conference on Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements III* Bd. 5879. Bellingham, Wash. : SPIE, 2005

-
- [87] SERVICE FÜR MESSTECHNIK GERABERG GMBH: *Datenblatt Platin-Widerstandsthermometer*. 98716 Ilmenau, Juni 2006
- [88] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor, Serie SP*. Ilmenau, Oktober 2000. – <http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/SP1.HTM>
- [89] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Stabilisierter He-Ne-Laser, Serie SL*. Ilmenau, November 2000. – <http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/SL1.HTM>
- [90] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Anleitung zum positionsempfindlichen Detektor mit Quadrantendiode*. Ilmenau, August 1998
- [91] SOMMER, K.-D. ; SIEBERT, B.R.L.: Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. In: *Technisches Messen* 71 (2004), Nr. 2, S. 52–66
- [92] SOMMER, K.-D. ; SIEBERT, B.R.L.: Systematische Modellbildung und Grundsätze der Bereichskalibrierung. In: *Technisches Messen* 72 (2005), May, Nr. 5, S. 258–277
- [93] STEINMETZ, C. ; BURGOON, R. ; HERRIS, J.: Accuracy Analysis and Improvements to the Hewlett-Packard Laser Interferometer System. *Interferometric Metrology, Critical Reviews of Optical Science and Technology*, N.A. Massie. In: *Proceedings of SPIE Vol. 816* (1988), S. 79–91
- [94] TIANCHU LI: Design principles for laser interference refractometers. In: *Measurement* 16 (1995), S. 171–176
- [95] TIETZE ; SCHENK: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 11. Auflage. Springer, 1999
- [96] TOKIO UNIVERSITY, DEPARTMENT OF PRECISION MACHINERY ENGINEERING: *Development of Nano-CMM*. Tokyo, Japan, Juni 2006. – <http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp/xnanocmm-e.html>
- [97] TRIOPTICS GMBH - OPTISCHE INSTRUMENTE: *OptiTest® - a complete range of Optical Instruments*, 2003. – Produktbeschreibung
- [98] TRIOPTICS GMBH - OPTISCHE INSTRUMENTE: *OptiWinkel*, 2003. – Bedienungsanleitung

- [99] TSUTSUMI, Hideki ; YOSHIKUMI, Keiichi ; TAKEUCHI, Hiroyuki: Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer. In: WANG, Yongtian (Hrsg.) ; WENG, Zhicheng (Hrsg.) ; YE, Shenghua (Hrsg.) ; SASIÁN, José M. (Hrsg.): *Proceedings of SPIE Optical Design and Testing II* Bd. 5638. Bellingham, Wash. : SPIE, 2005, S. 387–394
- [100] VERMEULEN, Marcus Martinus Petrus A.: *High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine*, Technical University Eindhoven, Diss., 1999
- [101] VOGELER, Stefan G.: *Kalibrieranordnung für optoelektronische Winkelsensoren*. September 2002. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [102] VOGELER, Stefan G.: *Positionsregelung von linearen Präzisionsantrieben*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, September 2003
- [103] WEIS, Hanna S.: *Erstellen eines FEM-Modells für eine Temperaturfeldbetrachtung an der NPM-Maschine*. 2006. – Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit
- [104] WEIS, Hanna S.: *Numerische und messtechnische Untersuchungen zum Temperaturverhalten in Präzisionsmesssystemen*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2006
- [105] WÖGER, Wolfgang: Zu den modernen Grundlagen der Datenauswertung in der Metrologie. (2001), Nr. 3, S. 210–225. – PTB-Mitteilungen 111
- [106] WILKENING, G.: Kompensation der Luftbrechzahl. In: *VDI - Bildungswerk (BW 9388)* 5 (1983), S. 105–110
- [107] WURMUS, Jens: *Stabilisierung von He-Ne-Lasern für die interferenzoptische Meßtechnik*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2004
- [108] XU, Haifeng: *Messtechnische Untersuchungen von hochpräzisen Planflächen mit einem Zygo-Phasenschiebeinterferometer*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2006
- [109] ZILL, Heinz ; HULTZSCH, Erasmus ; LIPPERT, Erhard: *Messen und Lehren im Maschinenbau und in der Feingerätetechnik*. 3. Auflage. VEB Verlag Technik Berlin, 1974
- [110] ZYGO CORPORATION: *GPI Family of Interferometers*. Middlefield, CT 06455-0448 USA, Januar 2001. – <http://www.zygo.com\gpi\gpifam.htm>