

Präzisionsprüfgerät für Nanomesstaster

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

von MSc Yung-Cheng Wang,
geboren am 20. 06. 1968 in Lukang, Taiwan

eingereicht am 02.10.2002
verteidigt am 28.01.2003

Gutachter:

Prof. G. Jäger: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau,
Fachgebiet Prozeßmeßtechnik

Prof. G. Höhne: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau,
Fachgebiet Konstruktionstechnik

Prof. K. Hasche: Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Abteilung 5: Fertigungsmeßtechnik, Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Liste der Abkürzungen und Formelzeichen.....	5
1 Einleitung	7
2 Überblick über Präzisionsmesstaster und deren Überprüfung	9
2.1 Präzisionsmesstaster	9
2.2 Prüfverfahren von Präzisionsmesstastern.....	10
3 Messprinzipien und Grundlagen des Präzisionsprüfgerätes.....	15
3.1 Aufgabenstellung und Messprinzip des Präzisionsprüfgerätes	15
3.2 Probleme der Prüfaufgabe	16
3.3 Anforderungen an ein Laserinterferometer zur Präzisionsprüfung	18
3.3 Wirkungsweise des Laserinterferometers.....	19
3.4 Einführung von Winkelsensor und Winkelregler.....	22
4 Aufbau des Präzisionsprüfgerätes	23
4.1 Beschreibung des Präzisionsprüfgerätes	23
4.2 Funktionen und Aufgaben des Präzisionsprüfgerätes	23
4.2.1 Mechanischer Aufbau des Präzisionsprüfgerätes	23
4.2.1.1 Mechanische Konstruktion.....	23
4.2.1.2 Eigenschaften der Führungen.....	25
4.2.1.3 Eigenschaften des motorischen Antriebs	26
4.2.1.4 Eigenschaften und Aufgaben der Piezotranslatoren.....	28
4.2.2 Planspiegelinterferometer im Präzisionsprüfgerät	29
4.2.3 Aufbau des Winkelsensors und Winkelreglers	30
4.2.3.1 Aufgabe des Winkelsensors	30
4.2.3.2 Signalverarbeitung des Winkelsensors.....	31
4.2.3.3 Kalibrierung des Winkelsensors mittels Autokollimationsfernrohr.....	31
4.2.3.4 Aufgabe des Winkelreglers	32
4.2.3.5 Zusammenwirken mit Piezotranslatoren.....	33
4.2.4 Längenfeinregler	35
4.3 Überblick über die zu prüfenden Messtaster	36
4.4 Aufgaben der Auswerteeinheiten	38
4.5 Signalverarbeitung.....	39

4.5.1 Übersicht der Signalverarbeitung.....	39
4.5.2 Messgeräte (Präzisionsprüfgerät und Messtaster).....	39
4.5.3 Elektronik.....	39
4.5.4 Software	40
4.6 Prüfprogramm.....	41
4.6.1 Darstellung des Prüfablaufes	41
4.6.2 Angewendete Software und das entsprechende Messprogramm.....	43
4.6.3 Auswertung und Analyse der Messwerte.....	45
4.6.4 Kalibrierbericht	45
5 Analyse der Fehlerquellen und der Messunsicherheit des Präzisionsprüfgerätes.....	47
5.1 Messfehler aus dem Interferometer	47
5.1.1 Messfehler durch Änderung der Lichtwellenlänge.....	48
5.1.1.1 Wellenlängenstabilität und -genauigkeit.....	48
5.1.1.2 Wellenlängenänderung durch Umwelteinflüsse.....	49
5.1.2 Messfehler durch Interferenzphase	50
5.1.3 Messfehler durch Totstrecke	52
5.1.4 Interpolationsfehler	53
5.2 Messfehler aus der Mechanik.....	54
5.2.1 Ursachen zur Messabweichungen durch konstruktive Anordnungen.....	54
5.2.1.1 Theoretische Analyse der mechanischen Messfehler.....	55
5.2.1.2 Einfluss des Kippwinkels auf das Interferenzsignal im Präzisionsprüfgerät.....	59
5.2.2 Minimierung der Messabweichungen durch konstruktive Anordnungen.....	59
5.2.2.1 Justierverfahren der Fluchtung und der Parallelität der Achsen	59
5.2.2.2 Überprüfung der Flucht zwischen der Messachse des Messtasters und des Interferometers im Präzisionsprüfgerät.....	63
5.2.3 Mechanische Deformation	64
5.2.3.1 Experimentelle Untersuchungen der mechanischen Deformation.....	65
5.2.3.2 Kompensation mit ermittelter Kennlinie.....	66
5.2.4 Einfluss der thermischen Ausdehnung.....	67
5.2.4.1 Ermittlung des thermischen Faktors des Prüfgerätes mit theoretischer Analyse.....	68
5.2.4.2 Ermittlung des thermischen Faktors des Messtasters.....	71
5.2.4.3 Ermittlung des thermischen Faktors des Prüfgerätes mit praktischer Untersuchung	73
5.2.4.4 Schlussfolgerung der Analyse des Ausdehnungsfaktors.....	74
5.2.5 Einfluss der Messkraft	74
5.2.5.1 Theoretische Analyse	74
5.2.5.2 Experimentelle Untersuchung der Verteilung der Messkraft des Messtasters	75
5.3 Unsicherheitsbudget	76
6 Untersuchung des Präzisionsprüfgerätes.....	79
6.1 Bedeutung der Überprüfung	79

6.2 Zur Vergleichsmessung angewandete Messtaster	79
6.2.1 Taktile Messtaster	79
6.2.2 Optischer Messtaster	79
6.3 Voraussetzungen zur Ermittlung der Messgenauigkeit des Präzisionsprüfgerätes	81
6.4 Untersuchung der Stabilität	81
6.4.1 Stabilität des Messtasters	82
6.4.2 Stabilität des Präzisionsprüfgerätes	83
6.4.3 Stabilität des Gesamtsystems (Messtaster und Präzisionsprüfgerät)	84
6.4.4 Stabilität des Winkelsensors	84
6.4.5 Stabilität der Winkelregelung	85
6.5 Untersuchung der Wiederholbarkeit.....	86
6.5.1 Statische Wiederholbarkeit	86
6.5.2 Wiederholbarkeit an zwei Punkten	88
6.5.3 Wiederholbarkeit des Winkelreglers.....	89
6.6 Durchführung der Messabläufe	90
6.6.1 Messergebnisse der Vergleichsmessung	90
6.6.2 Rechnerische Korrektur der Lageänderung	92
6.6.3 Einfluss größerer Temperaturänderungen.....	93
6.6.4 Hysterese des taktilen Messtasters	95
7 Eliminierung des Einflusses von Lageänderungen	97
7.1 Umbau des Referenzspiegels und Untersuchung der neuen Lageänderung.....	97
7.1.1 Referenzspiegel auf der Deckplatte	97
7.1.2 Untersuchung neuer Lageänderung	98
7.1.3 Untersuchungen der Stabilität von neuen Konstruktion	98
7.2 Lageänderungsuntersuchung	99
7.2.1 Einfluss der Spannkraft der Kugelführungen auf die Lageänderung.....	99
7.2.2 Eliminierung der Deformation durch Justierung	100
7.2.3 Vergleichsmessungen mit dem taktilen und optischem Messtaster.....	101
7.3 Weitere Möglichkeit zur Minimierung der Lageänderung.....	103
7.3.1 Externer Antrieb.....	103
7.3.2 Trennung von Interferometer und Bewegungsteil bezüglich auf vorhandener Konstruktion.....	104
8 Zusammenfassung.....	105
9 Literatur	107

Liste der Abkürzungen und Formelzeichen

I: gesamte Intensität
 I_1 : Intensität des Fotoempfänger 1
 I_2 : Intensität des Fotoempfänger 2
 ψ : interferenzoptische Phase
 t: Zeit
 $s(t)$: Modulation vom Referenzspiegel
 s_0 : Schwingamplitude
 h: Schwingarm
 ω : Frequenz des Schwingers
 ϵ : Schwingwinkel vom Referenzspiegel
 ψ_w : von Kippwinkel verursachten Phasenwinkel
 U: Ausgangsspannung des Winkelsensors
 l: Längenwert
 Δl : Längenänderung oder -abweichung
 n: Brechzahl der Luft
 λ_0 : Vakuumwellenlänge
 z: Zählerstand
 e: elektronischer Interpolationsfaktor
 λ : aktuelle Wellenlänge
 E: elektromagnetische Welle des einfallenden Laserlichtes
 w_0 : Strahlradius in der Taille
 $w(z)$: Strahlradius in der Stelle z
 r: Abstand des Punktes der x, y- Ebene von der z- Achse
 R: Krümmungsradius
 z_0 : Ort der Strahltaile
 z: Koordinate in Ausbreitungsrichtung
 Φ_L : longitudinaler Phasenterm
 Φ_T : transversaler Phasenterm
 f: Brennweite der Kollimatorlinse
 ϕ_i : Kippwinkel der Planparallelplatte
 l_{path} : optische Strecke zwischen dem Messkörper und dem Fotoempfänger
 d' : Dicke der Planparallelplatte
 α : Kippwinkel des Messkörpers in x-Richtung
 β : Kippwinkel des Messkörpers in y-Richtung
 γ : Kippwinkel des Messkörpers in z-Richtung
 λ_K : ständig korrigierte Wellenlänge
 λ_{K0} : korrigierte Wellenlänge beim Startpunkt
 θ : Phase der Interpolation
 K: Amplitude der Ausgangssignale
 O: Offset
 ϕ_c : konstanter Kippwinkel zwischen beiden Messachsen
 ϕ_T : Verkippung des Messkörpers
 ϕ_k : Keilwinkel des Messkörpers
 ϕ_F : Kippwinkel zwischen Messachse und Führungsbahn
 v: Versatz zwischen beiden Messachsen
 d: Dicke des Messkörpers

ϕ_a : Kippwinkel des Messkörpers zur Messachsen vor der Messverschiebung
 ϕ_b : Kippwinkel des Messkörpers zur Messachsen nach der Messverschiebung
 l_a : Abstand zwischen Strahlteiler und Messkörper vor der Messverschiebung
 l_b : Abstand zwischen Strahlteiler und Messkörper nach der Messverschiebung
a: Streifenabstand
p: Druck
 ϑ : Temperatur
rf: relative Feuchtigkeit (%)
 p_w : absolute Feuchtigkeit (hPa)
 Δl_ϑ : Längenänderung der thermischen Ausdehnung
 α_i : thermische Längenausdehnungskoeffizient
 ϑ_{i_0} : Temperatur beim Startpunkt
 ϑ_i : aktuelle Temperatur
 Δu : Abplattungsänderung
 E_k : Elastizitätsmodul der Kugel
 E_e : Elastizitätsmodul des Kontaktebene
 ν : Poisson-Konstante
F: Messkraft beim Startpunkt
 r' : Kugelradius des Messbolzens
 ΔF : Änderung der Messkraft
 u_c : Messunsicherheit

1 Einleitung

In der Fertigungsmesstechnik spielt die eindimensionale Längenmesstechnik schon immer eine wichtige Rolle /1-1/. Durch den Einsatz von Längenmesstastern können viele verschiedene Größe (Längen, Tiefe, Durchmesser, usw.) geprüft werden, um die Qualität von Produkten sichern zu können.

Die Entwicklungstendenz zeigt /1-2, 1-3/, dass die Anforderungen an die Messgenauigkeit immer mehr ansteigen. Für eine genaue Längenmessung im Mikrometer- und Submikrometer-Bereich werden elektronische (induktive oder kapazitive Messtaster) oder optische Messgeräte (Glasmaßstäbe oder Interferometer) verwendet.

Die induktiven und kapazitiven Messtaster besitzen bei einer hohen Auflösung im Nanometerbereich meistens nur kleine Messbereiche von einigen zehn Mikrometern. Es gibt solche Sensoren auch für größere Messbereiche, aber mit wesentlich schlechterer Auflösung ($> 1\mu\text{m}$) /1-4/. Für die steigenden Präzisionsanforderungen gewinnen deshalb Messtaster mit optischen Messprinzipien an Bedeutung, die eine hohe Auflösung und gleichzeitig größere Messbereiche von 20 bis 60 mm ermöglichen.

So wurde z.B. an der TU Ilmenau ein interferenzoptischer Messtaster mit einem integrierten Miniaturinterferometer entwickelt und seit einigen Jahren von der SIOS Messtechnik GmbH produziert. Er besitzt bei einem Messbereich von 20 mm (bzw. 60 mm) eine Auflösung von 1 nm und eine Messunsicherheit < 20 nm. Dieser Messtaster kommt aufgrund seines großen Messbereiches und der kleinen Fehlergrenzen anstelle induktiver Längenmessaufnehmer, z.B. für den Einsatz in Endmaßprüfgeräten, in Betracht /1-5/. In /1-6/ wird nachgewiesen, dass durch den Einsatz des interferenzoptischen Messtasters die Kalibrierung von Endmaßen wesentlich leistungsfähiger wird, weil dabei nur wenige Bezugsnormale gebraucht werden (die Anzahl um Faktor 10 reduziert).

Bei der Fertigung solcher Messtaster ist ebenfalls eine Überprüfung oder Kalibrierung erforderlich, damit deren Qualität und Genauigkeit garantiert werden kann. Trotz oder gerade wegen der hohen Präzision derartiger interferenzoptischen Messtaster ist diese Prüfung mit Auflösungen im Nanometerbereich und einem Messbereich bis 60 mm von großer Bedeutung und stellt eine anspruchsvolle Aufgabenstellung dar. Bisher gibt es jedoch kein passendes Prüfgerät, das diese Prüfaufgabe realisieren kann. Gegenwärtig ist es nur möglich, diese Messtaster in einem Endmaßprüfplatz gegen einen Satz von hochgenauen Endmaßen zu prüfen.

Offensichtlich bestehen zwei Probleme bei dieser Prüfmethode. Einerseits wird mit diesem Verfahren die Genauigkeit der Prüfung auf die Genauigkeit der Endmaße beschränkt, die selbst bei den genauesten Endmaßen größer als 15 nm ist /1-7 bis 1-12/. Beispielsweise ist zur Zeit die interferometrische Kalibrierung höchster Genauigkeit an der PTB mit einer Unsicherheit von $(0,015+0,13\cdot 10^{-6}\cdot l)$ μm möglich.

Andererseits lässt sich solches Prüfverfahren nur schwer automatisieren. Es benötigt eine große Zahl hochgenauer und damit teurer Endmaße. Außerdem besteht die ständige Gefahr der Abnutzung oder Beschädigung der Endmaße.

Das manuelle Verfahren verlangt neben den hohen Kosten auch einen großen Zeitaufwand. Infolge dieser großen Zeitdauer ist der Einfluss der Umgebungsbedingungen sehr groß und nur unter extrem stabilen Messraumbedingungen durchführbar. Im Vergleich zu diesem manuellen Prüfverfahren besitzt ein dynamisches Prüfverfahren die Vorteile /1-13/, dass es zeitsparend, ökonomisch und flexibler ist und dass detailliertere Daten erfasst werden können. Außerdem entsteht eine kürzere zeitliche Abhängigkeit von den Umweltbedingungen.

Auf Grund der hohen Genauigkeit interferometrischer Messverfahren bietet es sich an, die Prüfung von hochpräzisen Längenmesstastern auf interferometrischer Basis durchzuführen. Durch den Bezug auf die Laserwellenlänge ist eine gute Rückführbarkeit der Messergebnisse möglich.

Bereits in den Achtziger Jahren wurde am Institut Prozessmess- und Sensortechnik auf dieser Basis ein digitales Kalibriergerät, insbesondere für induktive Wegaufnehmer entwickelt /1-14/. Darauf aufbauend soll im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung eines Präzisionsprüfgerätes für hochgenaue Messtaster (Nanomesstaster) beschrieben werden, das eine effektive, automatische, flexible und dabei genaue Überprüfung von präzisen Messtastern mit Messbereichen bis 20 mm (bzw. 60 mm) ermöglicht.

Es wird eine Messauflösung von 1,24 nm für einem Prüfbereich bis 20 mm und eine Messunsicherheit von kleiner als 10^{-6} angestrebt. Das entspricht im Messbereich vom 20 mm einer Messabweichung von kleiner als 20 nm.

In der vorliegenden Arbeit werden das Messprinzip und der Aufbau des Präzisionsprüfgerätes dargestellt. Das Verfahren wird umfassend analysiert und Weg zur Minimierung von Messfehlern aufgezeigt. Der Entwurf von Prüfabläufen und die dazugehörigen Messprogramme werden beschrieben. Im weiteren erfolgt eine umfangreiche messtechnische Untersuchung des Präzisionsprüfgerätes mit Hilfe von zwei interferenzoptischen Messtastern. Mit einer Unsicherheitsanalyse des Präzisionsprüfgerätes werden die messtechnischen Möglichkeiten des neuen Prüfverfahrens nachgewiesen.

2 Überblick über Präzisionsmesstaster und deren Überprüfung

2.1 Präzisionsmesstaster

Um die Anforderungen an ein Prüfgerät für Präzisionsmesstaster spezifizieren zu können, soll zunächst ein Überblick über die gegenwärtig verwendeten Längenmesstaster gegeben werden. Betrachtet werden hier Längenmessgeräte für die Präzisionsmessung mit Auflösung und Genauigkeit $< 1 \mu\text{m}$, die für die modernen Anforderungen der Mikro- und Nanomesstechnik, des Maschinenbaus, der Feinwerktechnik und Mechatronik in Betracht kommen. Insofern handelt es sich dabei vorrangig um mit elektronischen oder optischen Verfahren arbeitende Messgeräte. Klassische rein mechanische Längenmessgeräte werden hier kaum für eine moderne Messtechnik in Frage kommen und werden deshalb in diese Übersicht nicht mit eingezogen.

In der Längenprüftechnik werden die Prüfmittel üblicherweise in drei Gruppen eingeteilt: anzeigende Messgeräte, Lehren und Hilfsmittel /2-1, 2-2/. Wegen einfacher Handhabung, der Möglichkeit der unmittelbaren Messungen und der einstellbaren Messspanne /2-2, 2-3/ sind in der Fertigungsmesstechnik anzeigende Messgeräte, wie Feinzeiger oder Fühlhebelmessgeräte für Unterschiedsmessungen von Außen- und Innenmaßen, Überprüfung der Ebenheit und Parallelität von Flächen und zur Ermittlung von Höhen gut geeignet.

Im Prinzip kann man Längenmessgeräte in berührende und berührungslos antastende Verfahren unterteilen. Bei den berührenden Messgeräten bzw. Messtastern erfolgt die Längenmessung meistens durch eine mechanische Antastung. Die berührungslosen Messgeräte benötigen dagegen keine Messantastung und arbeiten z.B. mit optischen, induktiven, kapazitiven oder Wirbelstrom-Verfahren.

Nach dem Messverfahren und der Messanordnung können berührende Messtaster in verschiedene Gruppen klassifiziert werden. Dies sind mechanisch-elektronische, mechanisch-optische oder pneumatische Messtaster /2-4/.

Zu den mechanisch-elektronischen Messtastern gehören induktive und kapazitive Wegaufnehmer, wie z.B. die induktiven Messtaster GT 21HP von Tesa. Sie besitzen Messbereiche von $\pm 0,2$ bis ± 2 mm und Auflösungen von 10 bis 100 nm. Ähnliche Parameter weist auch der Messtaster von Mahr (Induktiver Messtaster 1340) mit $\pm 0,2$ bis ± 2 mm Messbereiche und einer Auflösung von 10 bis 100 nm /2-5, 2-6/ auf. Die pneumatischen Messtaster haben einen ähnlichen Messbereich von ± 2 mm und eine Auflösung von 100 nm (Messtaster von Tesa, GT 272). Die oben genannten zwei Arten der Messtaster haben den Nachteil, dass nur in einem kleinen Messbereich eine Auflösung im Submikrometer-Bereich erreicht werden kann. Bei größeren Messbereichen von einigen Millimetern werden Auflösung und Messunsicherheit wesentlich schlechter.

Mit mechanisch-optischen Messtastern kann dieses Problem überwunden werden. Bei diesen ist gleichzeitig ein großer Messbereich und eine hohe Auflösung realisierbar. In solchen Messtastern werden vorrangig inkrementale Messverfahren angewendet, wie z. B. Glasmaßstäbe (CETRO 60, CETRO 25 / Heidenhain) /2-7/ oder Miniaturinterferometer (LM 20, LM 50 / SIOS) /2-8/ mit Messbereichen bis 60 mm und Auflösung von 1 nm bis 50 nm (Tabelle 1).

Im Vergleich zu absolutcodierenden Messverfahren haben die inkrementalen Messverfahren entscheidende Vorteile, wie geringerer gerätetechnischer Aufwand für die Messsignalerzeugung und -übertragung, sowie Erhöhung der Auflösung durch Messwertinterpolation /2-9/.

Mögliche Einsatzgebiete derartiger hochauflösender Messtaster sind Messmaschinen, Komparatoren und andere Präzisionsgeräte der Längenmesstechnik, sowie Fertigungs- und Messeinrichtungen.

In Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) an der TU Ilmenau und der Firma SIOS Messtechnik GmbH wurde ein interferenzoptischer Messtaster entwickelt /2-8/. Dieser mechanisch-optische Messtaster weist einige vorteilhafte Eigenschaften auf, wie miniaturisierte optische Messanordnung, großer Messbereich mit Nanometer-Auflösung und örtliche Trennung zwischen Interferometer, Laser und Auswerteeinheit.

Messprinzip	Auflösung	Messbereich	rel. Auflösung
kapazitiv	0,1-100 nm	10-1000 μm	10^{-5}
induktiv	10-100 nm	200 – 2000 μm	$5 \cdot 10^{-5}$
inkremental-optisch	1-10 nm	max. 60 mm	10^{-7} - 10^{-8}
interferenzoptisch	0,1-10 nm	max. 60 mm	10^{-7} - 10^{-9}

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Messtaster

In der Arbeit von Herrn Niehe /1-5, 2-10/ wurde der Messtaster zur Kalibrierung von Endmaße eingesetzt. Die Kalibrierung erfolgte durch zweiseitige Antastung des Endmaßes, wobei der interferenzoptische Messtaster (LM 20) von oben und ein induktiver Geber von unten antasten. Mit diesem neuen Konzept können Endmaße ökonomischer und rationeller als mit dem alten Verfahren geprüft werden, in dem zwei induktive Wegsensoren für die Kalibrierung des Endmaßes eingesetzt werden und für jedes Endmaß ein eigenes Normal benötigt wird /2-1, 2-11/. In der Arbeit wird durch die Anwendung des interferenzoptischen Messtasters auch gezeigt, dass der Messtaster die Anforderung der Genauigkeit erfüllen kann und die Kalibrierung von Endmaßen noch leistungsfähiger wird.

2.2 Prüfverfahren von Präzisionsmesstastern

Die Kalibrier- und Prüfverfahren für Messtaster kann man nach der Art des verwendeten Normals in statische und dynamische Verfahren einteilen. Bei statischen Verfahren werden präzise Maßverkörperungen wie z.B. Endmaße verwendet. So werden z. B. induktive Messtaster traditionell mit dem Sinuslineal geprüft, oder elektronische Tastschnittgeräte werden mit einem Einstellnormal oder einer Endmaßstufe kalibriert /2-12/. Diese Prüfverfahren werden nachteilig manuell durchgeführt. Weiterhin ist auch ein manuelles Prüfgerät zur Überprüfung von Fühlhebelsmesstastern /2-13/ bekannt, das einen induktiven Geber als Maßverkörperung benutzt. Der Arbeitsbereich liegt nur bei einigen hundert Mikrometern mit einer Messgenauigkeit im Mikrometerbereich. Es existieren ebenfalls Prüfgeräte für Messuhren und Feinzeiger /2-14/ im großen Messbereich. Der Messbereich ist 25 mm, aber die Prüfgenauigkeit liegen nur im Mikrometerbereich. Zur Erreichung besserer Genauigkeit wurde ein Prüfgerät /2-1/ entwickelt, das einen Messbereich von ± 3 mm bis $\pm 0,2$ μm und eine Unsicherheit von ± 15 nm besitzt, indem ein kalibriertes Rauhtiefennormal als Maßverkörperung benutzt wird. Obwohl das Prüfgerät eine geringe Unsicherheit aufweist, ist sein Messbereich doch kleiner als 10 mm.

Im Gegensatz zum statischen Messvorgang werden dynamische Verfahren mit Prüfmaschinen oder –geräten, ggf. auch mit entsprechenden Messanweisungen oder –programmen durchgeführt. Solche Prüfverfahren besitzen erhebliche Vorteile, wie automatisierter und zeitsparender Messvorgang und leistungsfähige Erstellung des Protokolls direkt nach dem Prüfablauf. Die bisher entwickelten Prüfgeräte mit dynamischem Messverfahren haben entweder einen großen Messbereich mit einer Auflösung von einigen zehn Nanometern oder einen kleinen Messbereich mit hochgenauer Auflösung bis zum Nanometer- oder Subnanometer-Bereich.

So besitzt z.B. die Prüfmaschine von Mahr, Optimar 100 (Bild 1-1) /2-15/, einen Messbereich von 100 mm und eine Auflösung von $0,02 \mu\text{m}$. Die Messunsicherheit (U_{95}) beträgt $(0,2 + l/100) \mu\text{m}$, l in mm. Ein ähnliches Längenkalibriersystem von Helios, HELIO-COM Supra /2-16/, hat einen Messbereich bis 300 mm, eine Messunsicherheit von $(0,2 + l/2000) \mu\text{m}$, l in mm. Für Messuhren oder andere eindimensionale Längenaufnehmer wurde ein Prüfgerät mit Laserinterferometer entwickelt /2-17/, wobei aber nur eine Messgenauigkeit von 150 nm im Messbereich von 30 mm erreicht wurde.

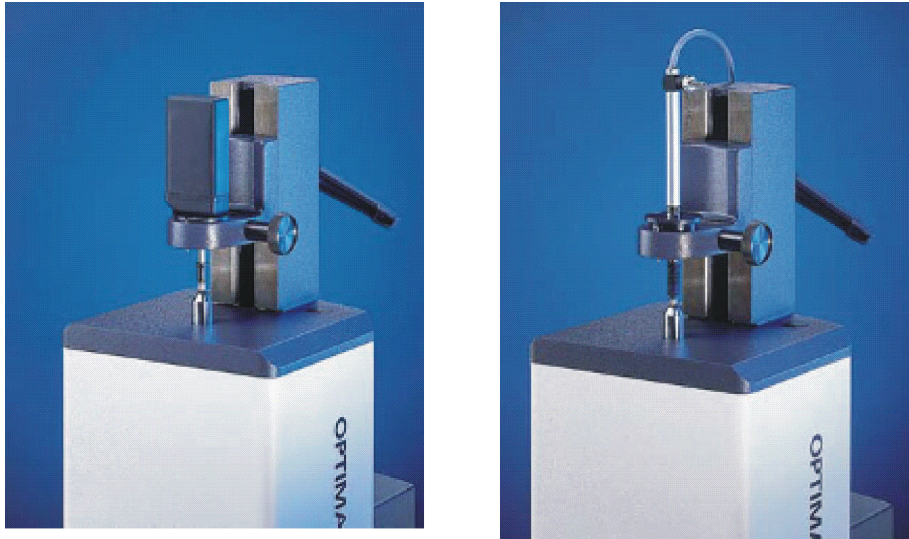


Bild 1-1: inkremental-optischer und induktiver Messtaster auf dem Prüfgerät /2-15/

Für die Überprüfung hochgenauer Messtastern mit dynamischen Messverfahren wurden schon einige Forschungen und Entwicklungen /1-14, 2-18 bis 2-28/ berichtet. Eine Gemeinsamkeit dieser Prüfsysteme liegt darin, dass sie mit Laser- oder Röntgen-Interferometer ausgerüstet werden. Die Auflösung kann bis zum Nano- oder Subnanometer reichen und die Messunsicherheit liegt im Nanometer-Bereich. Allerdings arbeiten sie nur in kleinen Messbereichen im Mikrometer-Bereich. Beispielsweise wurde ein mit einem Fabry-Perot-Interferometer arbeitendes Kalibriersystem /2-29/ für eindimensionale Nanosensoren (induktive Messtaster, kapazitiv Sensor und AFM) entwickelt, das eine Genauigkeit von ca. 1 nm erreicht aber mit einem Messbereich von $300 \mu\text{m}$.

Die oben genannten dynamischen Prüfverfahren und -geräte können wegen dem kleinen Messbereich nur für die Überprüfung induktiver oder kapazitiver, bzw. mechanisch-elektronischer Messtaster verwendet werden.

Die Überprüfung mechanisch-optischer Messtaster mit großen Messbereichen bis 60 mm kann zur Zeit, wie zuvor erwähnt, nur durch die Anwendung präziser Endmaße (Bild 1-2) erfolgen, deren Genauigkeit dem nationalen Standard entspricht. Ein solches Verfahren ist jedoch insbesondere sehr zeitaufwendig und die Messgenauigkeit wird auf die Genauigkeit der Endmaße beschränkt. Durch die lange Prüfzeit ist insbesondere auch ein hoher Temperatureinfluss auf das Prüfergebnis zu erwarten.

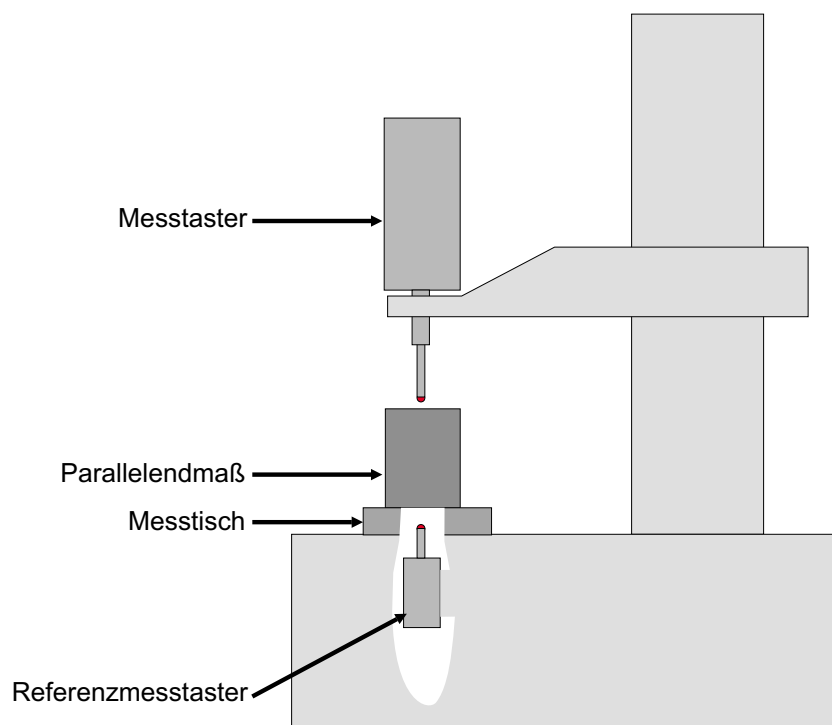


Bild 1-2: Prüfung mit Hochpräzisions-Parallelendmaß

Eine Zusammenfassung der Überprüfung von verschiedenen Längenaufnehmer kann in Erweiterung von /2-30/ mit folgendem Bild (Bild 1-3) schematisch dargestellt. Links ist die manuelle Methode mit Endmaßen dargestellt, die über ein Endmaßprüfgerät und den Interferenzkomparator auf das Wellenlängennormal zurückgeführt wird. In der Mitte ist das automatische Messverfahren mit einem Prüfgerät dargestellt, das meistens mit einem Glasmaßstab ausgerüstet ist und vorher mit einem Laserinterferometer kalibriert werden muss, um den Anschluss zum Wellenlängennormal zu garantieren. Auf der rechten Seite ist der neue zu entwickelnde Prüfvorgang mit einem Präzisionsprüfgerät dargestellt, wobei ein Laserinterferometer im Gerät integriert wird und eine direkte Rückführbarkeit zum Wellenlängennormal erreicht wird.

Je mehr Transformationen zwischen dem zu prüfenden Messtaster und dem Wellenlängennormal notwendig sind, desto größer wird die Prüfunsicherheit. Mit einer direkten Rückführbarkeit kann das Präzisionsprüfgerät eine geringe Messunsicherheit beanspruchen.

Kalibrierkette für Messuhr, Feinzeiger und Messtaster

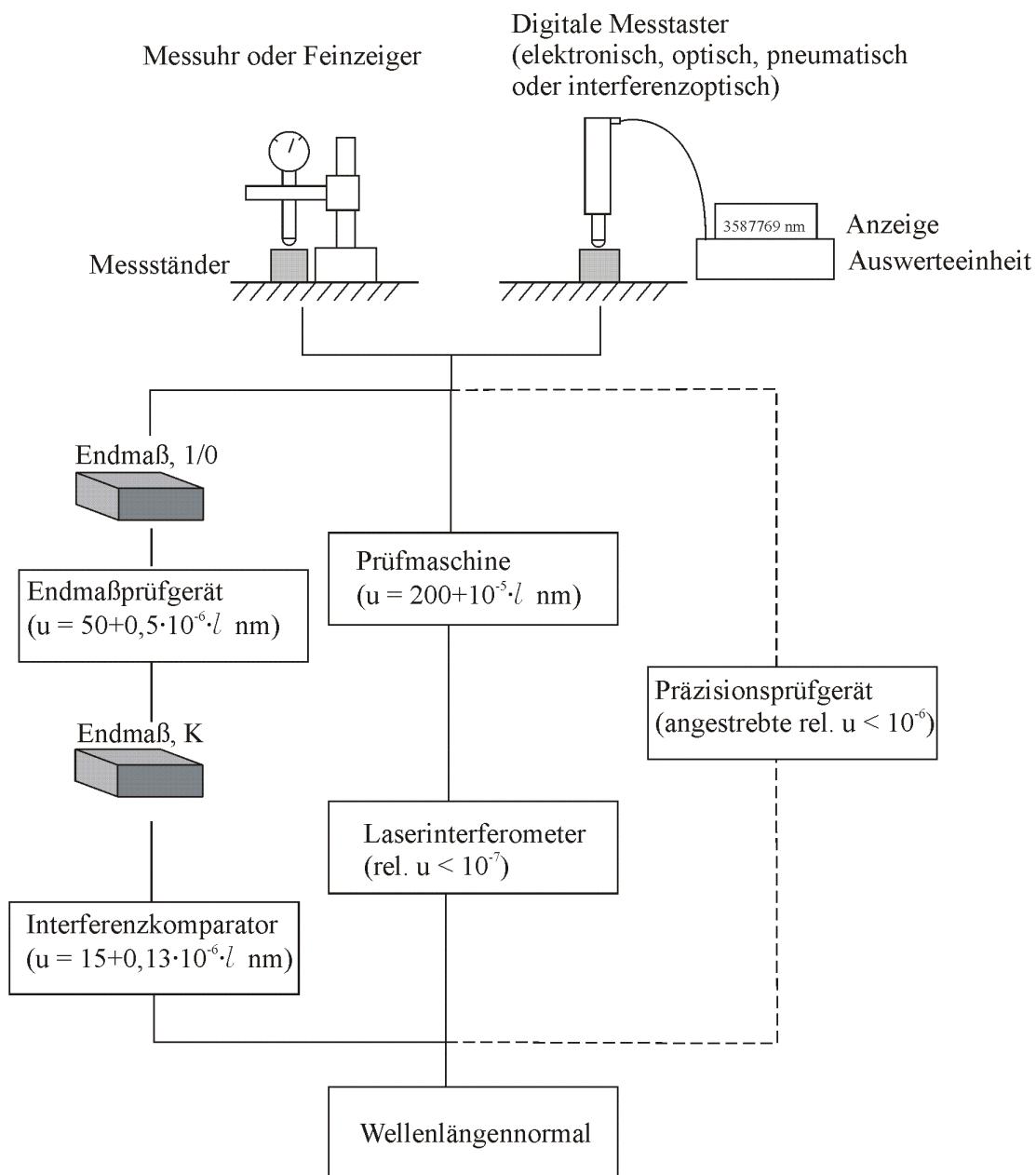


Bild 1-3: Kalibrierkette

3 Messprinzipien und Grundlagen des Präzisionsprüfgerätes

3.1 Aufgabenstellung und Messprinzip des Präzisionsprüfgerätes

Die Motivation der Entwicklung des Präzisionsprüfgerätes besteht darin, dass ein hochgenaues und leistungsfähiges Gerät für die Überprüfung und Kalibrierung von Messtastern mit großem Messbereich (bis 60 mm) und einer Auflösung bis 1 Nanometer geschaffen werden soll. Insbesondere sollen damit die hochpräzisen interferenzoptischen Messtaster der Firma SIOS Messtechnik GmbH, aber auch andere Messtaster, beispielsweise von Heidenhain (Cetro) /2-7/, oder Zeiss (Feinmess-Jena, Abbe-Serie) /3-1/, mit ähnlichen messtechnischen Parametern überprüfbar sein. Eine Überprüfung berührungsloser Längenmesssysteme, wie z.B. von Autofokussystemen oder Laserinterferometern wird damit ebenfalls möglich. Damit kann das Präzisionsprüfgerät als universelles Prüfgerät für hochgenaue Messtaster bezeichnet werden und ist mit seiner hohen Auflösung und dem großen Messbereich für die Prüfung verschiedenster eindimensionalen Präzisionslängenmesssysteme einsetzbar.

Um zu entscheiden, welches Längenmessverfahren im Prüfgerät verwendet werden soll, geht man im Allgemeinen davon aus, dass beim messtechnischen Vergleich das Normal eine höhere Genauigkeit, bzw. eine geringere Messunsicherheit, als das zu prüfende Messsystem aufweisen sollte. Außerdem soll eine Rückführbarkeit der Messung auf stabile Normale möglich sein. Hierfür kommt eigentlich nur ein Laserinterferometersystem in Betracht.

Außerdem sollen im Prüfgerät, die messtechnischen Parameter des taktilen Messtasters so geprüft werden, wie der Messtaster bei seiner Anwendung auch benutzt wird, d.h. der Messtaster soll mit einer definierten Höhenänderung kalibriert werden und setzt während des Kalibriervorganges auf einen Messkörper auf. Wird dieser Messkörper in der Höhe mechanisch verschoben, kann mit dieser Höhenänderung der Messtaster kalibriert werden.

Die Höhenänderung soll im Prüfgerät also ohne Hilfe von Stufenendmaßen oder Sinuslinealen, realisiert werden, um kontinuierlich bestimmte Messpunkte einstellen zu können. Anstelle des traditionell als Bezugnormal dienenden Endmaßes soll eine dynamische Änderung der Messpunkte erreicht werden. Zur Durchführung dieses Messvorgangs braucht man eine definierte einachsige Verschiebung des Messkörpers. Diese dynamische Höhenänderung soll mit einer motorisch angetriebenen, vertikal angeordneten Präzisions-Linearführung erfolgen.

Die Verschiebung wird in eine motorische Grobverstellung sowie eine piezoelektrische Feinverstellung unterteilt. Damit ist man in der Lage, beliebige Höhenänderungen mit hoher Feinfühligkeit im Nanometerbereich zu realisieren. Zur Vereinfachung der technischen Lösung kann man auf das Anfahren absoluter Messpositionen verzichten, da nur eine Unterschiedsmessung zwischen Messnormal des Präzisionsprüfgerätes und dem zu prüfenden Messtaster erforderlich ist.

Es ist selbstverständlich, dass der Aufbau des Prüfgerätes sehr stabil ausgeführt werden muss, um mechanische Deformationen zu minimieren. Außerdem ist eine feste Einspannung des zu prüfenden Messtasters in einer Aufnahme des Prüfgerätes notwendig. Hierbei wird eine Aufnahme für den bei Messtastern sehr verbreiteten Spannschaft mit einem Durchmesser von 8 mm benutzt.

Die Vergleichsmessung soll durch die Antastung eines Messkörpers erfolgen, das eine plane, geläppte Oberfläche besitzt. Dies kann ein planparalleler Glasspiegel oder ein Parallelendmaß sein. Der Vorteil besteht dabei darin, dass der Messtaster für die Antastung stets den gleichen Messkörper und sogar die gleiche Stelle auf dem Messkörper benutzt. Hierdurch können Messfehler durch unterschiedliche Oberflächeneigenschaften oder E-Module vom Messkörper, wie sie bei der Prüfung mit Endmaßen auftreten können, weitgehend ausgeschlossen werden.

Die Überprüfung erfolgt durch eine Vergleichsmessung zwischen dem Messtaster und dem Laserinterferometer im Prüfgerät, indem während der Messung der Messkörper (Planspiegel, bzw. Endmaß) mit einem Steuersystem in bestimmtem Messintervallen auf- und abwärts verschoben wird. Mit einem im Prüfgerät befindlichen Laserinterferometer, dem Steuersystem und einem entsprechenden automatischen Prüfalgorithmus können anschließend die Längenwerte von Messtaster und Laserinterferometer im Prüfgerät verglichen werden und die messtechnischen Daten des zu prüfenden Messtasters innerhalb kurzer Zeit sehr effektiv erfasst werden.

Um den Messprozess nach entsprechender Richtlinie und auf bestimmten messtechnischen Anforderungen durchzuführen, wird der Prüfablauf im Prüfgerät in Anlehnung an die VDI/VDE Richtlinie 2617 zur Prüfung von Koordinatenmessgeräten entworfen. In diesem Verfahren können drei verschiedene Prüfabläufe zur Überprüfung des Messtasters ausgewählt werden. Mit einer zugeschnitten Software auf der Basis von Testpoint wurde das entsprechende Messprogramm und Messverfahren aufgestellt.

Ein grundlegendes Konzept der Konstruktion des Prüfgerätes wird hier mit Bild 2 schematisch dargestellt. Mit diesem Prüfgerät und -verfahren kann die umständliche manuelle Prüfung mit einzelnen Endmaßen ersetzt werden. Mess- und Prüfbereich sind nur von der Länge des eingebauten Führungs- und Antriebssystem abhängig. Ein großer Vorteil besteht darin, dass durch die Automatisierung des Prüfablaufes beliebige Messstufen einstellbar sind und das Prüfgerät als ein veränderliches Endmaß betrachtet werden kann. Eine Überprüfung universeller Messtaster wird dann durch die Anwendung des Prüfgerätes mit höchster Präzision, großem Messbereich und einem zeitsparenden Messverfahren realisiert.

3.2 Probleme der Prüfaufgabe

Das Hauptproblem eines Verfahrens zum Vergleich von zwei Längenmesssystemen, wobei die Vergleichsmessung durch eine gleichzeitige Messung der Antastung der planen Oberfläche des Messkörpers durch beide Messsysteme geschieht, liegt in der Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips /3-2/. Dieser tritt durch eine unzureichende Fluchtung zwischen den Messachsen beider Messsysteme und einer möglichen Verkippung des Messkörpers während der Überprüfung auf. Er stellt einen Sinusfehler, d.h. einen Fehler 1. Ordnung ($\Delta l = v \cdot \tan(\alpha)$) (Bild 3) dar und führt damit zu großen Fehlern.

Selbst bei einer Überprüfung mit Parallelendmaßen tritt dieser Effekt auf. Strenggenommen gilt als Länge des Endmaßes das Mittenmaß l_m . Die Kalibrierung eines Endmaßes mit dem fundamental-interferentiellen Messverfahren findet prinzipbedingt nicht genau, oder besser gesagt, nicht nur in der Mitte der freien Messfläche statt. Man geht einfach davon aus, dass das Endmaß hinreichend eben und planparallel ist. Damit spielt die Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips eine untergeordnete Rolle. Eine zulässige Abweichungsspanne von 50 nm führt beispielsweise auf eine maximale Abweichung von der Parallelität von 1,1" (ein 5 mm Endmaß mit 9 mm Breite). Wird das Endmaß also bei der Prüfung eines Messtasters nicht genau in der Mitte der freien Messfläche angetastet, kann ein Fehler von 5,5 nm pro Millimeter Exzentrizität auftreten. Um diesem Fehler zu minimieren, werden Endmaßschablonen benutzt, die die unterschiedlichen Endmaße immer an die selbe Position bezüglich des Messtasters manipulieren. Da aber auch die Schablone eingerichtet werden muss, ist hier ebenfalls auf äußerste Sorgfalt zu achten. Die fundamental-interferentielle Kalibrierung findet allerdings in einem Endmaßkomparator statt. Die Prüfung eines Messtasters mit den so kalibrierten Endmaßen wird dann in einem Endmaßprüfplatz durchgeführt. Dabei kann im Prinzip nicht garantiert werden, dass das interferentiell ermittelte Mittenmaß im Endmaßprüfplatz auch wirklich angetastet wird. Man muss somit von einer vergrößerten Messunsicherheit ausgehen, die aus der unsicheren Auffindung der Mitte der Endmaßfläche resultiert.

Antriebsgruppe : blau
 Meßschlitten : grün
 Gestell : schwarz

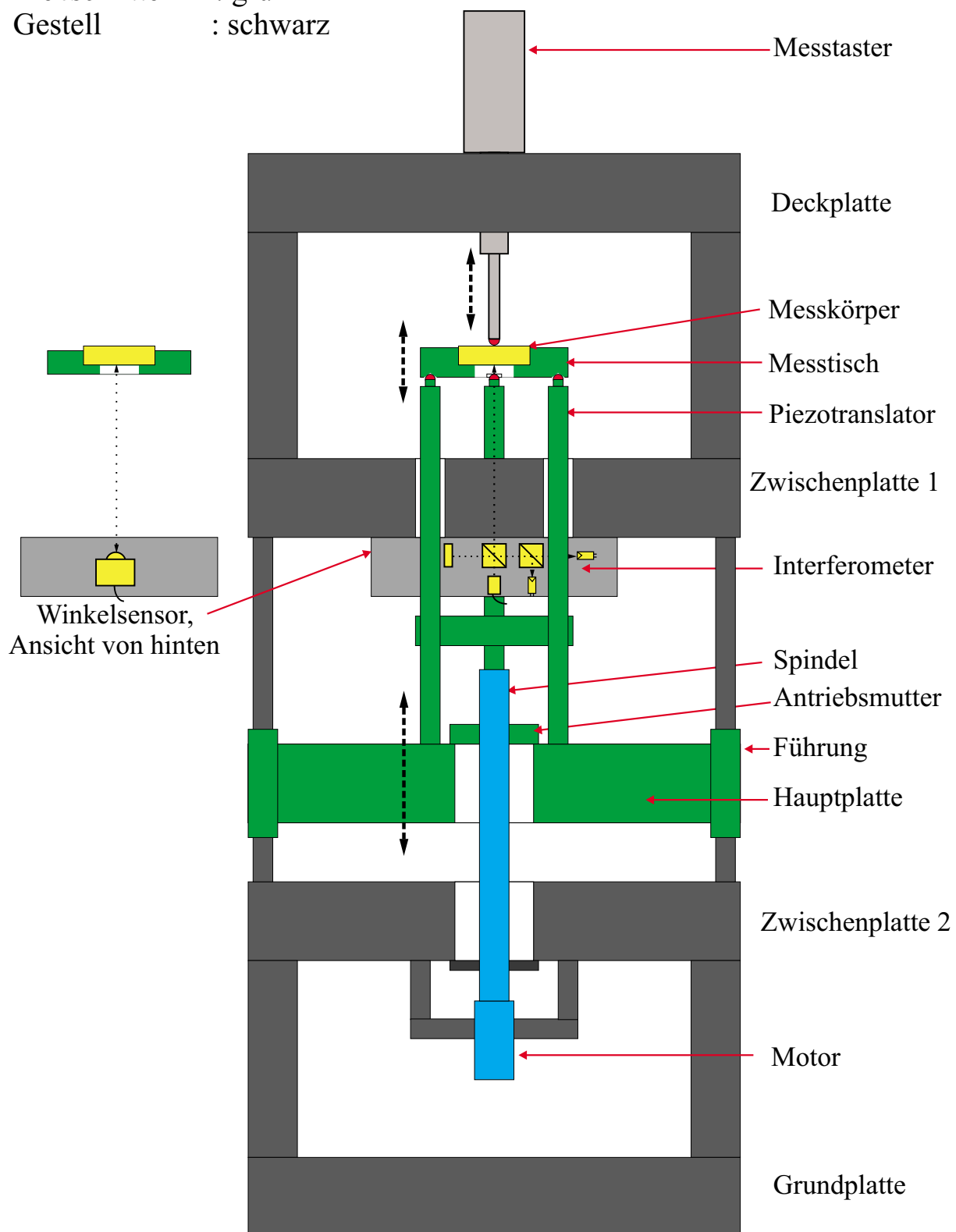


Bild 2: Grundprinzip des Prüfgerätes

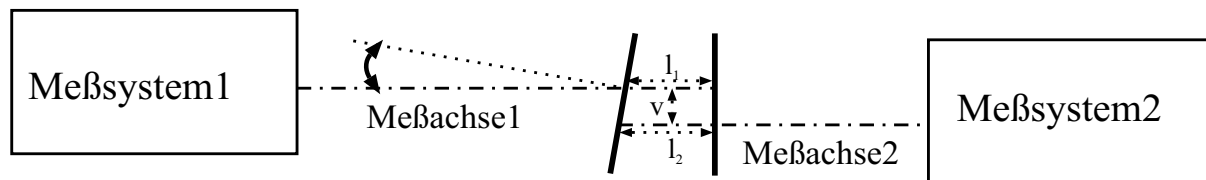


Bild 3: Darstellung des Abbe-Fehlers

Fehlereinflüsse durch ungenaues Antasten der Oberfläche sind also nicht auszuschließen und können durchaus in der Größenordnung von 5 nm liegen.

Die Probleme bei der Kalibrierung mittels Messung der Verschiebung eines Messkörpers sind etwas anders gelagert. Für die Verschiebung des Messkörpers wird eine Linearführung benötigt. Es ist unvermeidlich, dass diese Führung ein Führungsspiel aufweist. Kinematische Führungen erreichen äußerst geringe Verkippung unter einer Winkelsekunde. Allerdings sind sie nur für Verschieberegion von wenigen Mikrometern geeignet. Für den angestrebten Verschieberegion von 20-60 mm kommen Luftlager-, Gleitlager- oder Wälzkörperführungen in Betracht. Selbst die aufwendigen Luftlager weisen in diesem Bereich Verkippungen von 2-3 Winkelsekunden auf. Gleitlager weisen zusätzlich Stick-Slip-Effekte auf. Beide Führungssysteme erfordern große Führungslängen, sind sehr voluminös und schwer. Gute Wälzkörperführungen weisen in der Regel Kippungen zwischen 30" und 60" auf. Diese Winkelabweichung verursacht nur dann keinen Fehler 1. Ordnung, wenn die "zu messende Strecke die geradlinige Fortsetzung der als Maßstab dienenden Theilung bildet" /3-2/. Die Einhaltung dieser Fluchtung stellt jedoch ebenfalls ein Problem dar. Selbst ein Versatz von $< 0,5$ mm, was schwer zu erreichen ist, führt schon zu einem Abbe-Fehler von 70 - 140 nm (bei Verkippungen von 30" - 60").

Da offensichtlich der Versatz zwischen den beiden Messachsen nicht ausreichend klein gemacht werden kann und die Führungsabweichungen der Linearführungen ebenfalls zu groß sind, ist es notwendig, die Verkippung durch zusätzliche Maßnahmen zu reduzieren.

Um den Abbe-Fehler zu minimieren, wurden bereits einige Konzepte vorgeschlagen /3-3, 3-4/. In der Arbeit von Dr. Zanoni /3-5/ wurden Möglichkeiten der gleichzeitigen Längen- und Winkelmessung mit Hilfe von Interferometern untersucht. Allgemein kann der Abbe-Komparatorfehler mit drei verschiedenen Verfahren minimiert werden:

1. Fluchtung minimieren
2. Verkippung minimieren
3. Winkel der Verkippung messen und Abweichung rechnerisch korrigieren

Im Prüfgerät werden die Punkte 1 und 2 benutzt. Zur Minimierung des Abbe-Komparatorfehlers wird erstens der Versatz zwischen den Messachsen des Messtasters und des Laserinterferometers im Prüfgerät so klein wie möglich justiert. Da die Führungseigenschaften der Linearführungen offensichtlich nicht ohne weiteres verbessert werden können, wird zweitens die Verkippung des Messkörpers im gesamten Verfahrensbereich ständig gemessen und auf Null geregelt. Damit kann dieser Messfehler minimiert werden.

Zur Beseitigung dieses Messfehlers sind ein Winkelsensor und -regler erforderlich.

Im Prüfgerät soll deswegen mit Hilfe von einem extra angeordnetem Winkelsensor, einem digitalen Regler und piezoelektronischen Kippvorrichtungen die Verkippung immer auf Null geregelt werden.

Dadurch kann die Abbe-fehlerfreie Höhenänderung im Prüfgerät realisiert werden.

3.3 Anforderungen an ein Laserinterferometer zur Präzisionsprüfung

Obwohl Ende des neunzehnten Jahrhunderts schon das erste Interferometer von Michelson für die Bestimmung der Wellenlänge der roten Cadmium-Linie das Licht der Welt erblickte,

konnten kommerzielle Interferometer für den industriellen Einsatz erst nach der Erfindung des Lasers eine weite Verbreitung finden /3-6/. Große Vorteile des Laserinterferometers sind, dass neben der langen Messstrecke bis zu einigen Metern eine Auflösung bis in den Nanometer-Bereich erzielbar ist und die Längenmessung die direkte Rückführbarkeit zur Definition der Längeneinheit Meter besitzt /3-7/. Damit erzielte die industrielle Anwendung des Laserinterferometers in der Präzisionsfertigungsmesstechnik und in der Längenprüftechnik einen bedeutenden Durchbruch.

Nach der Laserfrequenz können Laserinterferometer in zwei Verfahren eingeteilt werden, Homodyn- und Heterodyn-Interferometer. Ein Homodyn-Interferometer arbeitet mit einer Frequenz und die Längenmessung erfolgt durch die fotoelektrische Auswertung der optischen Phase. Dagegen benutzt ein Heterodyn-Interferometer zwei Frequenzen, wobei die Längenmessung aus dem Dopplereffekt abgeleitet wird.

Obwohl bei Homodyn-Interferometern kleinere Nichtlinearitäten als bei Heterodyn-Interferometer erzielt werden können, hängt die Messgenauigkeit dieser Interferometer stärker von der Intensität des Lasers /3-8/ ab. Aus Sicht des Bau- und Konstruktionsaufwandes ist ein Homodyn-Interferometer in der Regel günstiger als ein Heterodyn-Interferometer.

Eine andere Klassifikation der Laserinterferometer kann nach der Anordnung des Messstrahls in Einstrahl- oder Mehrstrahlenanordnung /3-9/ vorgenommen werden. Als Reflektoren kommen Tripelprismen oder Planspiegel in Betracht. Im Allgemeinen werden Tripelreflektoren benutzt. Für die Anwendung von Planspiegeln als Messreflektor sind spezielle kippinvariante Anordnungen erforderlich.

Für eine Vergleichsmessung spielt die Fluchtung der Messachsen beider Messsysteme eine entscheidende Rolle, um das Abbe-Komparatorprinzip einzuhalten. Im Prinzip kann ein Tripelprismen-Interferometer für das Präzisionsprüfgerät zur Anwendung kommen. Allerdings wird damit eine genaue Übereinstimmung der beiden Messachsen von Interferometer und Messtaster nur schwer erreicht. Planspiegelinterferometer benötigen im allgemeinen zwei Laserstrahlen auf dem Planspiegelreflektor /3-10, 3-11/. Auch mit solchen Anordnungen lässt sich eine Übereinstimmung von zwei Messachsen nur schwer erreichen. Am Institut PMS wurde ein Planspiegelinterferometer entwickelt, das mit nur einem Strahl auf dem Messspiegel arbeitet /3-12, 3-13/. Hier stimmt die Messachse ideal mit dem Laserstrahl überein. Damit kann die Fluchtung zwischen den Messachsen von einem Messtaster und dem Planspiegelinterferometer vorteilhaft justiert werden.

Angesichts des Aufwandes der Einrichtung, der Justierung und der Leistung wird im Prüfgerät deswegen ein derartiges Einfrequenz-Planspiegelinterferometer mit einem einzigen Messstrahl verwendet.

Konventionelle Laserinterferometer sind sehr schwer, voluminös, teuer, mit beträchtlichem Wärmeeinfluss und erfordern einen hohen Aufwand zum Ausrichten. Die von der Firma SIOS gefertigten Planspiegelinterferometer (SP Serie) haben außer den zuvor genannten messtechnischen Vorteilen für Messbereich und Auflösung auch die Möglichkeit der räumlichen Trennung zwischen Interferometer und Laserröhre mit Elektronik. Diese Trennung wird durch die Anwendung von Lichtwellenleitern (LWL) realisiert. Mit der LWL-Kopplung benötigt der Interferometermesskopf nur wenig Raum. Es können damit Miniaturinterferometer aufgebaut werden. Durch diese innovative Kopplungstechnik entstehen somit die Vorteile geringer Baugröße und eines geringen Wärmeeinflusses.

Außerdem hat die LWL-Kopplung den Vorteil, dass Laserlichtquelle und optische Bauteile des Interferometers flexibel getrennt werden können, damit die optische und mechanische Justierung bei einem Wechsel des Lasers nicht wiederholt werden muss.

3.3 Wirkungsweise des Laserinterferometers

Das Interferometer stellt das Kernstück des Prüfgerätes dar. Es beruht auf der Basis des Michelson-Interferometers und ist ein polarisations-optisches Homodyn-Interferometer (Bild

4-1). Im Interferometer wird das Laserlicht durch einen Monomode-Lichtwellenleiter, zum Interferometer geführt. Bei dieser optischen Anordnung erfolgt durch die Verschiebung des Messspiegels eine Längenmessung, indem die zwei um 90° phasenverschobenen Interferenzsignale von zwei Fotoempfängern abgetastet werden und anschließend in elektronische Ausgangssignale umgewandelt werden. Diese werden nach der Verarbeitung in der Auswerteeinheit als Messwerte zur Verfügung gestellt. Die zwei um 90° phasenverschobenen Signale (Quadratur-Detektion /3-5/) werden zur Erkennung der Bewegungsrichtung benötigt.

Das unter 45° polarisierte Laserlicht wird durch einen polarisierten Teilerwürfel in zwei Strahlen mit senkrechter Polarisationsrichtung geteilt, wobei einer als Messstrahl und der andere als Referenzstrahl dient. Die $\lambda/4$ Platten dienen zur Umwandlung von linear polarisiertem in zirkular polarisiertes Licht. Dadurch wird jede Polarisationsebene um 90° gedreht und nach der Reflexion an Referenz- und Messspiegel können Mess- und Referenzstrahl den Teilerwürfel passieren und gelangen nicht zur Laserquelle zurück. Nach der Überlagerung der beiden reflektierten Strahlen gelangt das Licht zu den Fotoempfängern. Fotoempfänger 3 dient als Gleichlichtempfänger. Die anderen zwei empfangen zwei linear polarisierte Strahlen, die durch zwei um 45° gegeneinander verdrehte Polarisationsfilter aus den rechts- und links- zirkular polarisierten Strahlen entstehen und eine 90° Phasendifferenz haben. Damit kann eine eindeutige Vor- und Rückwärtszählung der Inkrementalsignale erfolgen.

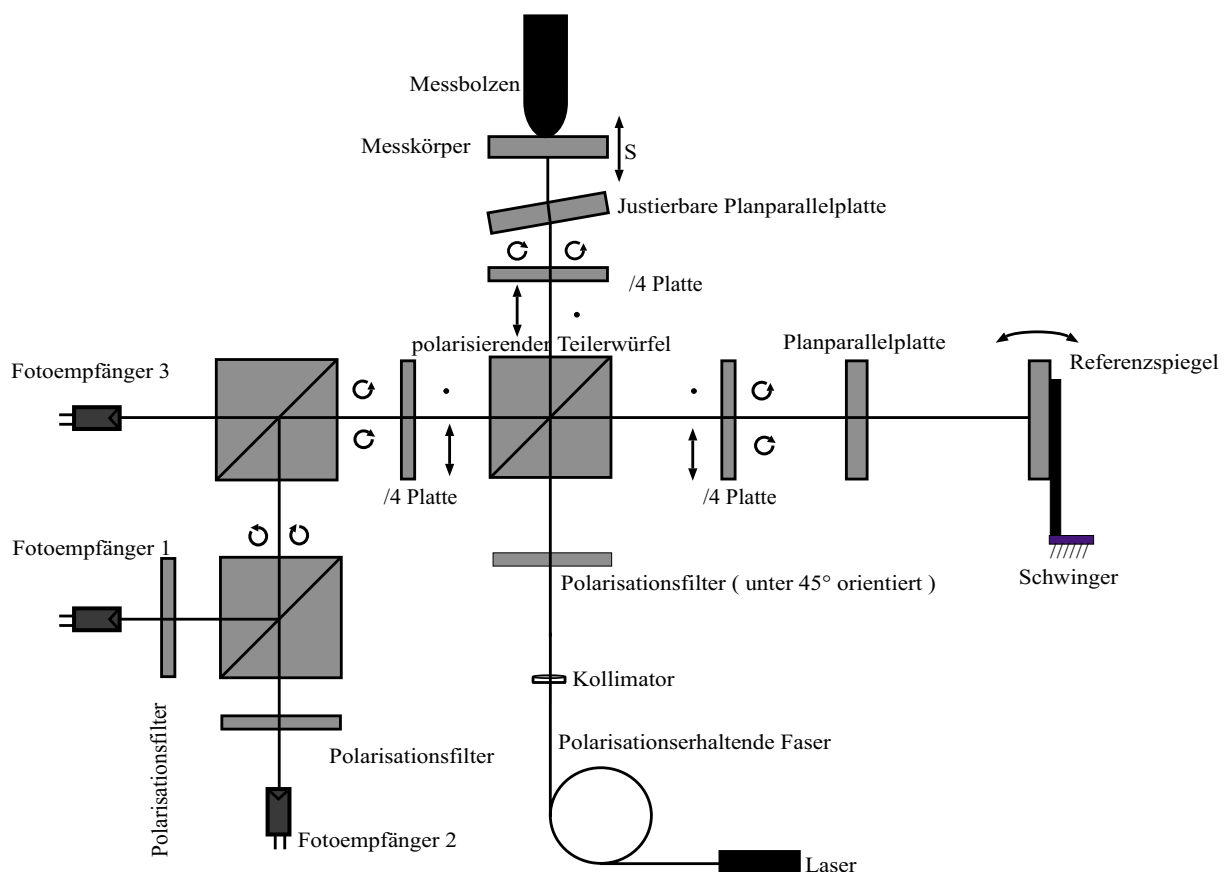


Bild 4-1: Optische Anordnung im Präzisionsprüfgerät

Um die Auflösung bis in den Nanometerbereich zu ermöglichen, wird ein elektronisches Interpolationsverfahren bei der Signalverarbeitung angewendet. Mit diesem Verfahren kann eine Auflösung von 1,24 nm durch eine 256-fache Interpolation realisiert werden. Die

fotoelektrischen Ausgangssignale von Fotoempfänger 1 und 2 können mit der Kompensation der Intensität des Fotoempfängers 3 wie folgendes dargestellt werden /3-14, 3-15, 3-16/:

Ausgangssignal von Empfänger 1

$$I_1 = I \cdot \cos(\psi) \quad (1)$$

Ausgangssignal von Empfänger 2

$$I_2 = I \cdot \sin(\psi) \quad (2)$$

Ideal bilden die beiden Ausgangssignale auf einem Oszilloskop eine kreisförmige Lissajous-Figur. Aber praktisch können Amplituden-, Offset- oder Phasenfehler auftreten, die bei der elektronischen Interpolation Längenmessfehler verursachen. Um diesen Fehler zu verringern, wird eine Modulations-Technik mit einem Schwinger am Referenzspiegel angewandt. Durch diese Schwingung können Offsetfehler kompensiert und die Signale auf konstante Amplitude geregelt werden.

Durch die Art der Modulation hat der Referenzspiegel einen kleinen Schwingwinkel (normalerweise ca. $\pm 2,5''$). Im Grundzustand wird der Messspiegel so justiert, dass er keinen Kippwinkel aufweist. Unter dieser idealen Bedingung steht dann der Messspiegel senkrecht zum Referenzspiegel.

Amplitude und Winkel des Schwingers können wie folgt dargestellt werden:

$$s(t) = s_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{s(t)}{h}\right) \quad (4)$$

Dabei ist $s(t)$ die Modulation des Gangunterschiedes durch den Schwinger und ε ist der Winkel des Schwingers.

Die Verteilung der Intensität von Fotoempfänger 1, I_1 und 2, I_2 kann mit folgenden Gleichungen zusammenfassend beschrieben werden:

$$I_1 = I \cdot \cos\left\{\left(\frac{\Delta l - S(t)}{\lambda/2} + \psi_w\right) \cdot 2\pi\right\} \quad (5)$$

$$I_2 = I \cdot \sin\left\{\left(\frac{\Delta l - S(t)}{\lambda/2} + \psi_w\right) \cdot 2\pi\right\} \quad (6)$$

mit

$$\psi_w = x \cdot \tan(\varepsilon) \cdot \frac{2}{\lambda} \quad (7)$$

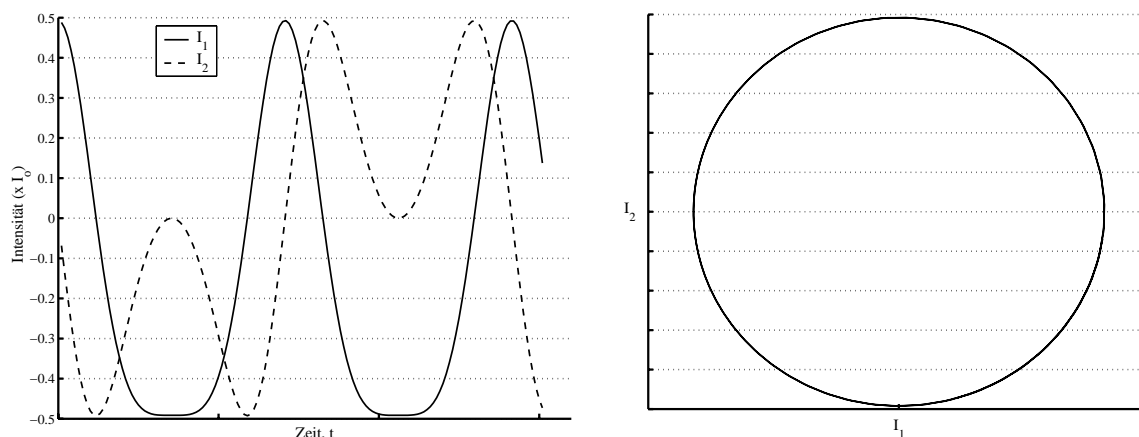


Bild 4-2: Ausgangssignale des Interferometers, I_1, I_2

Die durch den Schwinger ausgelöste kleine Phasen-, bzw. Längenmodulation wird in der Auswerteeinheit durch eine Mittelwertbildung [3-17] kompensiert, damit bei der Längenmessung kein zusätzlicher Längenfehler entsteht. Eine ideale Verteilung der Ausgangssignale I_1 und I_2 ist mit Bild 4-2 dargestellt, wobei der Messspiegel genau senkrecht zum Referenzspiegel steht.

3.4 Einführung von Winkelsensor und Winkelregler

Der Winkelsensor wird benötigt, um die Verkippung des Messkörpers ständig messen zu können und ihn während der Längenmessung immer auf einen konstanten Wert zu regeln. Ohne die Beachtung der Verkippung kann durch den Abbe-Komparatorfehler ein beträchtlicher Messfehler verursacht werden. Beispielsweise kann mit einem Abbe-Offset von $100 \mu\text{m}$ und einem Kippwinkel von $1'$ bereits ein Messfehler von 30 nm entstehen. Dieser Messfehler ist sowohl von dem Winkel als auch vom Versatz beider Messachsen abhängig. Eine ideale Fluchtung zwischen der Messachse des Laserinterferometers und der Messachse des Messtasters ist technisch nicht realisierbar. Deshalb ist es erforderlich, den Winkel des Messkörpers auf $\leq 2''$ konstant zu regeln, damit der Abbe-Fehler bei einem Versatz von $100 \mu\text{m}$ kleiner als 1 nm wird. Mit Hilfe der Winkelregelung kann eine deutliche Verringerung der Messabweichung erreicht werden. Das Detail der Winkelmessung wird im folgenden Kapitel (4.2.3) ausführlich beschrieben.

4 Aufbau des Präzisionsprüfgerätes

4.1 Beschreibung des Präzisionsprüfgerätes

Bei der Überprüfung des Messtasters geht es um eine Vergleichsmessung zwischen einem Messtaster (Prüfling) und dem Präzisionsprüfgerät (Normal). Im Prüfgerät sollen möglichst fehlerfreie und optimale Messbedingungen geschaffen werden, damit die Messtaster genau und leistungsfähig überprüft werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen die möglichen Fehlerursachen eingehend analysiert und möglicherweise verhindert bzw. minimiert werden.

Das Präzisionsprüfgerät besteht aus folgenden Komponenten : optischer Teil (Interferometer und Winkelsensor), mechanischer Teil (Konstruktion und Antrieb), elektronischer Teil (Piezotranslatoren, AD/DA Wandler, zusätzliche elektronische Komponenten und Auswertegerät) und Software (Messprogramm mit zugeschnittenen Testpoint-Modulen).

Die mechanische Konstruktion besteht aus einem stabilen und massiven Messportal zur Einspannung des Messtasters, einem Messtisch als Träger des Messkörpers und einem Führungs- und Antriebssystem zur Steuerung der Verschiebung. Um diesen Aufbau stabil zu gestalten, wird die Konstruktion aus massiven Platten und Säulen aufgebaut (Bild 5).

Zur Realisierung der Gesamtfunktion des Präzisionsprüfgerätes wird eine elektronische Verarbeitung der Interferometer- und Winkelsensorsignale benötigt. Die wesentlichen elektronischen Komponenten, inklusive des He-Ne-Lasers, sind in einer zentralen Auswerteeinheit untergebracht. Die Versorgung des Interferometers mit Laserlicht erfolgt über einen Monomode-Lichtwellenleiter. Der Miniatur-Winkelsensor im Prüfgerät arbeitet nach dem Prinzip eines fotoelektrischen Autokollimationsfernrohrs.

Zur Durchführung eines automatischen Prüfablaufes braucht man ein entsprechendes Messverfahren und Messprogramm, das die grundsätzlichen Aufgaben, wie Motorsteuerung des Messtasters und des Prüfgerätes, Regelung des Messtisches, die Erfassung und Verarbeitung der betreffenden Messwerte und die Korrektur der Umweltdaten erfüllen kann.

Um den Winkel während einer Messbewegung ständig auf Null zu halten, ist eine Regelung erforderlich. Dazu wird ein digitaler Regler aufgebaut, der die drei Piezotranslatoren ansteuert.

Die Details über das Gesamtsystem werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.2 Funktionen und Aufgaben des Präzisionsprüfgerätes

4.2.1 Mechanischer Aufbau des Präzisionsprüfgerätes

4.2.1.1 Mechanische Konstruktion

Der mechanische Aufbau ist entscheidend für die Stabilität, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit des Prüfgerätes. Eine stabile Konstruktion ist wichtig, um Deformationen und Vibrationen während der Messung klein zu halten. Ein wichtiger Aspekt ist die Reduktion der thermischen Ausdehnung der Bauteile.

Die mechanische Konstruktion des Prüfgerätes besteht aus verschiedenen Montage-Platten. Sie besteht aus einem festen und einem beweglichen Teil. Der feste Teil besteht aus Grundplatte, Zwischenplatten 1, 2 und Deckplatte, die durch Säulen massiv verbunden sind (Bild 5). Der bewegliche Teil stellt gewissermaßen den Messschlitten dar und besteht aus dem Messtisch, Piezotranslatoren, Hilfsplatte, Verlängerungselementen, Kugelführungen und Hauptplatte (Bild 5).

An der gestellfesten Zwischenplatte 2 ist der Motor angeschraubt. Die Gewindespindel ist kugelgelagert und mit einer Kupplung mit dem Motor verbunden. In der Hauptplatte ist die Antriebsmutter über eine Klemme befestigt.

Zwischen der Zwischenplatte 1 und 2 liegen drei um 120° symmetrisch angeordnete Kugelgeradföhrungen, die die vertikale Bewegung des Messschlittens ermöglichen. Die Föhrungswellen werden an ihren oberen und unteren Enden von den zwei Zwischenplatten 1 und 2 geklemmt.

Zwischen der Hauptplatte und dem Messtisch befindet sich eine Hilfsplatte, die zur Befestigung der drei Piezotranslatoren dient. Drei Verlängerungselemente verbinden die Hilfsplatte und Hauptplatte, damit der Messbereich nicht durch die Länge der Piezotranslatoren beeinträchtigt wird.

Unter der Zwischenplatte 1 befinden sich das Interferometer und ein Winkelsensor auf einer Trägerplatte. Diese Trägerplatte steht senkrecht zur Zwischenplatte 1 und ist mit dieser fest verbunden. Auf einer Seite der Platte ist das Interferometer angeordnet. Der Winkelsensor ist mit einem justierbaren Teil auf der anderen Seite befestigt.

Im Messtisch wird entweder ein Messspiegel aus Glas oder ein Parallelendmaß als Messkörper befestigt. An diesem Messkörper tasten von oben der taktile Messtaster und von unten das eingebaute Laserinterferometer an.

Zur Halterung und Einspannung der Messtaster dient die Deckplatte, die in der Mitte eine eingepresste Klemmbuchse mit einem für Messtaster genormten Durchmesser von 8 mm hat. Der zu prüfende Messtaster wird hier eingesetzt und mittels einer Klemmschraube fest eingespannt. Die Art der Einspannung entspricht auch der Anwendung herkömmlicher Messtaster und Feinzeiger im industriellen Einsatz. Mit dieser Befestigung kann eine sichere Überprüfung des Messtasters durchgeführt werden.

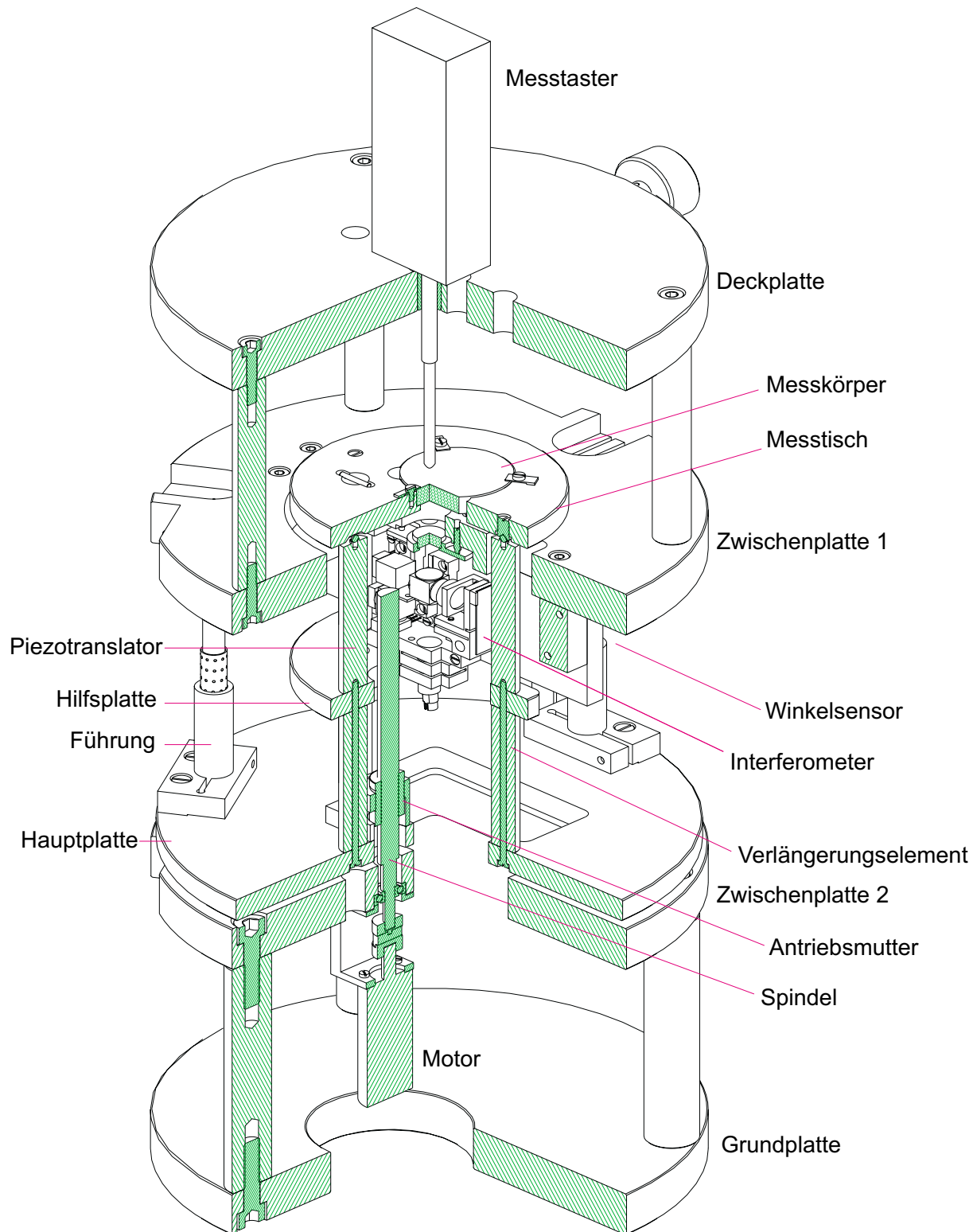


Bild 5: Präzisionsprüfgerät und Messtaster

4.2.1.2 Eigenschaften der Führungen

Für die Verschiebung des Messschlittens werden im Prüfgerät Kugelführungen verwendet. Diese Wälzführungen sind nahezu spiel-, wartungs- und verschleißfrei, weisen geringe Reibung auf und ermöglichen eine hohe Positioniergenauigkeit.

Die von der Firma Feinprüf GmbH hergestellten Kugelführungen bestehen aus gehärteten und feinstbearbeiteten zylindrischen Führungselementen, Buchsen und Wellen sowie Kugeln und

Kugelförmig /4-1/. Es wurden drei identische Führungen eingesetzt, die den maximalen Messbereich von 60 mm erfüllen können.

Bei der Montage ist die Parallelität zwischen Hauptplatte und den zwei Zwischenplatten von großer Bedeutung, damit der Messschlitten optimal angetrieben werden kann. Eine unangemessene Montage kann zu großen Zwangskräften und damit zum Versagen der Steuerung oder großen Verkippungen führen.

Nach der Montage wurde mit Hilfe eines optischen AKF überprüft, wie groß die Verkippung des Messschlittens beim Verfahren war. Die Justierung der Hauptplatte wurde so lange wiederholt, bis ein minimaler Kippbereich erreicht wurde.

Weil das Prüfgerät überwiegend bis 20 mm eingesetzt werden soll, wurde erst die Verkippung im Messbereich von 20 mm untersucht. Es zeigt sich ein Kippwinkelbereich von 5'' in x-Richtung (Winkel α) und von 12'' in y-Richtung (Winkel β) bei einem Messbereich von 18 mm. In Diagramm 1 ist dieser Kippwinkel dargestellt.

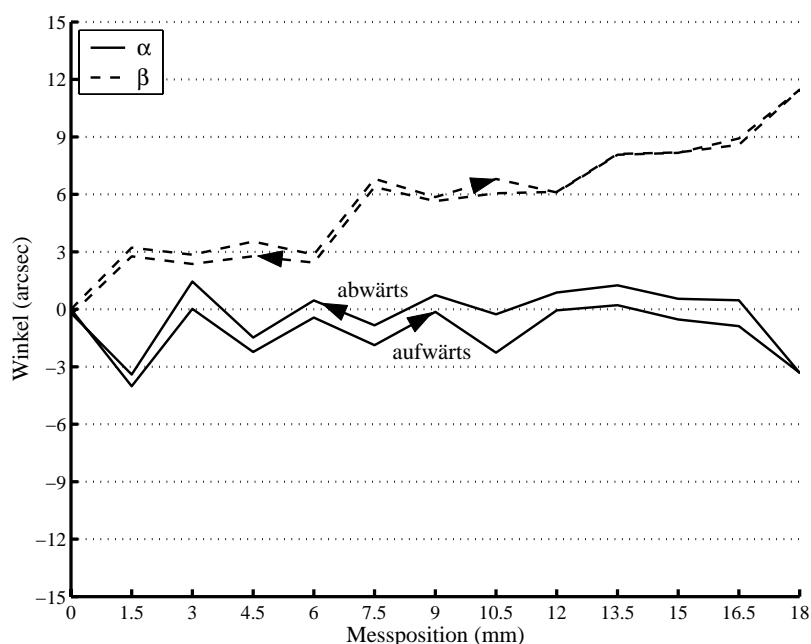


Diagramm 1: Kippwinkelbereich

Durch die Befestigung der drei Führungen zwischen der Zwischenplatten 1 und 2 hat das Kugelführungssystem bessere Führungseigenschaften, bzw. kleiner Verkippung, als eine einzelne Kugelführung. Aber diese Verkippung ist trotzdem nicht ausreichend für die Anforderungen des Präzisionsprüfgerätes, da mit dieser Verkippung bei einem Versatz von 100 μm ein Abbe-Fehler von ca. 6 nm verursacht werden kann. Aus diesem Grund ist die Eliminierung der Verkippung notwendig und erwies sich die Realisierung der Winkelregelung als richtig.

4.2.1.3 Eigenschaften des motorischen Antriebs

Der Grobantrieb des Messschlittens wird mit einem Grobmotor realisiert, der eine Gewindespindel antreibt. Die Gewindespindel hat eine Steigung von 0,5 mm. Der Stellbereich des Grobantriebs wird von zwei Mikroschaltern als Kollisionsschutz begrenzt. Dadurch kann die Automatisierung des Prüfvorgangs gesichert werden.

Der Motor kann über eine Software angesteuert werden. Im Programm wird bei jeder Messposition ein Stop-Befehl von der Auswerteeinheit zum Motor gesendet. Die Positionierung des Messschlittens kann wegen einer Zeitverschiebung zwischen PC und Auswerteeinheit nicht genau auf den gewünschten Punkt erfolgen. Es entsteht ein Nachlauf

des Messschlittens (Diagramm 2). Um den geplanten Messpunkt möglichst genau anfahren zu können, wurde der Nachlauf ermittelt, um ihn im Programm zu kompensieren. Mit der Kompensation des Nachlaufes kann eine grobe Positionierung innerhalb von weniger als 20 μm erzielt werden (Diagramm 3). Für die Überprüfung des Messtasters kann auf eine absolute Positionierung verzichtet werden, weil es sich nur um eine Unterschiedsmessung zwischen dem Messtaster und dem Interferometer des Präzisionsprüfgerät handelt. Deswegen ist die so erzielte Grobpositionierung vollkommen ausreichend.

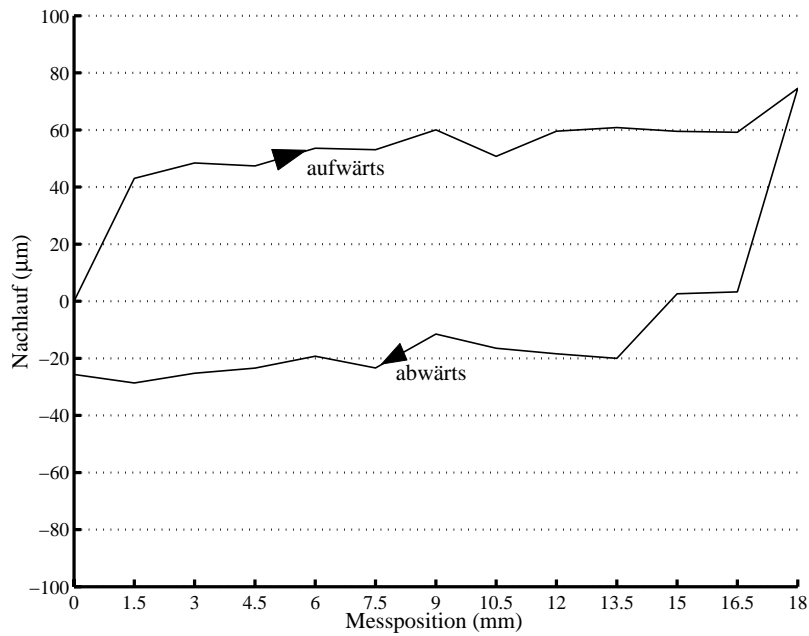


Diagramm 2: Nachlauf der Position vor der Kompensation

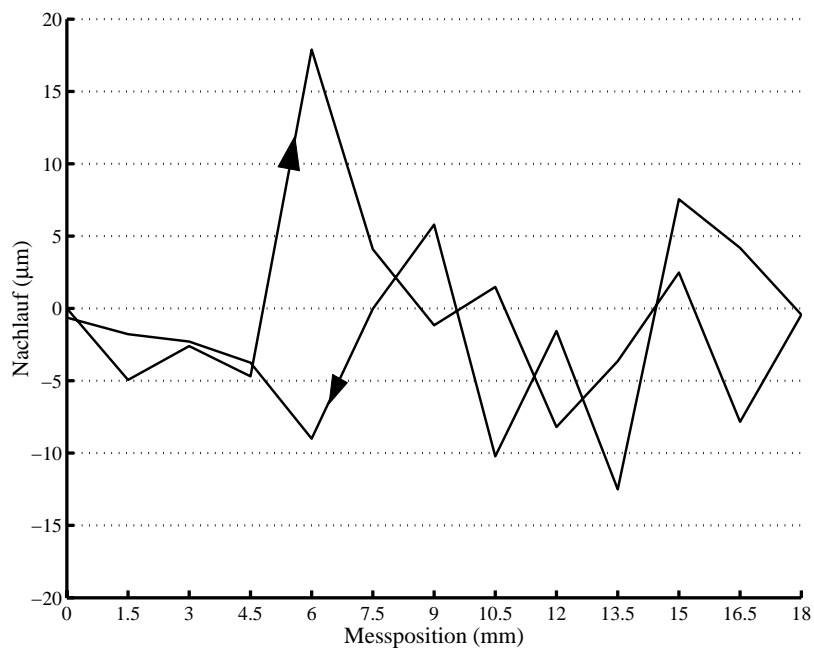


Diagramm 3: Nachlauf der Position nach der Kompensation

4.2.1.4 Eigenschaften und Aufgaben der Piezotranslatoren

Da der motorische Spindelantrieb keine Positionierung im Nanometerbereich zulässt, ist ein zweites, aufgesetztes Antriebssystem erforderlich. Piezo-Aktoren sind wegen ihrer hohen Feinfühligkeit der Bewegung für den Einsatz genauer und schneller Längenänderung geeignet. In der Feinpositionierung im Nanometerbereich werden deswegen oft Piezo-Antriebe eingesetzt /4-2 bis 4-10/. Durch die Anwendung der Piezotranslatoren wird eine Spannungsänderung mit hoher Feinfühligkeit in eine Längenänderung umgesetzt /4-11/.

Auf dem Grobantrieb wird deshalb ein Feintrieb mit drei Piezotranslatoren /4-12/ unter dem Messtisch angeordnet, die sowohl eine Linearbewegung als auch eine Winkeländerung des Messtisches ermöglichen. Die Piezotranslatoren sind auf einem Halbkreis, jeweils um 90° versetzt, angeordnet. Dabei bewirken die symmetrische Ansteuerung von zwei Piezotranslatoren (PT_{y_1} , PT_{y_2}), eine Winkeländerung in x-Richtung und die Ansteuerung des Piezotranslatoren PT_x eine Winkeländerung in y-Richtung (Bild 6). Werden alle drei Piezotranslatoren gemeinsam angesteuert, erfolgt eine lineare Verschiebung zur Feinpositionierung des Messkörpers.

Für die Ansteuerung der Piezotranslatoren stand ein 12 bit-DA-Wandler zu Verfügung. Um eine relative Feinpositionierung des Messtisches von 1 nm zu erreichen, muss eine Unterteilung um den Faktor 10 eingeführt werden. Es können deshalb bei einer Empfindlichkeit von 300 nm/V nur ca. $\pm 2 \mu\text{m}$ als Verschieberegion genutzt werden. Dieser Bereich ist vollkommen ausreichend, da zur Feinpositionierung nur $\pm 0,3 \mu\text{m}$ erforderlich sind. Ziel der Feinpositionierung ist es nämlich, eine periodische Position anzufahren, die ein ganzzahliges Vielfaches der halben Laserwellenlänge ($0,32 \mu\text{m}$) ist. Damit werden Fehlereinflüsse durch Nichtlinearitäten des Laserinterferometers minimiert.

Durch die Winkelverstellung mit Hilfe der Piezotranslatoren sollen mögliche Verkippungen des Messtisches, die vor allem durch die Kugelführungen verursacht werden, ausgeglichen werden. Die Verkippungen betragen ca. $\pm 20''$ (im Messbereich von 60 mm) /9-6/. Deshalb wird ein Winkelstellbereich mit Hilfe der Piezotranslatoren von $\pm 30''$ vorgesehen. Das entspricht einer Längenänderung von $\pm 5,5 \mu\text{m}$.

Der gesamte Stellenbereich der Piezotranslatoren beträgt $50 \mu\text{m}$ /4-13/. Der Bereich der Eingangsspannung der Piezotranslatoren liegt bei 0 bis 150 V. Um diesen Stellbereich auszunutzen, wird mit einem Hochspannungsverstärker die Eingangsspannung 15-fach verstärkt, da der Bereich der Ausgangsspannung von DA-Wandler bei -10 bis 10 V liegt. Mit diesem Stellbereich kann eine maximale Kippung des Messtisches von $1,15'$ gleichzeitig in x- und y-Richtung erzeugt werden. Dies soll hier für die Winkelregelung im Bereich von $\pm 30''$ ausreichen.

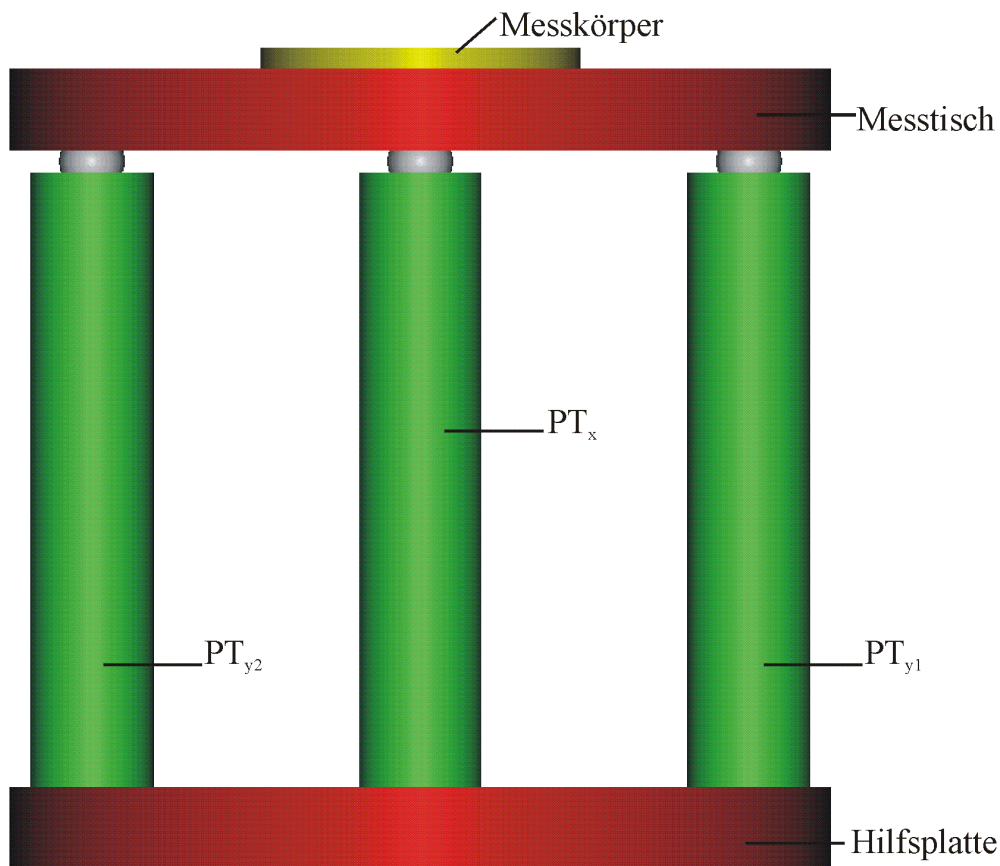


Bild 6: Anordnung der Piezotranslatoren

4.2.2 Planspiegelinterferometer im Präzisionsprüfgerät

Im Präzisionsprüfgerät befindet sich ein Planspiegelinterferometer als Längenmeseinheit. Im Bild 7 ist das Interferometer des Prüfgerätes dargestellt. Es handelt sich um ein polarisationsoptisches Homodyn-Planspiegelinterferometer (Abschnitt 3.4, Bild 4-1). Außer dem Messkörper sind die gesamten Bauelemente auf der Trägerplatte befestigt. Das Laserlicht wird über einen polarisationserhaltenden Monomode-Lichtwellenleiter in das Interferometer eingekoppelt und anschließend kollimiert. Der Vorteil des Einstrahl-Planspiegelinterferometers besteht darin, dass der Laserstrahl genau in Flucht mit der Messachse des Messtasters gebracht werden kann. Rechts vom Strahlteiler befindet sich der Referenzspiegel mit dem Schwinger an einem Justierteil, um den Spiegel genau senkrecht zum Laserstrahl justieren zu können. Links sind an zwei Strahlteilern oben der Fotoempfänger 3, der als Gleichlichtempfänger dient, und unten die Fotoempfänger 1 und 2, die zwei um 90° phasenverschobene Signale empfangen, angeordnet (Bild 7).

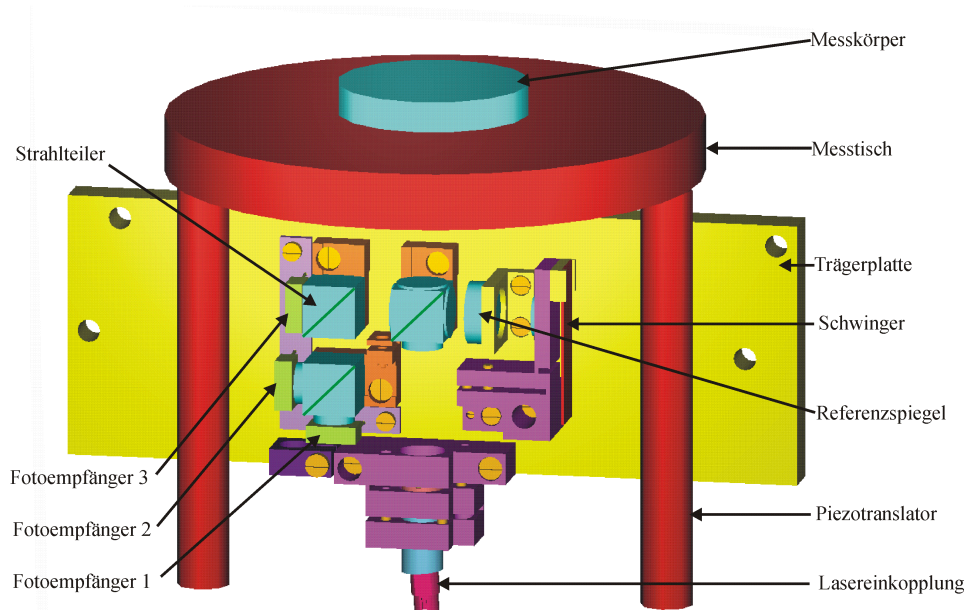


Bild 7: Interferometer des Präzisionsprüfgerätes

4.2.3 Aufbau des Winkelsensors und Winkelreglers

4.2.3.1 Aufgabe des Winkelsensors

Der Winkelsensor arbeitet nach dem Prinzip eines fotoelektronischen Autokollimationsfernrohrs. Er besteht aus einer Lichtquelle, einem Strahlteiler, einer Kollimationsoptik und einer Quadrantenfotodiode (Bild 8). Um eine preisgünstige Lösung mit einer kleinen kompakten Baugröße zu erhalten, wurde der Winkelsensor auf der Basis eines Abtastkopfes eines CD-Players aufgebaut /4-14, 4-15/. Die Lichtquelle ist in diesem Falle eine Laserdiode. Das vom Messspiegel reflektierte Licht wird auf der Quadrantendiode fokussiert. Bei einer Verkipfung des Messspiegels wandert dieser Fokus aus dem Zentrum der Diode aus und es entstehen zwei, dem Kippwinkel proportionale Ausgangsspannungen U_x und U_y (Bild 8). Durch eine entsprechende Dimensionierung des Kollimators wird eine hohe Winkelauflösung von $0,02''$ in einem Winkelbereich von $\pm 30''$ ermöglicht. Diese Eigenschaft ist optimal an die Erfordernisse des Präzisionsprüfgerätes angepasst.

Der Laserstrahl des Winkelsensors wird im Präzisionsprüfgerätes so ausgerichtet, dass der Arbeitsbereich des Sensors optimal genutzt werden kann.

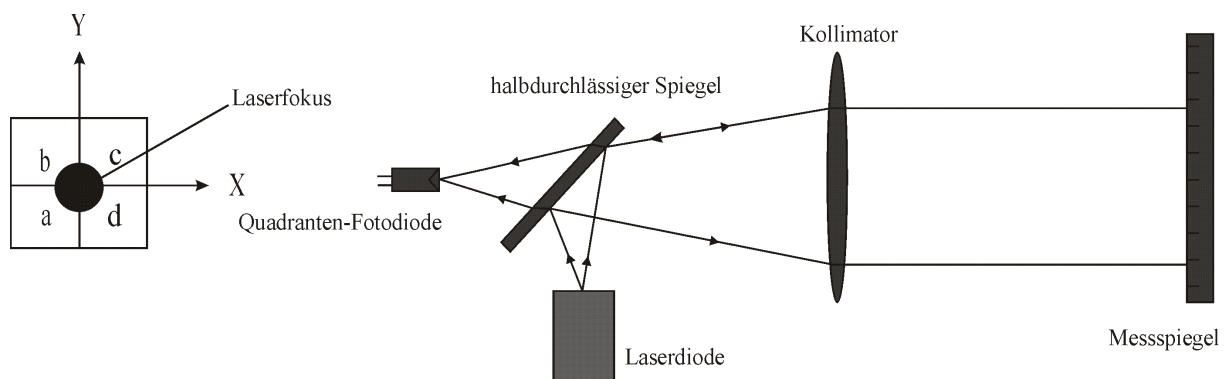


Bild 8: Arbeitsprinzip des Winkelsensors

4.2.3.2 Signalverarbeitung des Winkelsensors

Die Signale der Quadratendiode werden durch eine elektronische Auswerteeinheit verarbeitet (siehe Bild 9). Um die Lage des Fokus auf der Quadratendiode eindeutig in den beiden Achsen zu detektieren, müssen die Einzelsignale folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$\text{x-Richtung : } U_x = (U_c + U_d) - (U_a + U_b) \quad (8)$$

$$\text{y-Richtung : } U_y = (U_b + U_c) - (U_a + U_d) \quad (9)$$

Dazu werden die vier Einzelsignale zunächst verstärkt. Damit das Ausgangssignal nicht von Intensitätsschwankungen beeinflusst wird, werden die Signale mit Hilfe der Summensignale aller vier Empfänger normiert. Anschließend erfolgt für jede Achse die Differenzbildung entsprechend der beiden obenstehenden Gleichungen.

Der Verstärkungsfaktor wird nach Bedarf eingestellt, da Auflösung und Messbereich von diesem Faktor abhängig sind. Anschließend werden beide Messwerte durch einen AD-Wandler /4-16/ in digitale Messwerte umgewandelt und ins Messprogramm übertragen.

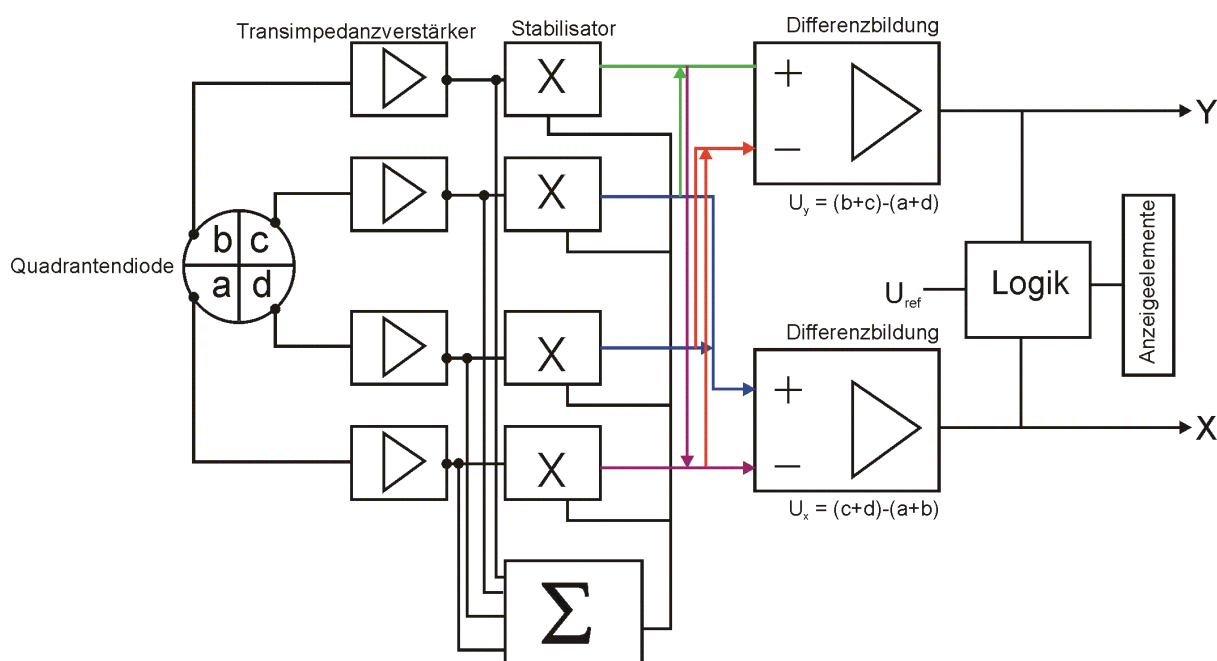


Bild 9: Signalverarbeitung vom Winkelsensor

4.2.3.3 Kalibrierung des Winkelsensors mittels Autokollimationsfernrohr

Um die elektronischen Ausgangssignale des Winkelsensors in entsprechende Winkelwerte umzurechnen, ist eine Kalibrierung erforderlich. Sie wurde mit einem elektronischen Autokollimationsfernrohr (AKF) der Firma Möller-Wedel durchgeführt. Dieses AKF besitzt eine Auflösung von 0,1" in einem Messbereich von 30' und ist mit einer Unsicherheit von 0,3" spezifiziert. Damit kann die Kennlinie zwischen der Ausgangsspannung des Winkelsensors und dem Kippwinkel gefunden werden. Die Untersuchung zeigt, dass im Messbereich von $\pm 30''$ die Kennlinie in beiden Achsen fast linear ist (Diagramm 4-1). Die beiden Kennlinien werden zur Berechnung der Winkelwerte im Präzisionsprüfgerät herangezogen.

In Diagramm 4-1 ist das Verhältnis zwischen den Winkelwerten des AKF und des verwendeten Winkelsensors dargestellt. Diagramm 4-2 zeigt die Differenz zwischen den beiden Winkelwerten ($\Delta\alpha$, $\Delta\beta$) in x- und y-Richtung.

Die Abweichung von der Ausgleichsgerade betragen maximal $\pm 0,6''$ in der x-Richtung und $\pm 0,3''$ in der y-Richtung. Diese Abweichung führt zu vernachlässigbaren Abbe-Fehlern (bei einem Versatz $< 100 \mu\text{m}$) von $< 0,3 \text{ nm}$.

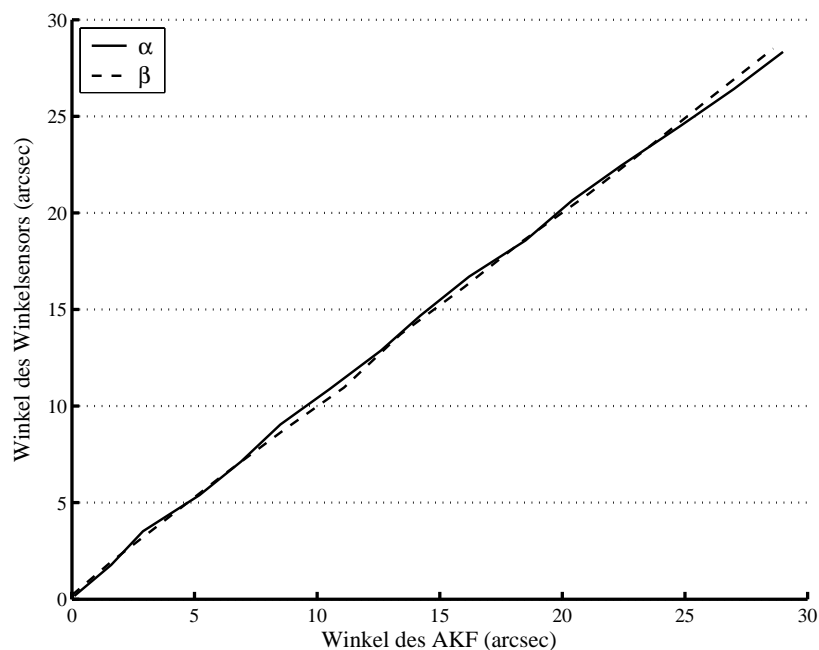


Diagramm 4-1: Winkelsensor nach der Kalibrierung

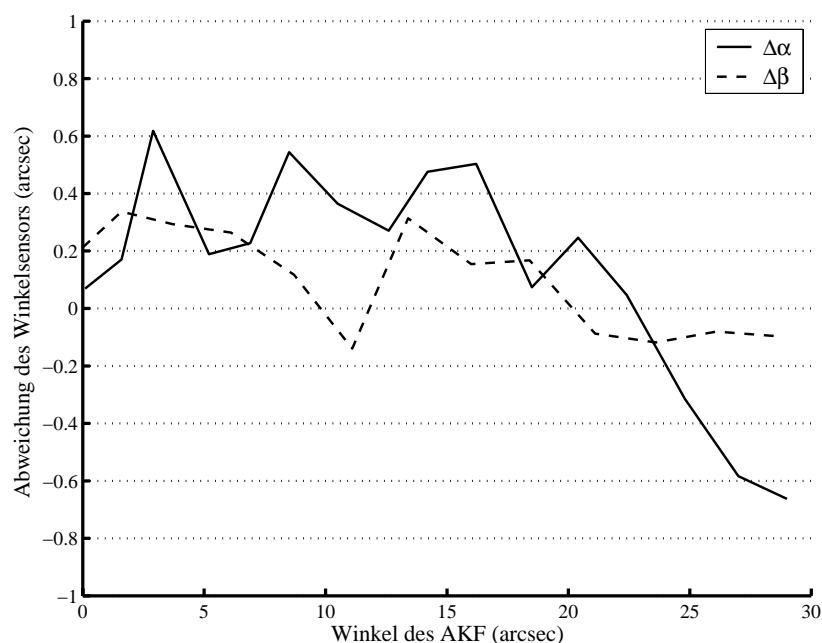


Diagramm 4-2: Differenzwerte zwischen dem AKF und dem kalibrierten Winkelsensors

4.2.3.4 Aufgabe des Winkelreglers

Wird durch den Winkelsensor eine Verkipfung registriert, muss sie mit Hilfe der drei Piezotranslatoren ausgeregelt werden. Dazu wird ein digitaler PID-Regler verwendet. Dieser wird mit einer designierten PID-Funktion des verwendeten Softwaremodules Testpoint realisiert /4-17/.

Das Prinzip der PID-Regelung /4-18/ ist im folgenden Bild 10 dargestellt.

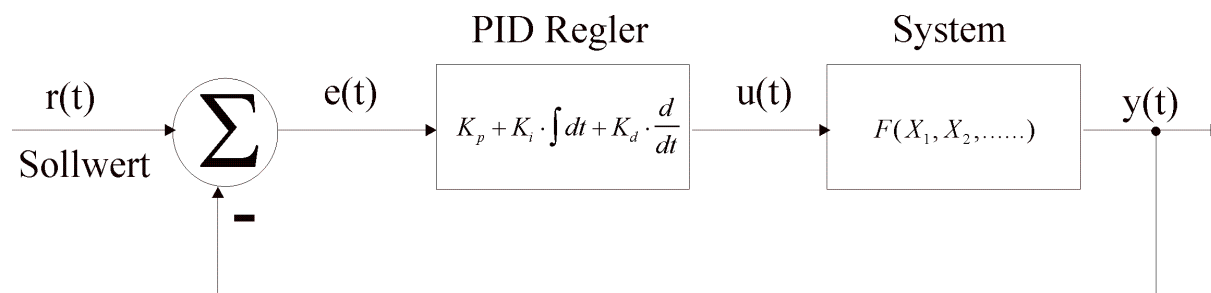


Bild 10: Regelkreis mit einem PID Regler

Durch den Vergleich zwischen dem Sollwert $r(t)$ und Messwert $y(t)$ ergibt sich der Differenzwert $e(t)$, womit der PID Regler einen Wert $u(t)$ ermittelt und an die Piezotranslatoren weitergibt. Der Vorgang wird ständig wiederholt, bis $e(t) = 0$ und damit der erwünschte Sollwert $r(t)$ erreicht ist. Während der Messung läuft dann diese Rückführung kontinuierlich. Für die Reglerdimensionierung müssen die Regelparameter K_p , K_i und K_d ermittelt werden. Dazu muss die zu regelnde Strecke identifiziert werden. Die betreffenden Parameter der PID-Regelung können mit dem Bode-Diagramm und der theoretischen Simulation der entsprechenden PID-Parameter ermittelt werden. Danach werden mit diesen Parametern die Eigenschaften der Regelung, insbesondere die Regelzeit und Regelgenauigkeit, praktisch überprüft. Damit können die optimalen Parameter eingestellt werden.

4.2.3.5 Zusammenwirken mit Piezotranslatoren

Aus konstruktiven Gründen sind die Verbindungsachsen der Piezotranslatoren PT_x - PT_{y1} und PT_x - PT_{y2} um 45° zu der y -Achse des Winkelsensors gedreht. Dadurch stimmt die Winkelachse des Winkelsensors nicht mit der Kippachse der Piezotranslatoren um die x -Achse überein. Man kann trotzdem eine einfache Zuordnung zwischen der Winkelmessung und den Piezotranslatoren (PT) realisieren und die Entkopplung der Piezobewegungen erreichen, wenn die Kippung um die x -Achse mit dem PT_x und die Kippung um die y -Achse durch die gegenläufige Ansteuerung von PT_{y1} und PT_{y2} (Bild 11) erfolgt. Bei der Kippung um x -Achse werden PT_{y1} und PT_{y2} als feste Drehpunkte betrachtet und die Winkeländerung φ_x ist von der Hebelgröße h_x abhängig. Bei der Kippung um die y -Achse ist PT_x der Drehpunkt. Die Hebelgröße h_y entscheidet die Winkeländerung φ_y .

Wenn nur PT_{y1} oder PT_{y2} für die φ_y -Regelung verwendet wird, entsteht gleichzeitig ein zusätzlicher φ_x -Kippwinkel. Wird die φ_y -Regelungsspannung in zwei Teile gleichwertig aber mit umgekehrten Vorzeichen auf beide PT_y aufgeteilt, bleibt φ_x bei der φ_y -Regelung nahezu konstant. Das Übersprechen zwischen den Winkelachsen wird somit minimal. Dies erweist sich auch nach der praktischen Erfahrung als günstig für die Stabilität des gesamten Regelungssystems.

Mit der entworfenen Winkelregelung und den Piezotranslatoren ist eine Verkippung $< 0,2''$ erreichbar. In Diagramm 5 ist während der Verschiebung des Messtisches die Winkelmessung der Verkippung vom Messtisch im Messbereich von 0 bis 18 mm auf einigen bestimmten Messpunkt dargestellt. Mit dieser Unsicherheit von $0,2''$ ist bei einem Versatz von $100 \mu\text{m}$ der Abbe-Fehler von $< 0,1 \text{ nm}$. Damit ist die Genauigkeit des Winkelreglers für die Prüfaufgabe ausreichend.

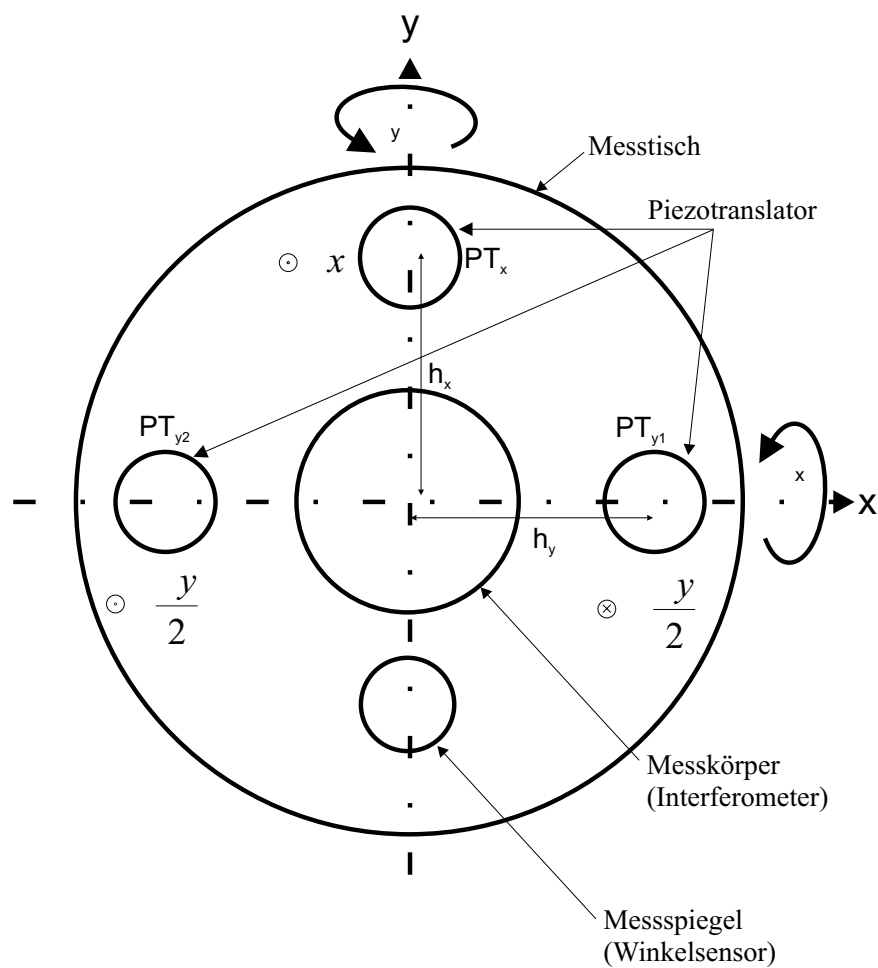


Bild 11: Darstellung der Winkelregelung

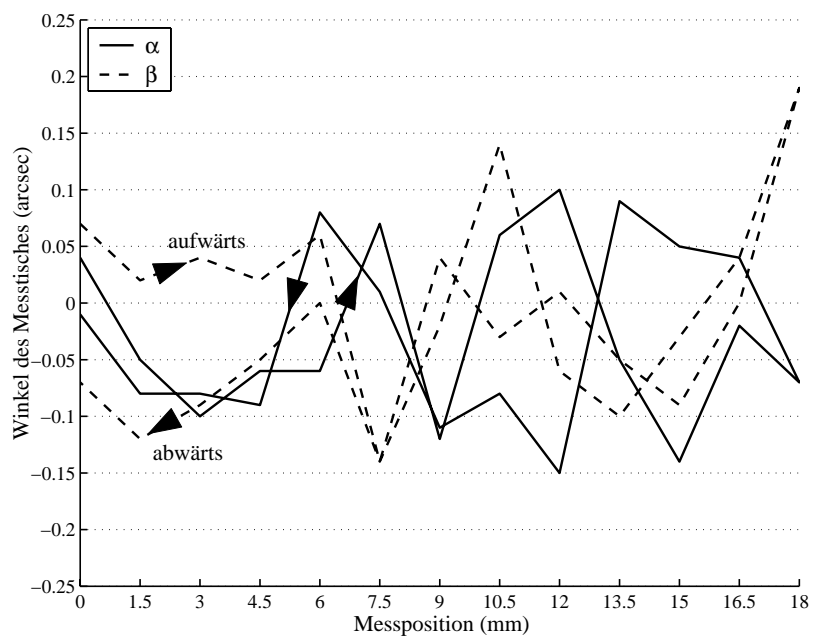


Diagramm 5: Verkipfung des Messtisches mit der Winkelregelung

4.2.4 Längenfeinregler

Eine Interferenzordnung ($\lambda/2$) wird in der Auswertelektronik in 256 Teile geteilt. Es wird angestrebt, dabei eine hohe Äquidistanz der Schritte zu erzielen. In der Praxis treten jedoch fast immer Interpolationsfehler auf /3-6, 4-19, 4-20/. Bei üblichen fotoelektrischen Abtastschaltungen liegen diese Nichtlinearitäten bei einigen Prozent einer Interferenzordnung. Dieser Interpolationsfehler ist von der Amplitude, dem Offset, und der Phasendifferenz der beiden fotoelektrischen Signale abhängig /4-21, 4-22, 4-23/. Die Verteilung des Interpolationsfehlers ist periodisch innerhalb einer Interferenzordnung von $\lambda/2$. Dieser Fehler ist zu vermeiden, wenn vom Interferometer des Prüfgerät nur ganzzahlige Vielfache von $\lambda/2$ angefahren werden /4-24/. Hierzu ist es erforderlich, einen Längenfeinregler einzuführen, der die Funktion hat, die Position des Messkörpers immer genau auf eine volle Interferenzordnung zu regeln.

Wie im Bild 12 dargestellt, wird für die Längenfeinregelung ebenfalls ein PID Regler (PID_1) verwendet. Dieser regelt an jedem Messpunkt stets auf die gleiche periodische Position innerhalb der $\lambda/2$ -Ordnung, indem der Zählerstand des Interferometers auf einen entsprechenden periodischen Impulswert (mod 256) geregelt wird. Diese Position wird am Anfang einmalig auf Null gesetzt. Danach wird dieser Wert als Sollwert des Regelkreises betrachtet.

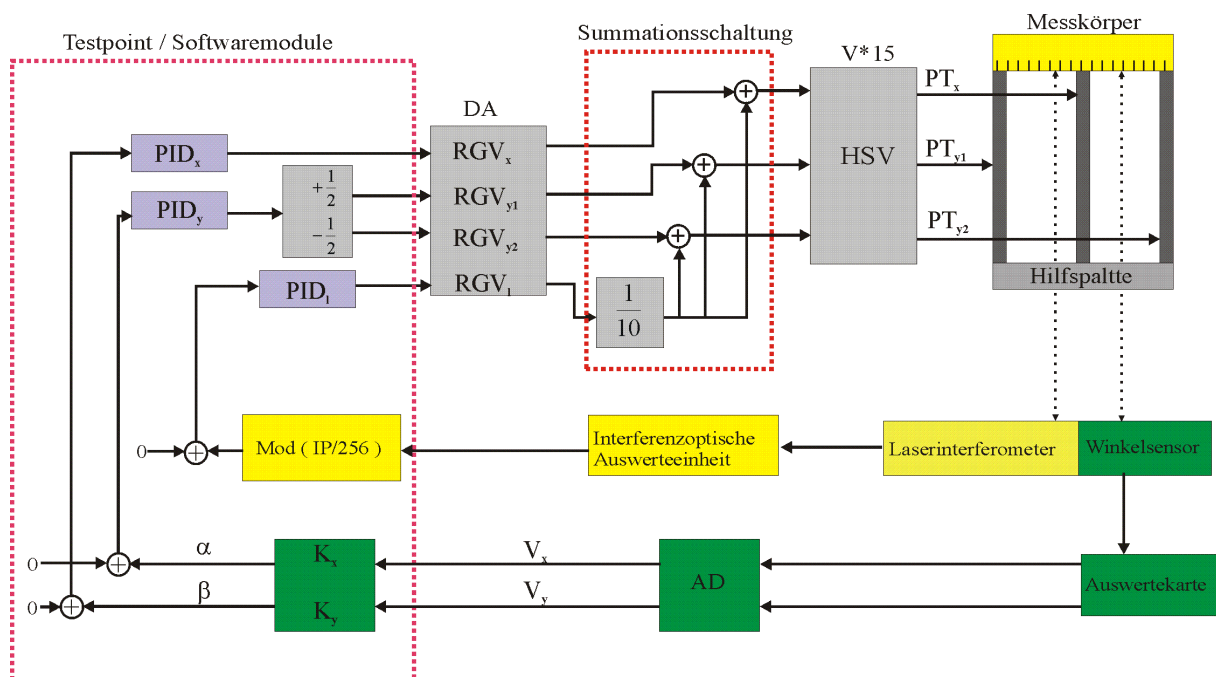


Bild 12: Gesamter Regelkreis vom Winkel- und Längenfeinregler

Nach dem gleichen Verfahren wie bei der Winkelregelung können die Parameter dieses PID-Reglers ermittelt und im Messprogramm eingesetzt werden.

Ähnlich der Winkelregelung wird die Regelspannung des Längenfeinreglers auch nach der Berechnung im Messprogramm über eine DA-Umwandlung gleichmäßig an die drei Piezotranslatoren ausgegeben.

Für die Winkelregelung reicht eine vorhandene 12 Bit AD/DA-Wandelkarte aus, die hier eine entsprechende Längenauflösung von 10 nm und eine Winkelauflösung von 0,055" ermöglicht. Für die Längenmessung ist diese Auflösung allerdings nicht ausreichend. Deswegen wurde hier eine zusätzliche Schaltung aufgebaut, mit der die Ausgangsspannung des D/A-Wandlers für die Längenfeinregelung analog durch 10 dividiert wird, so dass man eine Positionierauflösung von 1 nm erreicht. Parallel dazu werden in dieser Schaltung die drei

Regelspannungen des Winkelreglers jeweils mit der des Längenfeinreglers summiert und anschließend über den dreikanaligen Hochspannungsverstärker an die Piezotranslatoren angelegt. Eventuelle ungleiche Kennlinien der drei Piezotranslatoren würden zu einer Verkipfung des Messkörpers führen. Diese wird aber wiederum automatisch über die Winkelregelung ausgeregelt. Damit ist eine streng parallele Feinverschiebung des Messkörpers immer gegeben.

Der Längenfeinregler hat einen Stellbereich von etwa 2 μm . Nach den Untersuchungen liegt die Regelunsicherheit bei ± 1 Impuls (ca. $\pm 1,2$ nm). Im Zusammenhang mit dem Grobtrieb können nun die für die Kalibrierung erforderlichen Positionen mit ausreichender Genauigkeit angefahren werden.

4.3 Überblick über die zu prüfenden Messtaster

Der Anwendungsbereich des entwickelten Präzisionsprüfgerätes ist die messtechnische Überprüfung eindimensionaler Längenmesstaster. Beispielsweise gehören präzise elektronische oder optische Messtaster, die in Abschnitt 2.1 und 3.1 dargestellt worden sind, zum Anwendungsgebiet des Präzisionsprüfgerätes. Prinzipiell sollen mit dem Prüfgerät alle hochauflösenden Messtaster geprüft werden können. Mit dem zur Zeit gestalteten Aufbau ist diese Anwendung für Messtaster verschiedener Typen sowohl in kleinen als auch in großen Messbereichen problemlos möglich, die einen Spannschaft von $\varnothing 8$ und eine Messspanne bis 20 mm haben. Für die Überprüfung von Messtastern mit anderem Spannschaft kann eine modifizierte Deckplatte benutzt werden. Andere Messbereiche können geprüft werden, indem die Länge der drei unter der Deckplatte stehenden Säulen geändert wird (Bild5).

Insbesondere soll der Messtaster LM 20 (Bild13) der Firma SIOS mit diesem Gerät überprüft werden. Mit dem interferenzoptischen Messtaster LM 20 der Firma SIOS Messtechnik GmbH sind erstmals taktile Messungen über einen Messbereich von 20 mm mit Nanometerauflösung möglich. Die Messtaster sind durch den Spannschaftdurchmesser von $\varnothing 8\text{h}6$ kompatibel zu konventionellen Messtastern.

Der Messtaster ist mit einem Miniaturinterferometer ausgerüstet, das die Bewegung des Messbolzens mit einer Auflösung von 1 nm misst. Der optische Aufbau des Messtasters ist im Bild 14 dargestellt. Kernstück ist ein lichtwellenleitergekoppeltes $\lambda/2$ -Interferometer mit Tripelprismen. Der aus einem Monomode-Lichtwellenleiter über einen Kollimator eintretende Laserstrahl wird durch einen Strahlteiler in zwei Strahlen geteilt, durchläuft Referenztripelprisma und Messtripelprisma und interferiert anschließend im Strahlteiler.

Durch die Verschiebung des mit dem Messbolzen verbundenen Tripelprismas entsteht eine Wegänderung, die durch die Überlagerung der beiden reflektierten Strahlen von Mess- und Referenztripelprisma detektiert werden kann. Das Interferenzsignal wird mit zwei Abtast-Lichtwellenleitern, die eine $\pi/2$ -Phasenverschiebung besitzen, zu den Fotoempfängern in der Auswerteeinheit übertragen.

Die Auswertung erfolgt nach dem Homodyn-Verfahren. Mit einer Korrektur der Umwelteinflüsse auf die Laserwellenlänge wird die hohe Messgenauigkeit sichergestellt. Die Bedienung und Anzeige kann wahlweise über ein separates Display oder über einen PC mit entsprechender Software erfolgen /4-25/.

Die Bewegung des Messbolzens erfolgt motorisch. Der Messtaster besitzt eine automatische Abschaltung des motorischen Antriebs, wenn der Messbolzen auf dem Messkörper eine zuvor einstellbare Messkraft aufgebaut hat.

Bei der vorgesehenen Anwendung sollen interferometrische Messtaster mit dem Präzisionsprüfgerät geprüft werden. Der Messtaster ist normalerweise mit einem unstabilisierten Laser ausgerüstet. Er besitzt damit eine Unsicherheit von $4 - 5 \cdot 10^{-7}$, bzw. 8-10 nm in einem Messbereich von 20 mm. Um die hohe Genauigkeit dieses Messtasters nachzuweisen, muss bei der Realisierung der Prüfung mit dem Prüfgerät deshalb größte

Aufmerksamkeit auf die Verhinderung bzw. Minimierung aller Störeinflüsse gelegt werden. Damit soll eine leistungsfähige Kalibrierung der Messtaster ermöglicht werden.

Für die Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Prüfgerätes wurde noch ein Schritt weitergegangen. Der für die experimentellen Untersuchungen verwendete Messtaster LM 20 wurde mit einem stabilisierten Laser ausgerüstet. Damit ist man nun in der Lage, Fehlereinflüsse des Prüfgerätes praktisch zu ermitteln und Möglichkeiten zur Eliminierung der Messfehler zu finden. Zum Schluss wird die Genauigkeit des Prüfgerätes durch diese Vergleichsmessung experimentell belegt.

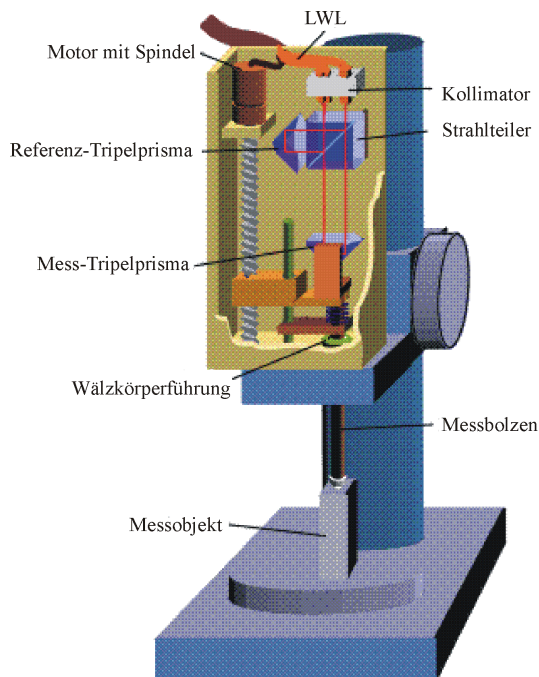


Bild 13: Interferenzoptischer Messtaster LM 20 auf einem Messtisch /4-25/

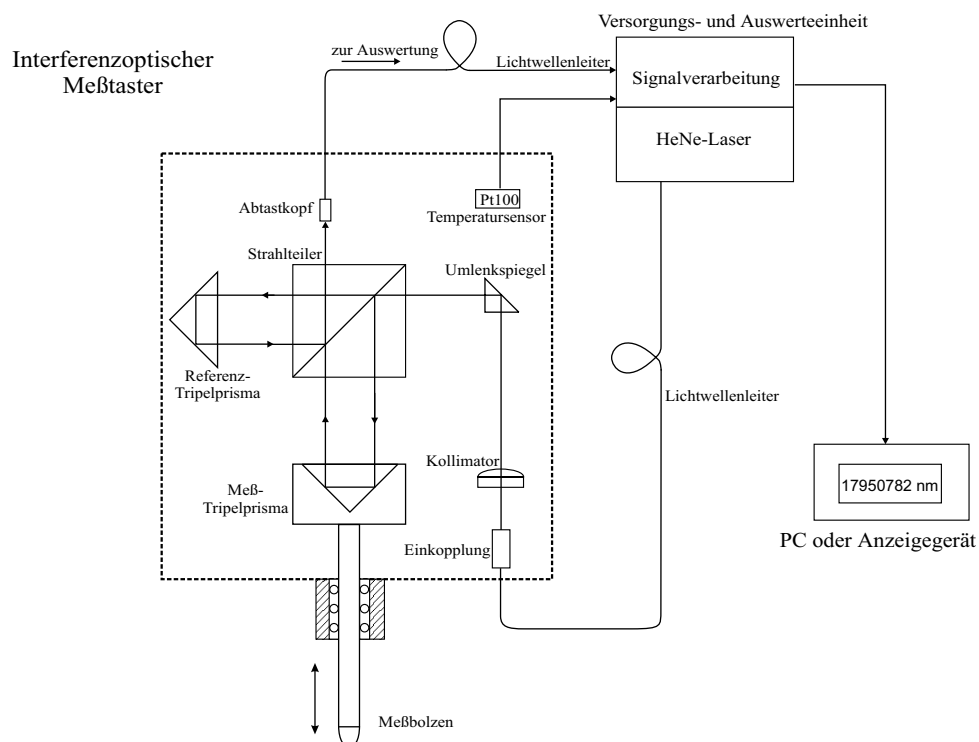


Bild 14: Aufbau des interferenzoptischen Messtasters

4.4 Aufgaben der Auswerteeinheiten

Um die Ausgangssignale des Laserinterferometers effizient auszuwerten und die betreffenden elektronischen Komponenten kompakt zu integrieren, stellt die Firma SIOS eine komplette, aber flexibel anpassbare Auswerteeinheit für interferenzoptische Messsysteme her. Mit diesem Gerät können die grundsätzlichen Aufgaben der Auswertung der Messsignale erfüllt werden. Gleichzeitig ist eine Laser-Lichtquelle mit geeigneter Lichtwellenleiter-Kopplung enthalten. Außerdem können andere zusätzliche elektrische Auswertekarten, wie z.B. eine Einsteckkarte für einen Winkelsensor integriert werden. Auf dieser Basis wurde für die Auswertung und Versorgung des Interferometers des Prüfgerätes eine speziell angepasste Auswerte- und Versorgungseinheit aufgebaut, die alle Funktionen zur Präzisionsprüfung erfüllen kann.

Für das Präzisionsprüfgerät wird eine Auswerteeinheit benötigt, die parallel solche Aufgaben, wie Erfassung und Digitalisierung der Messsignale, Aufnahme zusätzlicher Messwerte, z.B. der Umweltparameter und der Winkelwerte sowie die Steuerung des Motors nach speziellen Messprogrammen übernimmt.

Die Auswerteeinheiten besitzen standardmäßig, beispielsweise für die Messtaster LM 20, zunächst die folgenden Komponenten und Funktionen:

1. Laserlichtquelle: He-Ne Laser, der mit einer Kopplung für Lichtwellenleiter versehen ist.
2. Optoelektronische Auswertekarte: Hier werden die vom Interferometer gelieferten interferentiellen Messsignale verarbeitet und zwei um 90° phasenverschobene analoge Signale ausgegeben. Zur Gewährleistung einer hohen Stabilität der fotoelektrisch gewandelten analogen Signale ist ein Regler für Amplitude und Offset enthalten.
3. Längenauswertung: Die analogen Messsignale werden hier einem Vor- Rückwärts-Zähler zugeführt und in einen Zählerstand gewandelt. Dieser Zählerstand wird mit der Vakuumwellenlänge des verwendeten Laserlichts unter der Verwendung der Edlen-Formel in einen Längenmesswert umgerechnet. Dieser Längenmesswert wird direkt zur Anzeige oder über verschiedene Schnittstellen (RS232, GPIB) zum PC weitergeführt.
4. Schwinger: Diese Schaltung wird zur Modulation des Referenzspiegels benötigt. Man kann verschiedene Frequenzen oder Amplituden einstellen. Durch dieses Verfahren wird die Regelung der Amplitude und des Offsets der beiden Interferenzsignale des Interferometers ermöglicht. Die aufmodulierte Schwingung wird anschließend durch eine Mittelwertbildung herausgefiltert.
5. Motorsteuerung: Mit dieser Steuerkarte wird die Positionierung des Messschlittens mit Hilfe des Getriebemotors realisiert.
6. Erfassung der Umweltparameter: Die Umweltbedingungen Temperatur und Luftdruck werden mit Sensoren gemessen, analog-digital gewandelt und zur Korrektur der Wellenlänge zur Verfügung gestellt.

Für den Messtaster LM 20 reichen die oben vorgestellten Komponenten aus. Für das Prüfgerät werden folgende zusätzliche Komponenten benötigt:

7. Feuchtsensor: um die Feuchtigkeit zu erfassen und eine genaue aktuelle Wellenlänge für die Längenmessung zur Verfügung zu stellen, findet im Prüfgerät eine zusätzliche Feuchtemessung statt, die hier durch einen kapazitiven Feuchtesensor ermöglicht wird. Dieser Sensor ist mit dem Temperatursensor in einem Sensorkopf integriert, der dann nahe dem Interferometer des Prüfgerätes angeordnet wird.
8. Laserdiodenansteuerung: Durch diese Schaltung wird die Laserdiode des Autokollimationssensors mit einer stabilisierten Spannung eingespeist.
9. Winkelsensorauswertung: Die Signalverarbeitung des Winkelsensors wird mit dieser Karte realisiert. Zwei analoge Messsignale der x- und y-Winkelwerte werden zu einem AD Wandler übertragen, die anschließend im Messprogramm in Winkelwerte umgerechnet werden.

Die Auswerteeinheiten des Präzisionsprüfgerätes und des Messtasters werden über ihre Schnittstellen mit einem Steuer-PC verbunden. Da die Steuerung des Prüfablaufes, insbesondere die Motorsteuerung und die Winkelregelung in Echtzeit laufen müssen, ist für das Prüfgerät eine parallele GPIB-Schnittstelle erforderlich. Der Messtaster ist standardmäßig mit einer RS-232-Schnittstelle ausgerüstet ist. Deshalb wurde versucht, alle Funktionen so zu realisieren, dass die Übertragungsgeschwindigkeit dieser seriellen Schnittstelle ausreicht.

Prüfgerät	Funktion	Messtaster
Lichtwellenleiterkopplung	Zulieferung des Laserlichtes	Lichtwellenleiterkopplung
Optoelektronische Auswertekarte	Auswertung der Interferenzsignale	Optoelektronische Auswertekarte
GPIB Schnittstelle	Ausgabe der Längswerte	RS232 Schnittstelle
Schwinger	Modulation	Schwinger
Motorsteuerung	Antrieb	Motorsteuerung
Umweltauswertekarte	Umweltparametererfassung	Umweltauswertekarte
Laserdiode	Netzspannung	
Winkelauswertekarte	Winkelauswertung	

Bild 15: Auswerteeinheiten für Präzisionsprüfgerät und Messtaster

4.5 Signalverarbeitung

4.5.1 Übersicht der Signalverarbeitung

Bei der Kalibrierung laufen mehrere Signalverarbeitungen und –übertragungen ab. Um diesen Prozess zu verdeutlichen, wird hier eine Zusammenfassung des gesamten Signalablaufes gegeben (Bild 16). Grundsätzlich läuft die Signalverarbeitung in drei Hauptteilen ab: in den Messgeräten selbst, in der Elektronik und im PC mittels spezieller Software. Im folgenden werden die drei Teile erläutert.

4.5.2 Messgeräte (Präzisionsprüfgerät und Messtaster)

Bei den Messgeräten handelt es sich zum einen um den Messtaster mit dem Interferometer, dem Umweltsensor und dem Antriebssystem, zum anderen um das Prüfgerät mit dem Interferometer, dem Winkelsensor, den Piezotranslatoren, dem Umweltsensor, und dem Antriebssystem (Bild 16 rechts). Die Interferometer liefern die Interferenzintensitäten zu den Auswerteeinheiten. Durch Umweltsensoren werden Temperatur, Luftdruck und Feuchtigkeit gemessen. Mit diesen Messwerten wird anschließend in der Auswerteeinheit die Wellenlänge korrigiert. Die Aufgabe der Antriebssysteme ist die Positionierung des Messbolzens vom Messtaster und des Messtisches des Prüfgerätes. Im Prüfgerät benötigt man den Winkelsensor zur Messung der Verkippung des Messtisches und Piezotranslatoren zur Regelung dieser Verkippung während der Messschiebung.

4.5.3 Elektronik

Im mittleren Teil von Bild 16 ist die Elektronik dargestellt, mit der Arbeiten, wie die Auswertung der Ausgangssignale des Interferometers, AD oder DA-Umwandlung, Verstärkung und Schaltvorgänge durchgeführt werden. Für den Messtaster und das

Präzisionsprüfgerät steht jeweils eine Auswerteeinheit zur Verfügung. Durch die Verstärkung und AD-Umwandlung wird das Winkelsignal in digitaler Form zum PC übertragen und anschließend nach der Multiplikation mit dem Korrekturfaktor als Winkelwert dargestellt, der während der Überprüfung als Eingangswert der Winkelregelung verwendet wird. Mit der DA-Umwandlung und Summenschaltung werden Regelspannungen für den Winkel und die Feinposition umgewandelt und summiert. Nach Verstärkung im Hochspannungsverstärker dienen sie zur Ansteuerung der Piezotranslatoren.

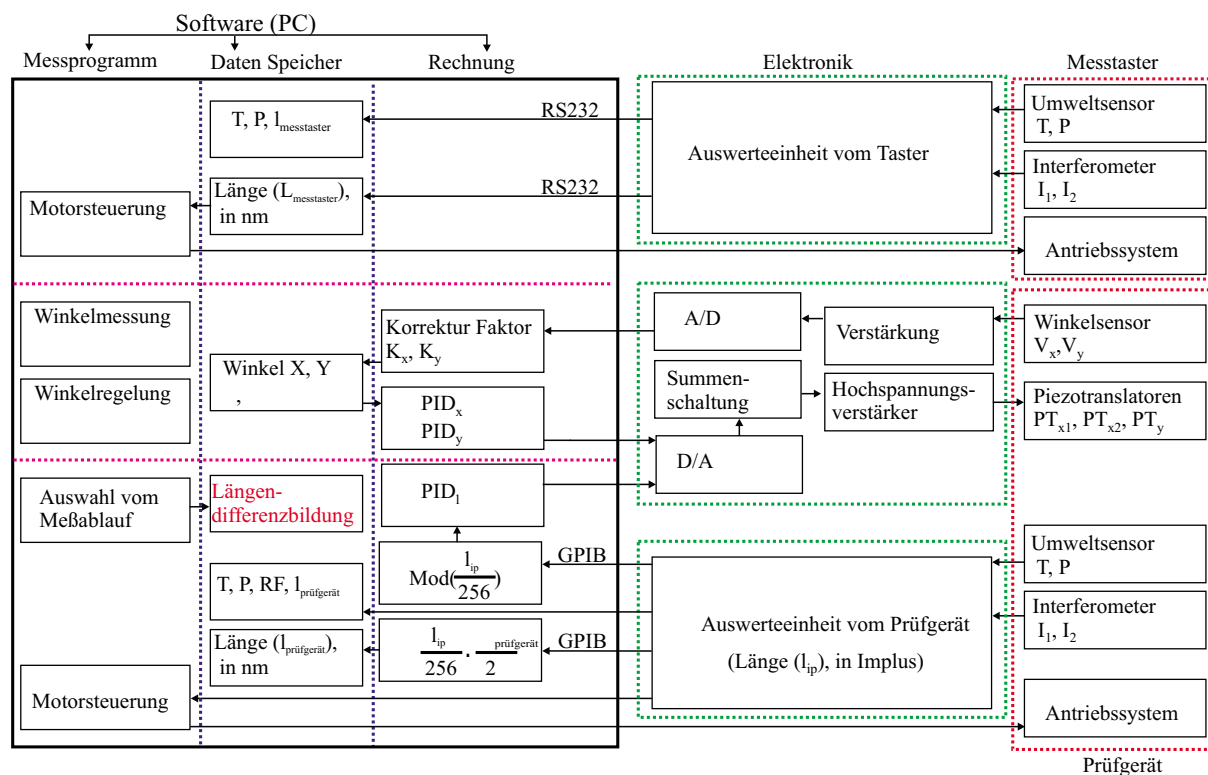


Bild 16: Signalablauf

4.5.4 Software

Die von Präzisionsprüfgerät und vom Messtaster gewonnenen Daten gelangen über die verschiedenen Schnittstellen zum PC und werden dort mit Hilfe einer Messsoftware verarbeitet (vgl. Bild 16, linker Teil). Es müssen verschiedene Aufgaben, wie Analyse der Regelungsspannung, Umrechnung der Winkelwerte, Ausführung des Prüfablaufes und Datenspeichern ausgeführt werden. Mit dem Messprogramm werden der Motor gesteuert, die Kippwinkel des Messtisches gemessen und geregelt sowie die Prüfabläufe durchgeführt. Zu Speichern sind die Daten wie Umweltbedingungen, Winkelwerte, Längenwerte und die Differenzbildung nach der Vergleichsmessung. Bei der Rechnung werden die Winkelsignale mit den Korrekturwerten multipliziert, der Impuls-Längenwert des Prüfgerätes durch 256 dividiert und der Rest als Eingangswert der Feinpositionsregelung zur Verfügung gestellt. Schließlich werden die Regelspannungen der Winkel (PID_x und PID_y) und der Feinposition (PID_1) berechnet.

Die Kommunikation zwischen dem PC und den entsprechenden Messgeräten erfolgt durch eine RS232-Schnittstelle, einen GPIB-Messbus und eine AD/DA Wandler. Im folgenden sind diese Verbindungen dargestellt.

1. RS232-Schnittstelle:

Der zu prüfende Messtaster besitzt standardmäßig an seiner Auswerteeinheit eine RS232-Schnittstelle. Diese soll auch für die Prüfung des Messtasters verwendet werden. Mit dieser

Schnittstelle werden einerseits Längenwerte und die Werte der Umweltparameter zum PC gesendet. Andererseits werden die Anweisungen zur Motorsteuerung des Messtasters vom PC zur Auswerteeinheit übertragen. Damit können beliebige Messprogramme mit dem Messtaster durchgeführt werden.

Die Verbindung erfolgt durch ein Protokoll /4-26/, das hier am Institut entwickelt wurde.

2. GPIB:

Für die Steuerung des Prüfgerätes erreicht die Übertragungsgeschwindigkeit der RS232-Schnittstelle nicht aus, um die Position des Messtisches nahe dem gewünschten Messpunkt anzuhalten. Deswegen wird die Auswerteeinheit des Prüfgerätes über eine parallele GPIB-Schnittstelle /4-17/ mit dem Steuer-PC verbunden. Über diese Schnittstelle wird die Regelung von entsprechend vorgegebenen Sollpositionen des Prüfgerätes für die Durchführung der Prüfabläufe realisiert. Die Längenwerte und die Positionssteuerbefehle für den motorischen Antrieb werden mit einer Frequenz von 100 Hz ständig übertragen. Damit ist eine Regelung einer vorgegebenen Sollposition mit einer Unsicherheit von $< 20 \mu\text{m}$ möglich.

Außer den Längenwerten werden die Werte der Umweltparameter des Prüfgerätes auch mit dieser Schnittstelle bei jedem Messpunkt zum Messprogramm gesendet.

3. AD/DA Umwandelkarte:

Um die analogen Signale des Winkelsensors in digitalen Winkelwerte umzuwandeln und dies anschließend als Eingangsgröße der Winkelregelung zur Verfügung zu stellen, wird eine AD/DA-Wandler verwendet.

Die Auflösung dieser Karte beträgt 12 Bit. Der Arbeitsbereich liegt für den AD-Wandlung einstellbar von ± 10 bis $\pm 1,25$ V. Für die DA-Wandlung ist der Arbeitsbereich ± 10 V.

Durch drei DA-Kanäle werden während der Überprüfung die aus den PID-Reglern berechneten Winkelregelspannungen zur Summenschaltung gesendet. Aus einem vierten DA-Kanal wird die Regelspannung der Feinposition beim Messpunkt berechnet und zur Summenschaltung geliefert. Dort wird er durch 10 dividiert und dann jeweils zu den Winkelregelspannungen addiert. Die gesamten Regelspannungen werden dann über den Hochspannungsverstärker zu drei Piezotranslatoren geliefert.

4.6 Prüfprogramm

4.6.1 Darstellung des Prüfablaufes

Um ein variables Messprogramm für die Überprüfung zu erstellen, wird hier auf der Basis der VDI 2617 ein Programm mit einer zugeschnittenen Software (Testpoint) entworfen /4-17/. Die ursprüngliche Anwendung der VDI 2617 /4-27/ gilt für die Kalibrierung von 3D-Koordinaten-Messsystemen. Hier kann diese Überprüfung des Messtasters als eine eindimensionale Koordinatenmessung betrachtet werden. Deswegen wird die Überprüfung an dieses Verfahren angelehnt.

In der VDI-Richtlinie werden drei verschiedene Prüfabläufe vorgeschlagen, die auch im Prüfgerät realisiert wurden. Das Messprogramm wurde deshalb so entworfen, dass man auswählen kann, mit welchem Prüfablauf die Messung durchgeführt werden soll. Neben der Anweisung des Messvorgangs werden gleichzeitig die betreffenden Regelungen ausgeführt und die verschiedenen benötigten Messwerte aufgenommen.

Nach dieser Richtlinie werden unabhängig vom zu prüfenden Messbereich mindestens 11 Messpunkte und an jedem Messpunkt fünf Mal Vor- und Rückwärts-Wiederholungen durchgeführt. In Bild 17 sind die drei Prüfverfahren dargestellt, das Linearverfahren, das Quasi-Pilgerschrittverfahren, und das Pendelschrittverfahren.

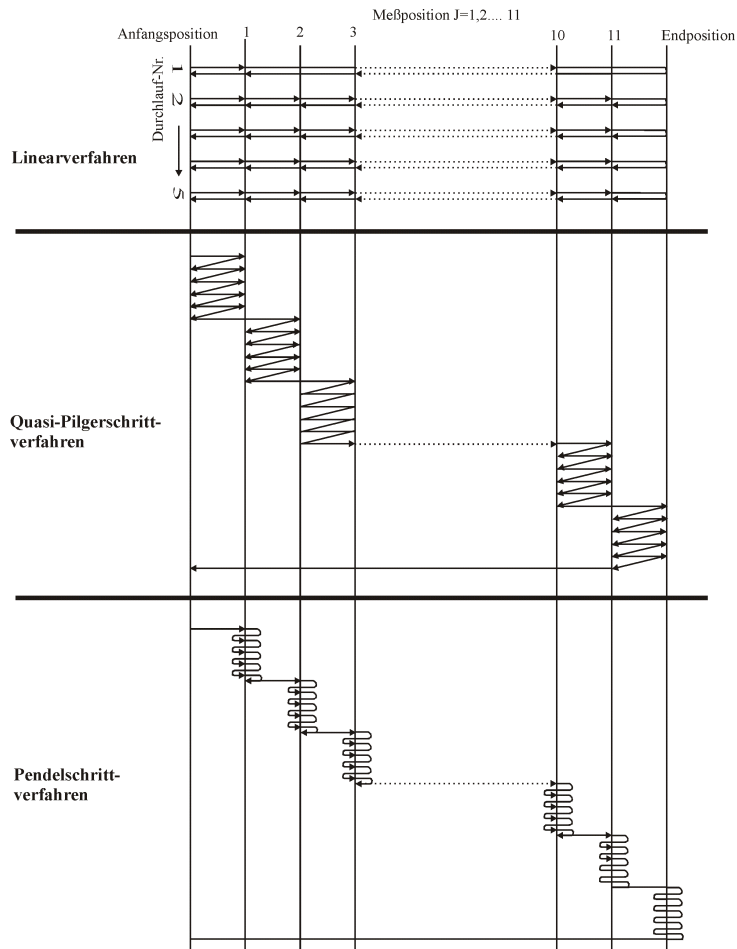


Bild 17: Prinzip vom VDI 2617

In der folgenden Tabelle sind die Vor- und Nachteile der drei Messverfahren gegenübergestellt.

Vor- und Nachteil Type	Vorteile	Nachteile
1. Linearverfahren	kurze Meßweglänge und Meßdauer für den gesamten Meßablauf	großer zeitlicher Versatz beim Anfahren der ersten Meßposition aus unterschiedlichen Richtungen
2. Quasi-Pilgerschritt-Verfahren	geringerer zeitlicher Versatz beim Anfahren aller Meßposition aus unterschiedlichen Richtungen	größere Meßweglänge und Meßdauer für den gesamten Meßablauf
3. Pendelschritt-Verfahren	geringerer zeitlicher Versatz beim Anfahren aller Meßposition aus unterschiedlichen Richtungen	großer zeitlicher Versatz bei der Erfassung von n Meßpositionen

Tabelle 2: Vergleich des Messverfahrens

In der praktischen Erprobung zur Prüfung der Messtaster kann analysiert werden, wie sich die einzelnen Prüfverfahren auf das Prüfergebn auswirken. Insbesondere hat die Temperaturstabilität der gesamten Messanordnung und die Hysterese der Messtaster signifikante Auswirkung bei der Verwendung unterschiedlicher Prüfabläufe.

4.6.2 Angewendete Software und das entsprechende Messprogramm

Testpoint ist eine, für Messung, Steuerung und Analyse geeignete, zugeschnittene Software /4-17/, womit ein Messprogramm nach Bedarf durch Verknüpfung verschiedener Objekte aufgebaut werden kann. Außerdem sind Regelalgorithmen implementiert, so dass die Regelung durch einfache Eingabe einiger Parameter erfolgen kann. Alle Funktionen zur Aufnahme von Messdaten, zur Steuerung des Prüfablaufes und zur Positions- und Winkelregelung können damit realisiert werden.

Um einen angepassten Prüfablauf nach dem Prinzip von VDI 2617 zu etablieren, werden die drei Prüfabläufe wie in Bild 18 organisiert, damit ein richtiger Messprozess nach diesen Prinzipien automatisch realisiert werden kann. In dem Messprogramm werden die Prüfabläufe dann entsprechend des Blockdiagramms realisiert.

Im Messprogramm sind neben den drei Prüfabläufen die betreffenden Mess-, Regel- und Steuerprozeduren, wie Winkel, Umweltbedingungen und Messwerte der Längenmessung enthalten.

Vor der eigentlichen Messung muss der Winkelregler schon gestartet und die Abtastfrequenz vom Messtaster und Prüfgerät eingestellt werden. Dann wird ausgewählt, mit welchem Prüfablauf die Messungen ausgeführt werden.

Während der Messung werden die Längenwerte des Prüfgerätes im Impulsen verwendet, damit die Längenfeinregelung günstig durchgeführt werden kann. Mit einem Rechenprozess kann aber bei jedem Messpunkt die Länge in Nanometer umgerechnet und dargestellt werden. Gleichzeitig wird dieser Wert mit dem Längenwert des Messtasters verglichen und die Differenz zwischen den beiden angezeigt und gespeichert.

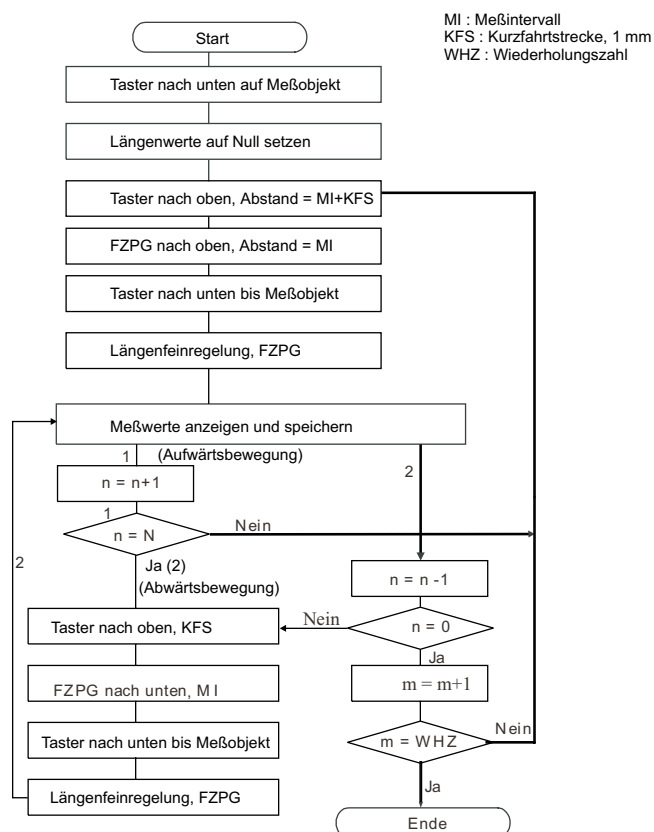


Bild 18a: Prüfablauf 1 - Linearverfahren

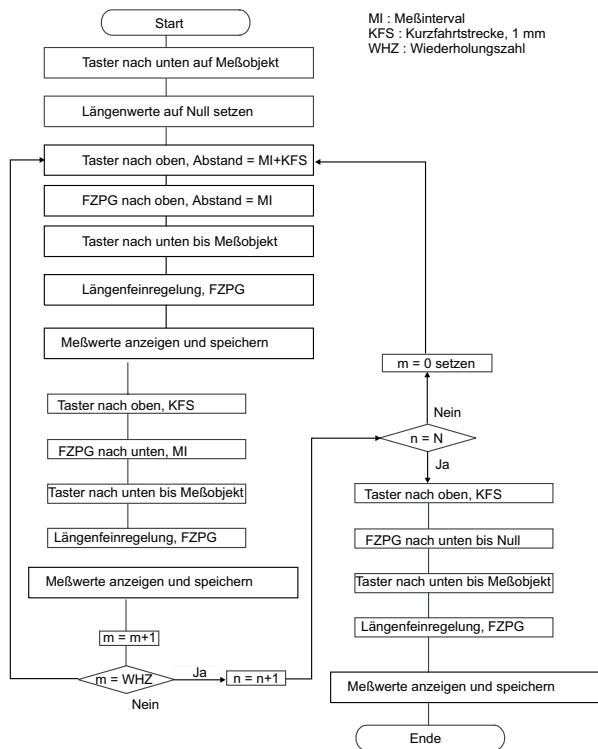


Bild 18b: Prüfablauf 2 – Quasi-Pilgerschrittverfahren

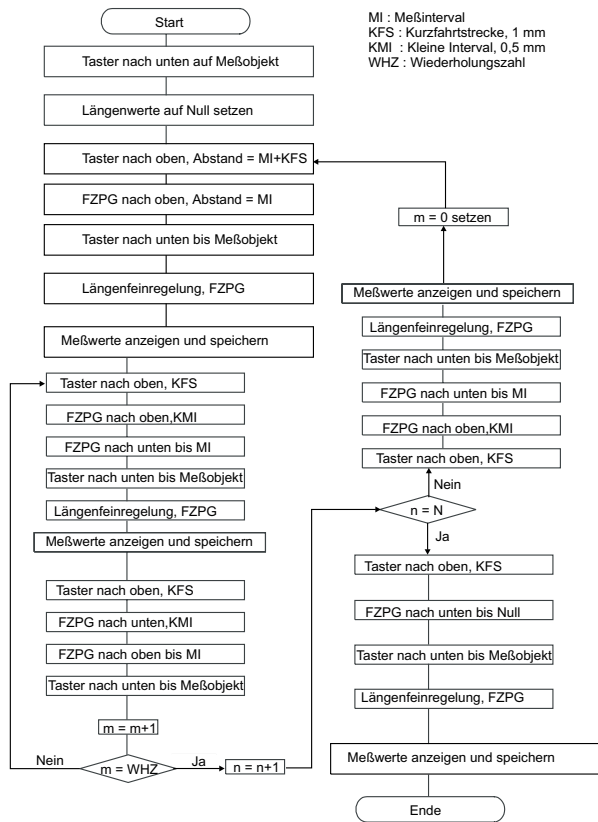


Bild 18c: Prüfablauf 3 - Pendelschrittverfahren

4.6.3 Auswertung und Analyse der Messwerte

Nach der Vergleichsmessung müssen die Messwerte statistisch ausgewertet werden, damit die technischen Eigenschaften des zu prüfenden Messtasters konkret erfasst werden können. Dazu ist hier auch ein Statistikprogramm auf der Basis der VDI/DGQ 3441 zur statistischen Auswertung der Prüfung realisiert worden /4-28, 4-29/.

Die entsprechenden statistischen Werte wie Mittelwert, Standardabweichung usw. werden mit diesem Programm berechnet und als Prüfprotokoll ausgegeben.

X_{ij} : Einzelwert i am Ort x_j

$X_{ij} \uparrow$: Einzelwert i am Ort x_j in positiver Anfahrriichtung

$X_{ij} \downarrow$: Einzelwert i am Ort x_j in negativer Anfahrriichtung

1. Mittelwert der Einzelmesswerte am Ort x_j in positiver und negativer Anfahrriichtung,

$$\overline{X}_j \uparrow = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ij} \uparrow \quad (10)$$

$$\overline{X}_j \downarrow = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ij} \downarrow \quad (11)$$

2. Standardabweichung der Messwerte am Ort x_j in positiver und negativer Anfahrriichtung,

$$S_j \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_{ij} \uparrow - \overline{X}_j \uparrow)^2} \quad (12)$$

$$S_j \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_{ij} \downarrow - \overline{X}_j \downarrow)^2} \quad (13)$$

3. Mittlere Standardabweichung der Messwerte am Ort x_j ,

$$\overline{S}_j = \frac{S_j \uparrow + S_j \downarrow}{2} \quad (14)$$

4. Positionsstreubreite am Ort x_j

$$P_{s_j} = 6 \cdot \overline{S}_j \quad (15)$$

5. Umkehrspanne am Ort x_j

$$U_j = \left| \overline{X}_j \downarrow - \overline{X}_j \uparrow \right| \quad (16)$$

6. Systematische Abweichung vom Sollwert am Ort x_j

$$\overline{\overline{X}}_j = \frac{\overline{X}_j \uparrow + \overline{X}_j \downarrow}{2} \quad (17)$$

4.6.4 Kalibrierbericht

Mit dem Statistikprogramm wird ein Prüfbericht erstellt. Es werden solche Informationen wie Datum, Prüfdauer, Umweltparameter bei Start und Ende, einzelne Differenzwerte zwischen dem Messtaster und Prüfgerät, und die oben beschriebenen messtechnischen Parameter

dargestellt. Dadurch sind die messtechnischen Eigenschaften eines zu prüfenden Messtasters übersichtlich dargestellt und dessen Qualität kann leicht beurteilt werden.

Im folgenden ist ein Beispiel dargestellt, wobei ein Messtaster mit dem Linearverfahren geprüft wurde. Als Ergebnis der Überprüfung wird ein Kalibrierbericht erstellt.

Mit der Vergleichsmessung und dem Prüfbericht ist dann die Überprüfung eines Messtasters komplett abgeschlossen.

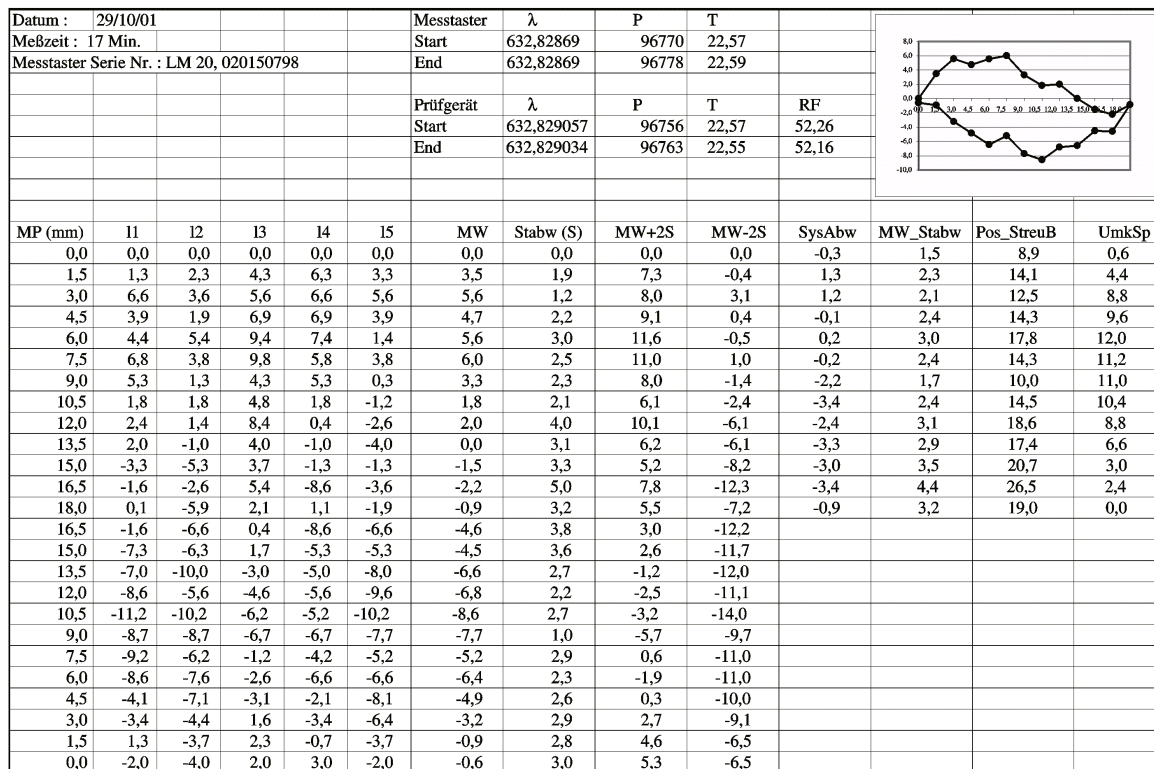


Bild 19: Beispiel eines Kalibrierberichtes

5 Analyse der Fehlerquellen und der Messunsicherheit des Präzisionsprüfgerätes

Mit der Analyse der Fehlerquellen soll die Messunsicherheit des Prüfgerätes bestimmt und ein Unsicherheitsbudget des Prüfgerätes berechnet werden. Dazu sollen zunächst die möglichen Fehlerquellen ermittelt werden. Das Ziel besteht darin, die Messfehler aus dem Prüfgerät zu eliminieren. Da diese Forderung nicht vollständig zu erfüllen ist, soll die Vergleichsmessung unter optimalen Bedingungen, mit möglichst geringen Fehlern durchgeführt werden.

Die folgenden Analysen befassen sich nach der Art der Ursachen mit den Fehlern aus dem Interferometer und der Mechanik des Prüfgerätes. Im Interferometer sind die Fehler aus der Lichtwellenlänge, der optischen Phase, der Totstrecke und der Interpolation zu analysieren. Zu Fehlerquellen aus der Mechanik zählen die mechanische Anordnung, die thermische Ausdehnung, Deformation und Abplattung. Durch die Analyse soll die Größe der Fehler ermittelt werden, um sie durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Justierung, Korrektur oder Kompensation zu minimieren.

In Bild 20 ist diese Einteilung der Messfehler in zwei Gruppen mit den einzelnen Fehlerursache und derer abhängigen Parametern dargestellt. Mit Hilfe der Einzelanalyse soll nach dem "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM) und dem Fehlerfortpflanzungsgesetz /5-1/ der Gesamtfehler des Prüfgerätes abgeschätzt und mit einem Unsicherheitsbudget /5-2, 5-3/ dargestellt werden.

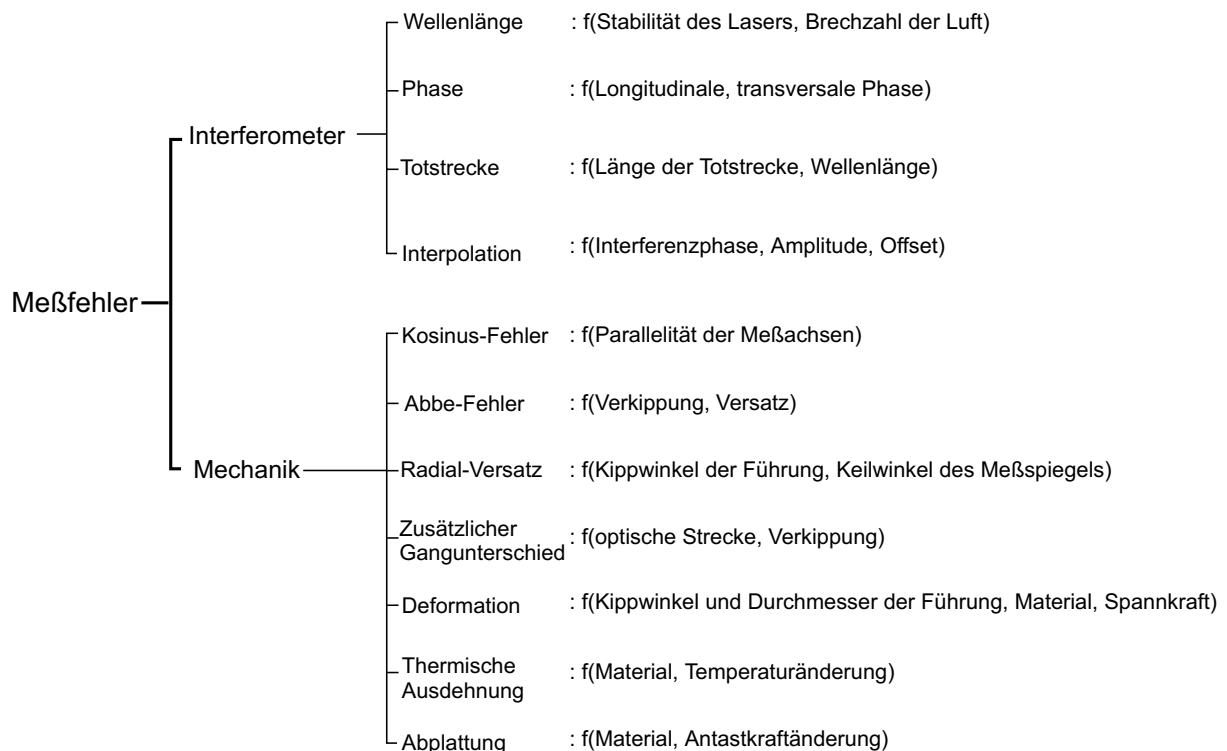


Bild 20: Unterteilung der Messfehler

5.1 Messfehler aus dem Interferometer

Zunächst werden die Fehler, die sich aus der Stabilität und Genauigkeit der verwendeten Laserwellenlänge, der Phase der Laserlichtwellen, der Totstrecke des Interferometers und der Interpolation ergeben, untersucht.

5.1.1 Messfehler durch Änderung der Lichtwellenlänge

5.1.1.1 Wellenlängenstabilität und -genauigkeit

Mit der Gleichung (18) der Längenmessung kann die grundsätzliche Messabweichung im Interferometer mit folgender Gleichung (19) analysiert werden:

$$l = \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot e} = \frac{\lambda_o \cdot z}{2 \cdot n \cdot e}, \quad (18)$$

wobei z den Zählerstand und e den elektronischen Interpolationsfaktor darstellt.

$$\delta l = \frac{1}{e} \cdot \left(\frac{z}{2 \cdot n} \cdot \delta \lambda_o + \frac{\lambda_o \cdot z}{2 \cdot n^2} \cdot \delta n + \frac{\lambda_o}{2 \cdot n} \cdot z \right) \quad (19)$$

Da e einen einstellbar konstanten Wert darstellt, ist er prinzipiell nicht fehlerhaft. Nach der oberen Gleichung ist die Längenmessgenauigkeit also von der Stabilität und Genauigkeit der Vakuumwellenlänge des Lasers (λ_o), der Brechzahl (n) und dem Zählerstand (z) abhängig. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erzielen, sollen diese Auswirkungen näher betrachtet werden.

Zunächst wird die Stabilität der Wellenlänge erörtert. Die interferentielle Längenmessung benutzt die Wellenlänge λ als Maßstab. Die Messgenauigkeit hängt also wesentlich von der Stabilität und der Genauigkeit von λ_o ab. Im Prinzip können als Laserlichtquellen Helium-Neon (He-Ne)-Gaslaser oder Laserdioden verwendet werden. Die Stabilität der Laserdiode reicht für die Anforderung der Längenmessgenauigkeit offenbar nicht aus (Tabelle 3). Es wird vorgesehen, einen He-Ne Laser als Lichtquelle verwendet zu werden.

Laserlichtquelle	$\pm \frac{\Delta \lambda_o}{\lambda_o}$, relative Stabilität
Unstabilisierter Einmoden He-Ne-Laser	$\approx 10^{-6}$
Unstabilisierter Zweimoden He-Ne-Laser	$\approx 3 \cdot 10^{-7}$ Max. Gangunterschied < Resonatorlänge
Stabilisierter He-Ne-Laser	$\approx 10^{-8}$
Jod-stabilisierter He-Ne-Laser	$\approx 10^{-12}$
Diodenlaser	$\approx 10^{-5}, 10^{-6}$ Kurzzeitstabilität

Tabelle 3: Stabilität verschiedener Laser /5-4/

Normalerweise erreicht schon ein unstabilisierter He-Ne Laser eine Längenmessgenauigkeit von < 20 nm im Messbereich von 20 mm. Bei der Anwendung der interferenzoptischer Sensoren genügen unstabilisierte He-Ne- Zweifrequenzlaser sogar höchsten Präzisionsansprüchen /5-5/ mit einer Frequenzstabilität von ca. $3 \cdot 10^{-7}$. Theoretisch kann dadurch eine Messunsicherheit von 6 nm im Messbereich von 20 mm entstehen.

Um den möglichen Einfluss dieser Schwankung auf die Längenmessung praktisch genauer zu ermitteln, wurde ein Interferometer-Einlaufstest mit einem unstabilisierten Laser gemacht. Der festgestellte Gangunterschied beträgt 14 nm. Damit wurde der Einfluss von Frequenzschwankungen des Lasers auf die Längenmessung praktisch erfasst. Im Diagramm 6 ist deutlich zu sehen, dass nach drei Stunden der Schwankungsbereich ca. ± 8 nm beträgt. In den ersten drei Stunden muss man mit maximalen Längenschwankung von ± 10 nm rechnen. Nach ca. drei Stunden erreicht der Laser sein thermisches Gleichgewicht, d.h. die

Wellenlänge des Lasers bleibt nach einigen Stunden nahezu konstant, aber die aktuelle Wellenlänge kann eine Abweichung vom Mittelwert der Laserwellenlänge haben. Das thermische Gleichgewicht kann durch externe Temperatureinflüsse jederzeit gestört werden. Um diesen Einfluss zu vermeiden, werden sowohl im Prüfgerät als auch für die experimentellen in Untersuchungen dienende Messtaster stabilisierte Laser verwendet. Sie besitzen eine relative langzeitige Stabilität von ca. 10^{-8} (kurzzeitige Stabilität von 10^{-11}) und eine Genauigkeit von 10^{-8} , die sich durch eine Vergleichsmessung der Frequenz mit einem Jod-stabilisierten He-Ne-Laser (langzeitige Stabilität besser als 10^{-10}) ergibt. Damit ist die Fehlergröße im Messbereich von 20 mm kleiner als $\pm 0,2$ nm.

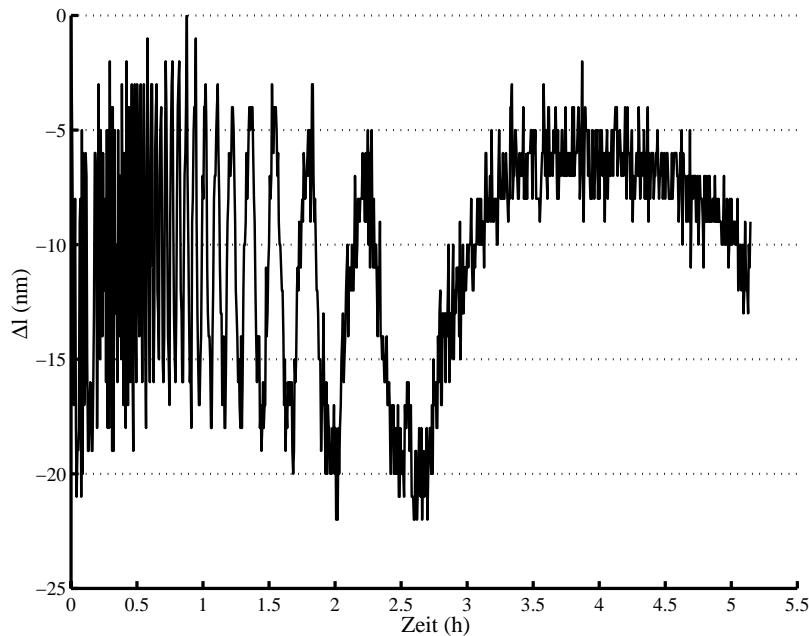


Diagramm 6: Stabilitätsuntersuchung eines unstabilisierten Zweifrequenz-He-Ne-Lasers

5.1.1.2 Wellenlängenänderung durch Umwelteinflüsse

Die Phasenverschiebung einer elektromagnetischen Welle wird durch eine Veränderung des optischen Lichtweges der Welle hervorgerufen. Der optische Weg ist das Produkt aus geometrischem Weg und Brechungsindex [5-6]. Daher ist die Ermittlung der Wellenlängenänderung auf Grund der Umwelteinflüsse, bzw. der Brechungsindexänderung, wichtig für die Analyse der Messfehler.

Die Umweltbedingungen, Temperatur (ϑ), Druck (p) und relative Feuchtigkeit (rf) beeinflussen die Brechzahl der Luft, wodurch sich die Wellenlänge verändert. Die direkte Messung der Brechzahl mit Hilfe eines Refraktormeters ist sehr aufwendig. Deshalb werden die obenstehenden Umweltparameter einzeln gemessen und rechnerisch korrigiert.

Im folgenden wird bestimmt, mit welcher Genauigkeit die Umweltparameter gemessen werden müssen, um eine bestimmte Genauigkeit der interferometrischen Längenmessung zu garantieren. Der heutige übliche Korrekturalgorithmus basiert auf der Arbeit von Edlen [5-7]. Die Brechzahlabhängigkeit kann wie folgt dargestellt werden:

$$n = 1 + \frac{k_1 \cdot p}{1 + k_2 \cdot \vartheta} + k_3 \cdot p_w \quad (20)$$

Dabei gilt für die konstanten bei $\lambda = 632,8$ nm: $k_1 = 2,8793 \cdot 10^{-7}$, $k_2 = 0,003671$, $k_3 = -3,6 \cdot 10^{-8}$, $c_1 = 611,213$, $c_2 = 17,5043$, $c_3 = 241,2$.

p_w ist der Wasserdampfdruck und kann als eine Funktion von Temperatur und relative Feuchtigkeit mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$p_w = \frac{rf}{100} \cdot c_1 \cdot \frac{c_2 \cdot \vartheta}{c_3 + \vartheta} \cdot e^{\frac{c_2 \cdot \vartheta}{c_3 + \vartheta}} \cdot 0,01 \quad (21)$$

Abgeleitet von der Edlen-Formel sind die Einflussgrößen in Tabelle 4 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturänderung den größten Einfluss auf die Brechzahl ausübt und die Auswirkung der Feuchtigkeit relativ klein. Der Einfluss der Temperatur (pro K) ist fast dreimal größer als der des Drucks (pro 100 Pa) und ca. zehnmal größer als der der relativen Feuchtigkeit (pro Prozent). Die Temperatur spielt daher im Vergleich zu den anderen zwei Umweltparametern bei der Messung eine große Rolle. Allerdings kann eine Präzisionskalibrierung nur in einem klimatisierten Raum durchgeführt werden, so dass das Interferometer in einem Temperaturbereich von $20^\circ \text{ C} \pm 2 \text{ K}$ arbeiten wird. Die Luftdruckschwankungen können allerdings ca. 12 kPa betragen, was einer relativen Brechzahlschwankung von ca. $3 \cdot 10^{-5}$ entspricht.

Bezogen auf eine Längenmessunsicherheit von kleiner als 1 nm im Messbereich von 20 mm muss während der Überprüfung die Temperaturänderung kleiner als 0,05 K, die Druckänderung kleiner als 19 Pa und die relative Feuchtigkeitsänderung kleiner als 4% eingehalten werden. Durch die Maßnahme der Temperierung und durch kurze Messzeiten wird versucht, diese Grenzwerte nicht zu überschreiten.

$\frac{\Delta n}{n} = -0,929 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1} \cdot \Delta \vartheta$	$\Delta \vartheta$ Änderung der Lufttemperatur, K
$\frac{\Delta n}{n} = +2,682 \cdot 10^{-7} \cdot hPa^{-1} \cdot \Delta p$	Δp Änderung des Luftdruckes, hPa
$\frac{\Delta n}{n} = -1,14 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta rf$	Δrf Änderung des relativen Feuchtigkeit, %

Tabelle 4: Einfluss von Umweltbedingungen

Um den Einfluss durch die Umweltbedingungen zu reduzieren, werden im Prüfgerät die Umweltbedingungen, ϑ , p , und rf mit entsprechenden Sensoren gemessen. Daraufhin wird die aktuelle Wellenlänge nach der Edlen-Formel im Messprogramm während der Längenmessung korrigiert.

5.1.2 Messfehler durch Interferenzphase

Die Übertragung des Strahls vom He-Ne Laser zum Interferometer im Prüfgerät erfolgt mit einem polarisationserhaltenden Monomodelichtwellenleiter. Der aus dem Lichtwellenleiter austretende Laserstrahl besitzt eine spezielle Ausbreitungscharakteristik, die als Gaußsches Bündel bezeichnet wird [5-8, 5-9]. Die elektrische Feldstärke dieser Welle kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$E(z, r) = \hat{E} \cdot \frac{w_o}{w(z)} \cdot e^{-[(\frac{r}{w(z)})^2 + j \cdot (\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot z - \Phi_L(z) + \Phi_T(z, r))]} \quad (22)$$

mit:

$$w(z) = w_o \cdot \sqrt{1 + (\frac{z \cdot r}{w_o^2 \cdot \pi})^2} \quad (23)$$

$$\Phi_L = \tan^{-1}\left(\frac{z \cdot r}{w_o^2 \cdot \pi}\right) \quad (24)$$

$$\Phi_T = \frac{\pi \cdot r^2}{\lambda \cdot R(z)} \quad (25)$$

$$\text{und } R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot w_o^2}{z \cdot \lambda}\right)\right], \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (26)$$

$w(z)$ und w_o stellen den Strahlradius der Laserlicht an Stelle z und in der Taille dar. Φ_L ist der longitudinale Phasenterm, der die Abweichung des Gaußschen Strahls von der ebenen harmonischen Welle beschreibt. Und Φ_T ist der transversale Phasenterm, der die Krümmung der Phasenflächen mit dem Krümmungsradius $R(z)$ beschreibt.

Mit Hilfe einer Kollimatorlinse wird aus dem Lichtwellenleiter austretende Strahl kollimiert, damit eine Aufweitung und Reduzierung der Divergenz des abgestrahlten Lichtes des Lichtwellenleiters erfolgen kann. Die Abbildung w_o' der Strahltaile durch die Kollimatorlinse kann mit folgenden Gleichungen dargestellt werden /5-10/:

$$w_o' = \frac{f}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{\pi \cdot w_o^2}{\lambda}\right)^2}} \cdot w_o \quad (27)$$

$$z' = \frac{f^2}{z^2 + \left(\frac{\pi \cdot w_o^2}{\lambda}\right)^2} \cdot z \quad (28)$$

Im Interferometer des Prüfgerätes besitzt die Kollimatorlinse eine Brennweite von 20 mm und der Kerndurchmesser des Lichtwellenleiters beträgt 3,7 μm . Die Abbildung der Strahltaile erfolgt in den bildseitigen Brennpunkt der Kollimatorlinse. Der Tailenradius beträgt damit 2,2 mm /5-11/.

Durch die beiden Phasenterme Φ_L und Φ_T entsteht eine Verschiebung des Ortes maximaler bzw. minimaler Feldstärke. Wenn die Phasenterme zwischen zwei Messpunkten nicht identisch sind, wird ein Längenmessfehler Δl_Φ erzeugt, der mit der folgender Gleichung berechnet werden kann:

$$\Delta l_\Phi = \frac{\Delta\Phi}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (29)$$

Nach den obengenannten Gleichungen (24) und (25) kann der wegen der Verschiebung der Orte maximaler Feldstärke entstehende Phasenfehler mit dem maximalen und minimalen Gangunterschied von Δl_{\max} und Δl_{\min} im folgenden berechnet werden:

$$\Delta\Phi_L = \tan^{-1}\left[\left(z' + \Delta l_{\max}\right) \cdot \frac{\lambda}{\left(w_o'\right)^2 \cdot \pi}\right] - \tan^{-1}\left[\left(z' + \Delta l_{\min}\right) \cdot \frac{\lambda}{\left(w_o'\right)^2 \cdot \pi}\right] \quad (30)$$

$$\Delta\Phi_T = \frac{\pi \cdot r^2}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{R\left(z' + \Delta l_{\max}\right)} - \frac{1}{R\left(z' + \Delta l_{\min}\right)}\right] \quad (31)$$

Im Interferometer des Prüfgerätes betragen $z' = 82,5$ mm, $\Delta l_{\max.} = 84$ mm und $\Delta l_{\min} = 44$ mm. Somit entsteht ein longitudinaler Phasenfehler von $9'$. Dieser Phasenfehler entspricht einem Längenmessfehler von $0,08$ nm.

Im Interferometer werden großflächige Photoempfänger mit einer optisch aktiven Fläche von $2,3 \times 2,3$ mm² verwendet, die das gesamte Interferenzbild abtasten und den transversalen Phasenfehler verringern können. Mit dieser Bedingung beträgt der transversale Phasenfehler maximal $3'$. Durch diesen Wert entsteht ein vernachlässigbarer Längenmessfehler von $0,04$ nm. Der tatsächliche Messfehler ist noch kleiner als dieser Wert, denn durch die großflächigen Photoempfänger erfolgt eine Integration der Intensitätsverteilung /5-11/.

5.1.3 Messfehler durch Totstrecke

Unter Totstrecke versteht man die Abstandsdifferenz zwischen dem optischen Gangunterschied Null und dem tatsächlichen Gangunterschied zwischen dem Mess- und Referenzstrahl beim Startpunkt (Bild 21). Dieser Wert muss bei der Anordnung des Interferometers berücksichtigt werden und möglichst klein sein. Der Einfluss der Totstrecke kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden /5-12/:

$$l = \frac{\lambda_k}{2} \cdot \frac{z}{e} - l_t \cdot \frac{\lambda_{ko} - \lambda_k}{\lambda_{ko}} \quad (32)$$

mit λ_{ko} : Wellenlänge vor der Messung, λ_k : Wellenlänge während der Messung.

Optimalerweise soll beim Entwurf des Interferometers die Totstrecke konstruktiv zu Null gemacht werden, damit dieser Fehler vermieden wird. Aufgrund des notwendigen Platzes zur Justierung des Interferometers war dies nicht möglich. Die Totstrecke beträgt demzufolge im Prüfgerät konstruktionsbedingt 27 mm.

Diese Totstrecke führt nach Gleichung (32) nur dann zu einem Δl , wenn sich während der Messung die Wellenlänge, insbesondere durch die Änderung der Brechzahl ändert. Im Zusammenhang mit der Edlen-Formel (20) kann der Einfluss der Umweltbedingungen auf die Totstrecke für die Längenmessung der Interferometer im taktilen und im optischen Messtaster sowie im Prüfgerät mit folgender Tabelle dargestellt werden:

	l_t	$\Delta l(t) / K$	$\Delta l(p) / \text{hPa}$	$\Delta l(rf) / \%$
Prüfgerät	27 nm	27 nm	7,3 nm	0,3 nm
Taktiler Messtaster	6 nm	-6 nm	1,6 nm	-0,07 nm
Optischer Messtaster	70 nm	70 nm	-19 nm	0,8 nm

Tabelle 5: Einfluss der Totstrecke

Die Umweltbedingungen werden durch Sensoren aufgenommen und dabei die aktuelle Brechzahl der Luft berechnet, womit im Messprogramm eine korrigierte Wellenlänge ausgegeben werden kann und mit der Totstrecke eine rechnerische Kompensation für die Längenmessung ausgeführt wird. Bei einer Temperaturänderung kleiner als $0,02$ K zwischen zwei aufeinanderfolgenden Temperaturmessung liegt der Fehler im Interferometer des Prüfgerätes bei ca. $0,6$ nm.

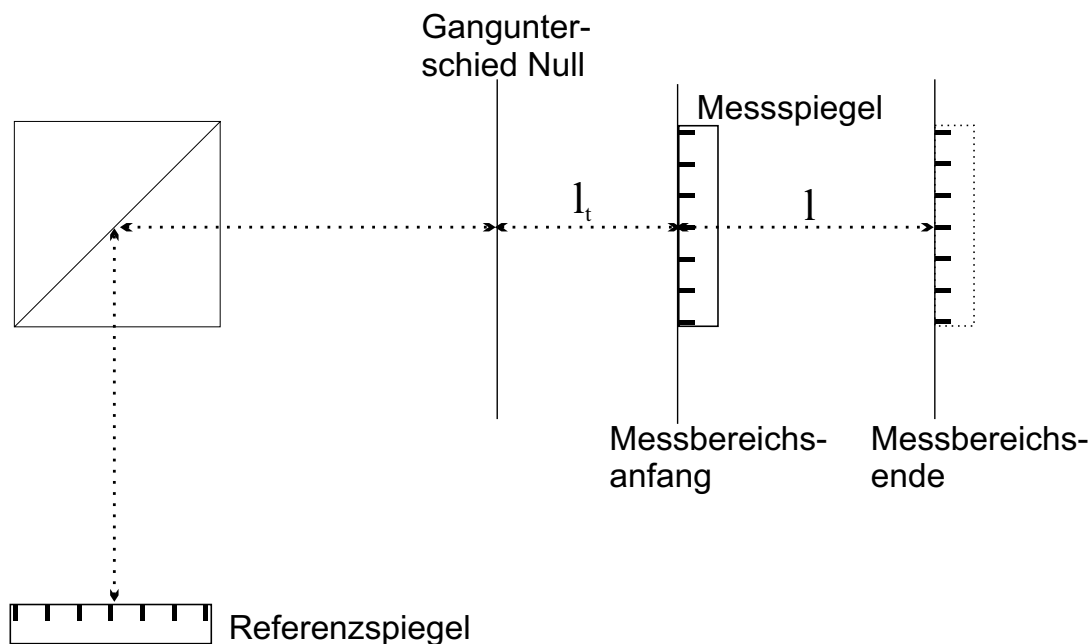


Bild 21: Darstellung der Totstrecke l_t

5.1.4 Interpolationsfehler

Im hier verwendeten Homodyn-Interferometer wird eine Vor- Rückwärtszählung der inkrementalen Interferenzsignale erreicht, indem man zwei Interferenzsignale mit einer Phasendifferenz von 90° abtastet /5-13/. Damit erreicht man zunächst eine Unterteilung von $\lambda/2$. Eine weitere Auflösungserhöhung wird mit einer Interpolationsschaltung ermöglicht, die die analogen Sinus- und Kosinuswerte demoduliert und mit Hilfe der Arkustangens-Funktion die Interferenzphase bzw. den interpolierten Längenmesswerte ermittelt.

Nach /5-14, 5-15/ kann die Demodulation mit den folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\theta = \arctan\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (33)$$

$$\text{ideale Signale: } \begin{aligned} I_1 &= K \cos(\theta) \\ I_2 &= K \sin(\theta) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{reale Signale: } \begin{aligned} I_1 &= K_1 \cos(\theta + \delta_1) + O_1 \\ I_2 &= K_2 \sin(\theta + \delta_2) + O_2 \end{aligned} \quad (35)$$

Aus den Intensitäten I_x und I_y lässt sich die Phase φ berechnen. Im Idealfall ist die Amplitude K der beiden Kanäle gleich und es tritt kein Offset auf. Praktisch können die beiden Ausgangssignale unterschiedliche Amplituden K_i , Offset O_i sowie eine Phasendifferenz δ haben. Interpolationsfehler zeigen sich im Auftreten von Teilungsfehler innerhalb der Ordnungen. Interpolationsfehler können durch verschiedene optische oder elektronische Einflüsse verursacht werden. Die Nichtlinearität der Teilung entsteht hauptsächlich durch Phasenabweichung des abgetasteten Quadrantensignale und gehört besonderes in Einfrequenz-Interferometern zu dem wichtigen Messfehlern /5-16/.

Durch die Anwendung einer Verstärkungs- und Offset-Regelung in der Auswerteeinheit /5-17/ können die möglichen Fehler aus Amplitude und Offset eliminiert werden. Eine zusätzliche Phasendifferenz δ kann aus optischen Gründen auftreten; und ist nicht ohne

weiteres Korrigierbar. Bei einem Phasenfehler von 5° wird z.B. ein Messfehler von ca. $\pm 2,2$ nm hervorrufen (Diagramm 7).

Aus den oberen Gleichungen kann abgeleitet werden, dass der Interpolationsfehler periodisch ist. Dieser Fehler kann vermieden werden, wenn Messungen nur im Abstand von $\lambda/2$ erfolgen. Deshalb wird im Prüfgerät ein Längenfeinregler eingeführt, der nur Messposition mit einem ganzzahligen Vielfachen von $\lambda/2$ anfährt. Mit dem Längenfeinregler sind die Anforderungen an die Justage des Abtasteinrichtung und die Signalkonditionierung nicht mehr kritisch. Die Interpolationsfehler werden mit Hilfe des Längenfeinregler minimiert.

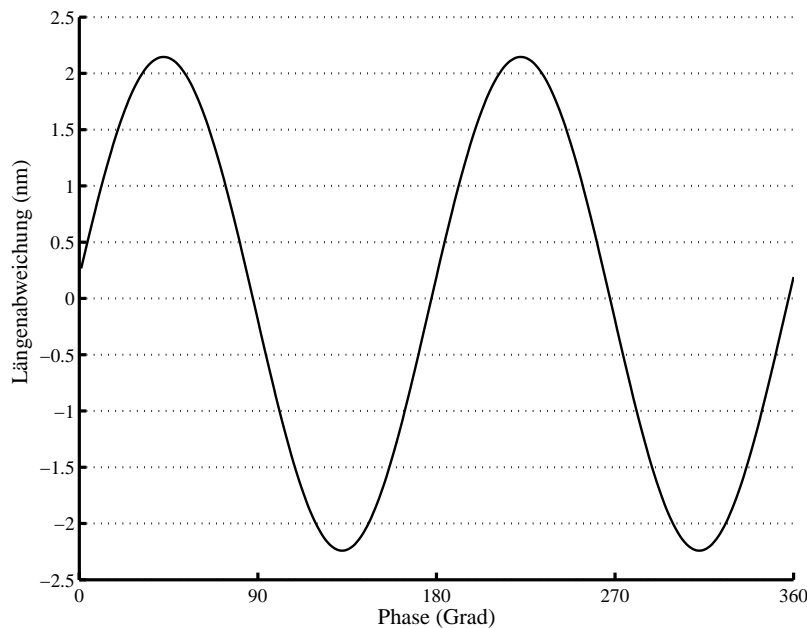


Diagramm 7: Interpolationsfehler durch einen Phasenfehler von 5°

5.2 Messfehler aus der Mechanik

5.2.1 Ursachen zur Messabweichungen durch konstruktive Anordnungen

Als nächstes sollen die mechanischen Fehlerursachen aus dem Prüfgerät selbst, wie z.B. auf Grund der Anordnung des Interferometers, ermittelt werden. Um die Fehlergröße zu eliminieren und die Genauigkeit der Überprüfung zu gewährleisten, müssen gegen diese Fehlerursachen unterschiedliche Maßnahmen abgeleitet werden. Einige Fehlereinflüsse können durch entsprechende Justierung von Baugruppen minimiert werden, bei andern lässt sich dies nur eine aktive Lageregelung von Komponenten erreichen.

Zu Messfehlern aus der mechanischen Anordnung gehören Kosinus- und Abbe-Fehler. Beim Kosinus-Fehler handelt es sich prinzipiell um eine Abweichung von der Parallelität zwischen optischen oder mechanischen Achsen. Der Abbe-Fehler ist wesentlich von der Verkippung des Messkörpers und dem Versatz zwischen dem Messbolzens des Messtasters und dem Messstrahl des Interferometers vom Prüfgerät abhängig. Im Bild 22-1 ist das Verhältnis vereinfacht dargestellt.

Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, wird die Verkippung des Messkörpers durch die Winkelregelung während dem Messvorgang ständig geregelt. Weil trotz der Regelung die Verkippung eine bestimmten Unsicherheit hat, muss garantiert werden, dass der Versatz zwischen der Messachse des Messtasters und dem Messachse des Prüfgerätes (Messstrahl des Interferometers im Prüfgerät) möglichst klein ist, damit eine Messabweichung < 1 nm erreicht wird. Im folgenden werden diese Fehler theoretisch analysiert und anschließend ein

komplettes Justierverfahren dargestellt, womit die mechanischen Fehler weitergehend eliminiert werden können.

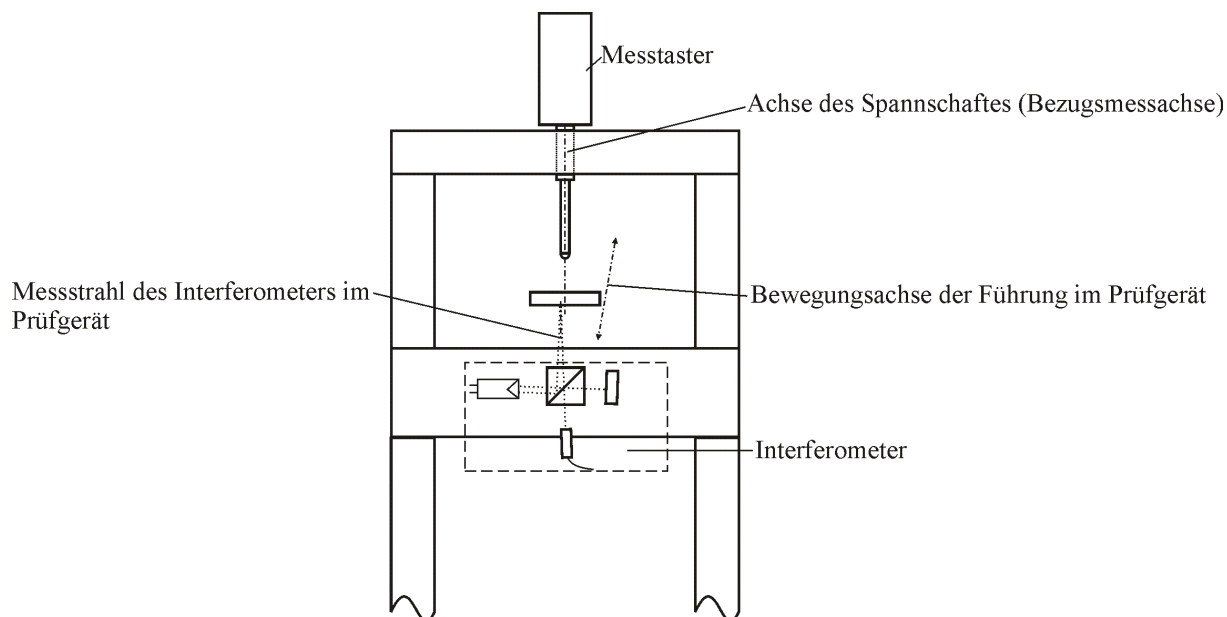


Bild 22-1: Vereinfachte Darstellung der mechanischen und optischen Achse

5.2.1.1 Theoretische Analyse der mechanischen Messfehler

Um die Kosinus-Fehler zu minimieren, muss die Parallelität untersucht werden. Dazu sind verschiedene optische bzw. mechanische Achsen zu beachten, die alle bestmöglichst zur Übereinstimmung gebracht werden müssen. Im Bild 22-2 sind diese Achsen detailliert dargestellt. In Einzelnen müssen folgende Winkel bzw. Winkelabweichungen betrachtet werden:

- ϕ_a : der Winkel zwischen der Bezugsmessachse der Vergleichsmessung und dem Normalvektor des Messkörpers /5-18/
- ϕ_c : der Winkel zwischen der Bezugsmessachse der Vergleichsmessung und dem Messstrahl des Interferometers im Prüfgerät
- ϕ_f : der Winkel zwischen der Bezugsmessachse der Vergleichsmessung und der Bewegungsachse der Führung im Prüfgerät
- ϕ_k : der Keilwinkel des Messkörpers

Die einzelnen Fehlereinflüsse werden im folgenden mit entsprechenden Gleichungen und schematischen Darstellungen erörtert.

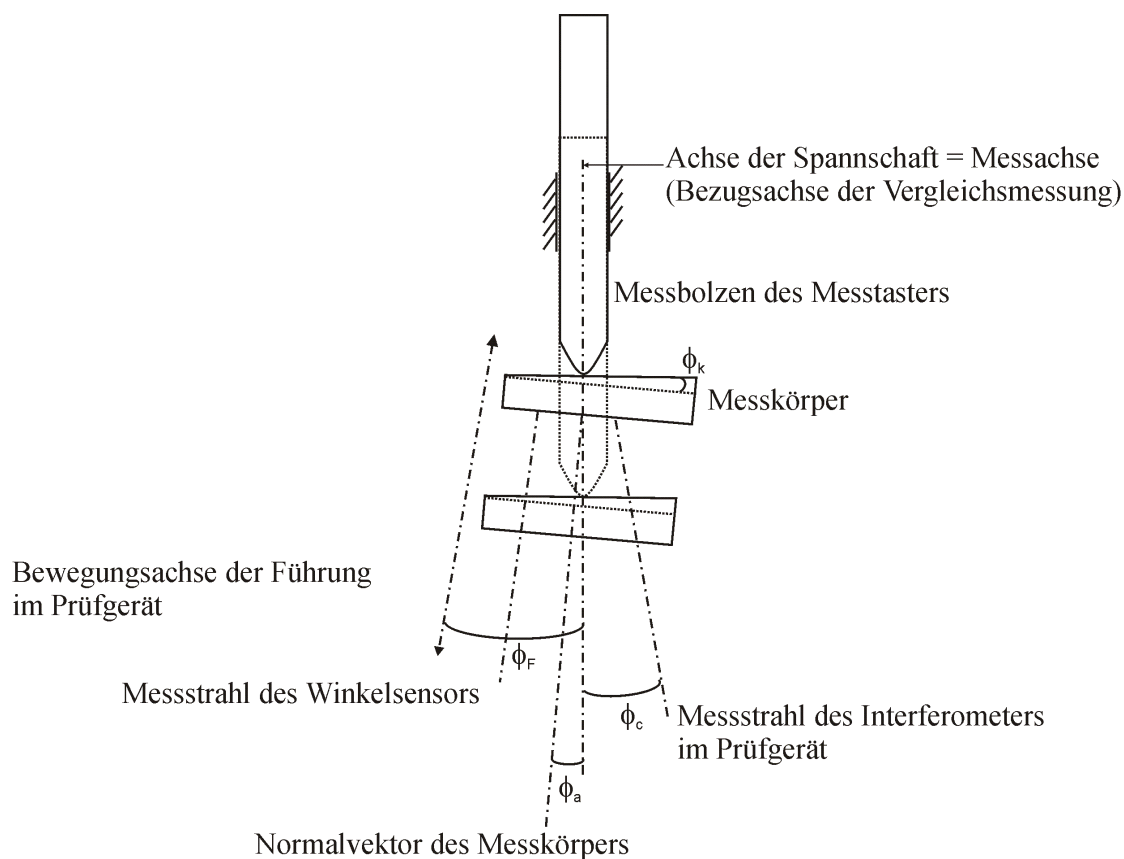


Bild 22-2: Darstellung verschiedener Achse

1. Kosinusfehler:

Dieser Fehler ist von der Parallelität der beiden Messachsen abhängig. Er kann durch Justierung minimiert werden. Bild 23a und die folgende Gleichung erläutern diesen Fehler.

$$\Delta l = l \cdot \left(\frac{1}{\cos \phi_c} - 1 \right) \quad (36)$$

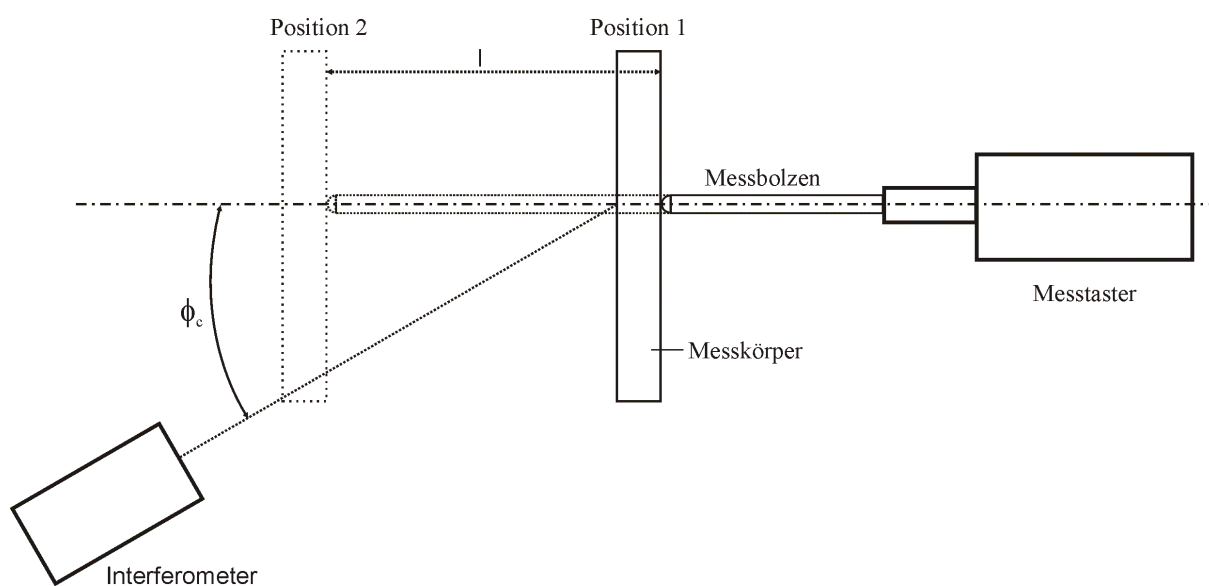


Bild 23a: Kosinusfehler

Nach dieser Gleichung sollte bei einem Messbereich von 20 mm der Winkel zwischen beiden Messachsen nicht größer als 65'' sein, damit mögliche Längenmessfehler kleiner als 1 nm bleiben.

2. Keilwinkel des Messkörpers:

Trotz der präzisen Fertigung des Messkörpers (Messspiegel bzw. Endmaß) kann ein Keilwinkel nicht vermieden werden. Durch einen Winkel zwischen der Bewegungsachse der Führung und der Messachse (Bild 22-2) kann ein Versatz bei der Verschiebung des Messkörpers auftreten, der schließlich infolge des Keilwinkels ϕ_k einen Messfehler (Bild 23b) verursacht. Es gilt dabei:

$$\Delta l = l \cdot \frac{\tan(\phi_F) \cdot \sin(\phi_k)}{\cos(\phi_F) \cdot \cos(\phi_k - \phi_F)} \quad (37)$$

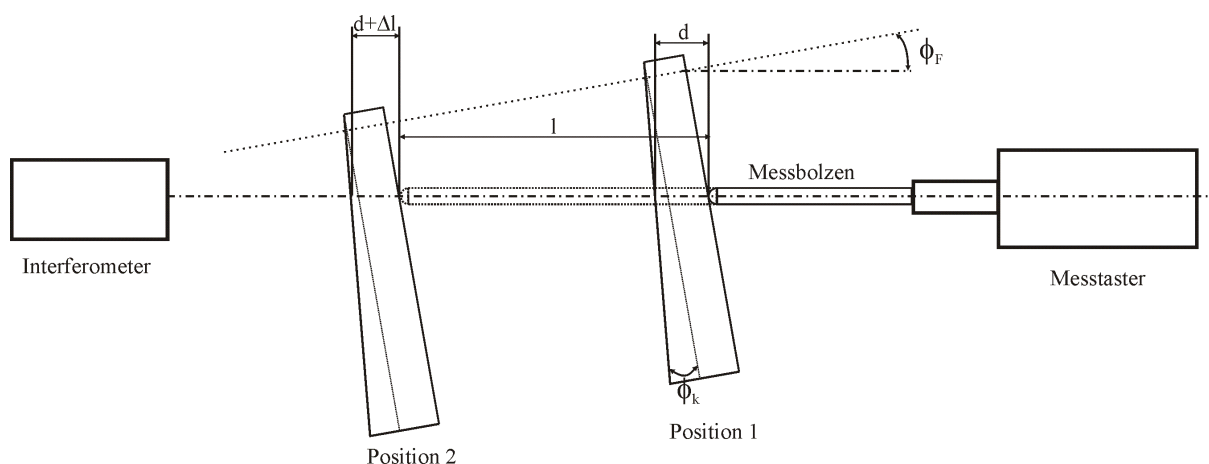


Bild 23b: Messfehler infolge Keilwinkel und nicht paralleler Bewegung

Experimentelle Untersuchungen bestätigen, dass selbst nach der sorgfältigen Montage der Winkel ϕ_F zwischen der Bewegungsachse und der Messachse ca. 4,6' beträgt. Im Messbereich von 20 mm wird mit diesem Kippwinkel und einem Keilwinkel ($< 8''$) ein Messfehler weniger als 1 nm erreicht. Angesichts dieses Fehler und des Anwendungsgebietes des Messtasters wird hier statt eines Glasspiegels ein präzises 5 mm Parallelendmaß als Messkörper im Interferometer des Prüfgerätes eingesetzt. Das Endmaß besitzt eine hochgenaue Parallelität mit einer Unebenheit von < 200 nm. Ein entsprechender Keilwinkel beträgt maximal 1,3'', die experimentell durch die Beobachtung gegenüber einem AKF nachgewiesen werden können. Damit wird dieser Messfehler (ca. 0,2 nm) vernachlässigbar bleiben.

3. Abbe-Fehler:

Der sogenannte Abbe-Komparatorfehler entsteht, wenn ein Versatz v zwischen den beiden Messachsen besteht und es während der Messfahrt gleichzeitig zu einer Verkippung des Messkörpers ϕ_T kommt (Bild 23c). Der mögliche Längenmessfehler kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\Delta l = (v + l \cdot \tan(\phi_c)) \cdot \tan(\phi_T) \quad (38)$$

Er ist wesentlich von dem Versatz, der Messstrecke, Parallelität beider Messachsen und der Verkippung abhängig. Bei einer guten Parallelität beider Messachsen werden Versatz und Verkippung den Messfehler dominieren. Deswegen sollen sie besonders betrachtet werden.

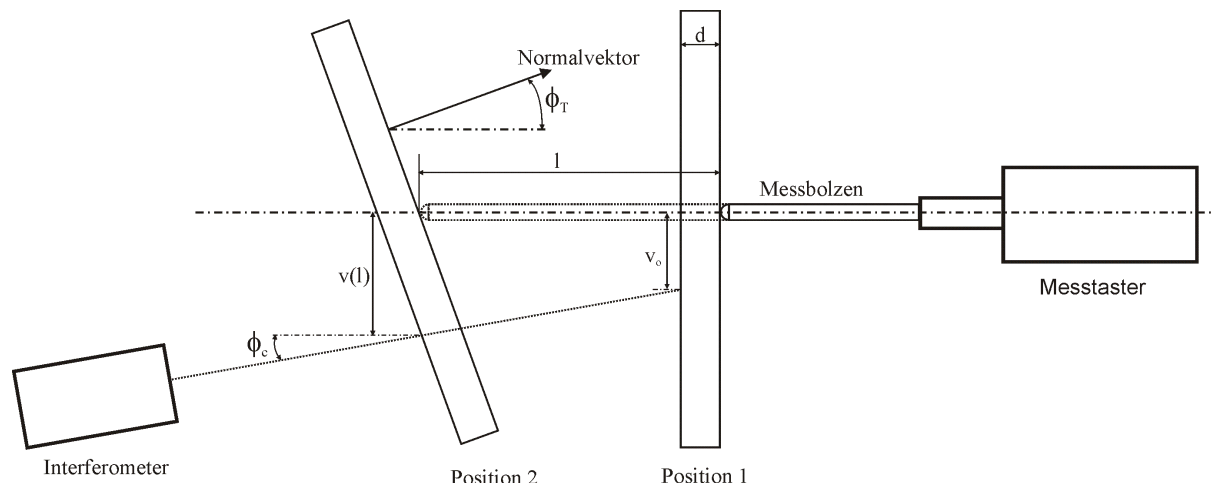


Bild 23c: Messfehler bei der Verkipfung des Messkörpers in Abhängigkeit von der Verschiebung

Durch die Winkelregelung wird während der Messung eine Verkipfung des Messtisches $< 0,2''$ erreicht. Für einen Abbe-Fehler < 1 nm darf entsprechend der Versatz v nicht größer als 1 mm sein.

4. Einfluss der Messkörperdicke:

Zwischen den beiden Messachsen befindet sich der Messkörper, dessen Dicke bei einer Verkipfung einen Messfehler verursachen kann. Bei einer Verkipfung des Messkörpers wird bezüglich auf die Messachse die Dicke des Messkörpers anders gemessen. Diese Änderung des Abstand der Dicke führt einen Längenmessfehler. Die Fehlergröße kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$\Delta l = d \cdot \left(\frac{1}{\cos(\phi_T)} - 1 \right) \quad (39)$$

Durch die Einführung der Winkelregelung wird der Kippwinkel ständig mit einer Regelunsicherheit von $0,2''$ geregelt, wodurch der verursachte Messfehler vernachlässigbar wird (mit 5mm Endmaß ca. 2×10^{-5} nm).

5. Messfehler aus einer Gangunterschiedänderung des Prüfgerät-Interferometers durch die Kippung des Messkörpers:

Durch die Kippung des Messkörpers kommt es zu einem zusätzlichen Gangunterschied im Prüfgerät-Interferometer, der einen Messfehler hervorrufen kann (Bild 23d). Mit folgender Gleichung kann dieser Fehler beschrieben werden:

$$\Delta l = \frac{1}{2} \cdot \{ (l_a - l_b) \cdot (\cos(2\phi_a) - 1) + (l_b + k) \cdot (\cos(2\phi_a) - \cos(2\phi_b)) \} \quad (40)$$

Dieser Messfehler besteht aus zwei Fehlergrößen. Einer stellt Kosinus-Fehler allein aus der Kippung des Messkörpers (ϕ_a) zur Messachse dar. Der andere Term entsteht durch die Verkipfung während der Messfahrt ($\phi_a - \phi_b$). Da während der Verschiebung durch die Winkelregelung eine Verkipfung $< 0,2''$ auftritt, darf der Winkel ϕ_a für einen Fehler von 1 nm

bei 20 mm Verschiebung und der Strecke $l_b + k$ von 70 mm ca. 47" betragen. Bei der Justierung des Laserinterferometers sollte ein Winkel $\phi_a < 30''$ erreichbar sein.

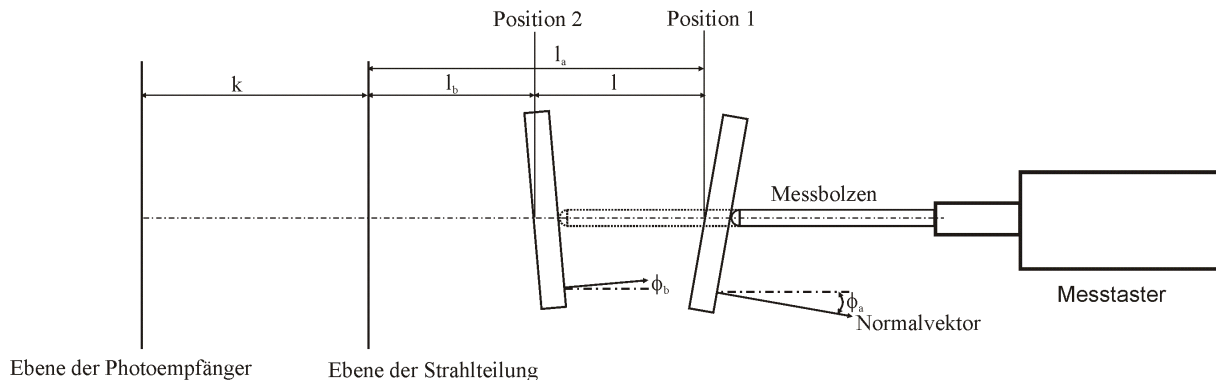


Bild 23d: Messfehler aus der Gangunterschiedänderung

Neben diesen Fehlereinflüssen muss beim Planspiegelinterferometer beachtet werden, dass ein größerer Kippwinkel sogar die Längenmessung unmöglich machen. Dieser Fall wird durch die Winkelregelung ebenfalls ausgeschlossen.

5.2.1.2 Einfluss des Kippwinkels auf das Interferenzsignal im Präzisionsprüfgerät

Die Kippung des Messtisches verursacht nicht nur den oben genannten Längenfehler (Abschnitt 5.2.2.1, Punkt 3, ϕ_T), sie hat auch einen entscheidenden Einfluss auf das Interferenzstreifenbild. Der Streifenabstand des Interferenzbildes verändert sich, wenn der Messkörper verkippt. Der Streifenabstand a kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$a = \frac{\sin(\gamma)}{\sqrt{\sin^2(\alpha + \varepsilon) + \sin^2(\beta)}} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (41-1)$$

dabei sind α und β der Kippwinkel des Messkörpers in der x- und y-Richtung, ε ist der Schwingwinkel des Referenzspiegels. Im unverkippten Zustand ($\alpha = \beta = 0$) bleibt nur der Schwingwinkel ε in der x-Richtung (3.3) und a wird dann:

$$a = \frac{\lambda}{2 \cdot \tan(\varepsilon)} \quad (41-2)$$

Für die photoelektrische Auswertung bedeutet eine Änderung von α und β , dass sich die Phase zwischen den beiden Abtastphotoempfängern ändert. Es entstehen eine Nichtlinearität in der Signalauswertung. Wenn der Streifenabstand des Interferenzbildes sich zu stark ändert, kann die photoelektrische Zählung der Interferenzstreifen vollkommen gestört werden. Wenn die Verkipfung eine bestimmte Grenze überschritten hat, wird damit die Längenmessung unmöglich. Mit der Einführung der Winkelregelung kann die Verkipfung vermieden werden und eine solche Situation verhindert werden.

5.2.2 Minimierung der Messabweichungen durch konstruktive Anordnungen

5.2.2.1 Justierverfahren der Fluchtung und der Parallelität der Achsen

Um bei der messtechnischen Überprüfung zwischen dem Messtaster und dem Interferometer des Prüfgerätes auf geringste Messunsicherheiten zu kommen, ist eine sorgfältige Justierung

aller Komponenten erforderlich. Bei der Justierung handelt es sich vor allem um die Eliminierung mechanischer Messfehler, insbesondere die Optimierung der Parallelität und die Minimierung des Versatzes.

Konzeptionell wurde vorgesehen, dass sich die beiden Messachsen in Flucht befinden. Durch geeignete Justierung soll erreicht werden, dass die Fluchtung und Parallelität auch praktisch minimiert wird. Dazu sind verschiedene Justierschritte erforderlich.

Für die Überprüfung des Messtasters wird die Achse des Spannschaftes als Bezugsmessachse, bzw. als Messachse des Gesamtsystems angenommen. Die Achse des Messkörpers, die Richtung der Messstrahls und die Richtung des Winkelsensors im Prüfgerät müssen nun möglichst parallel zueinander justiert werden. Die Achse der Führung im Prüfgerät ist zuvor bei der Montage mit konstanten Spannkräften so eingerichtet worden, dass sie möglichst senkrecht zur Zwischenplatte und Deckplatte, d.h. also auch parallel zur Messachse liegt.

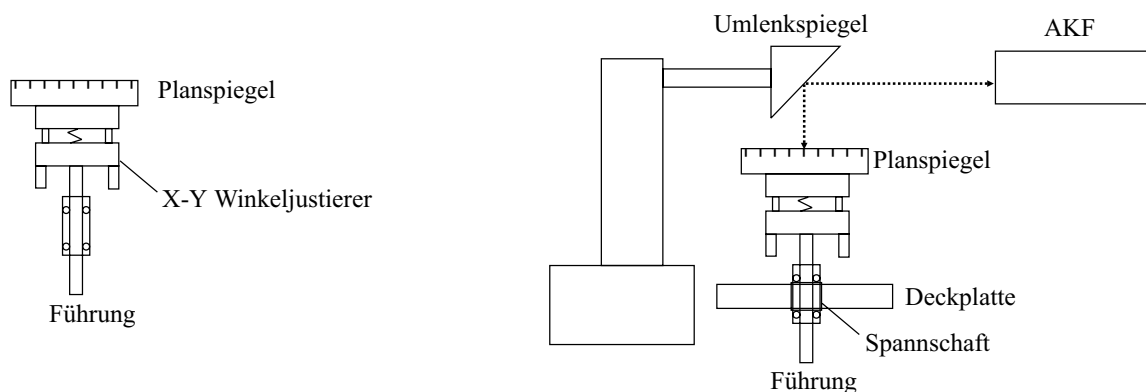
Zuerst wird die Parallelität zwischen der Messachse und dem Messstrahl des Interferometers im Prüfgerät justiert. Danach wird der Versatz zwischen der Messachse und dem Messstrahl justiert. Damit wird der Abbefehler minimiert. Anschließend wird der Messkörper senkrecht zur Messachse justiert. Zum Schluss werden die Richtung des Strahls des Winkelsensors und der Referenzspiegel des Interferometers justiert, womit ein optimaler Arbeitspunkt des Winkelsensors und ein ideales Interferenzsignal erzielt werden kann.

Für diese Maßnahmen sind einige Hilfsvorrichtungen erforderlich, die es ermöglichen, die entsprechende Abweichung (Winkel bzw. Versatz) zu messen und gleichzeitig die erforderliche Genauigkeit zu erreichen. Die Justierung wird in folgenden Schritten durchgeführt.

1. Ermittlung der Richtung der Messachse:

Um die Richtung der Messachse bzw. hier die Achse des Spannschaftes bestimmen zu können, wird eine Wälzkörperführung mit einem justierbaren Planspiegel an Stelle des Messtasters in das Prüfgerät eingesetzt (Bild 24-1-1A). Durch Drehung des Planspiegels gegenüber einem optischen AKF wird die Messachse durch wiederholte Justierung des Planspiegels ermittelt. Dazu sind folgende Schritte erforderlich:

Mit Hilfe der Umschlagmethode wird zunächst der Planspiegel genau senkrecht zur Führungsachse der Wälzkörperführung justiert (Bild 24-1-1B). Das geschieht mit dem x-y-Winkeljustierer, auf dem der Planspiegel befestigt ist. Die erreichbare Einstellunsicherheit beträgt etwa 15". Wird das AKF am Ende dieser Justierung senkrecht zum Planspiegel ausgerichtet, verkörpert die optische Achse gleichsam die Achse der 8 mm-Spannschaftaufnahme. Danach wird die Hilfsvorrichtung aus dem Prüfgerät entfernt. Die optische Achse des AKF verkörpert nun die Achse der Wälzkörperführung und damit die Messachse.



1A. Grobjustage des Hilfsspiegels

1B. Achsenjustage

Bild 24-1: Justierverfahren der Bezugsachse

Die Toleranz der Führung des Hilfsspiegels ($\phi 8h6$) ist $9 \mu\text{m}$, womit hier (Länge der Führung = 54 mm) eine entsprechende Winkelabweichung von ca. $1,55'$ entstehen kann. Dadurch kann ein Kosinus-Fehler von maximal 10^{-7} entstehen.

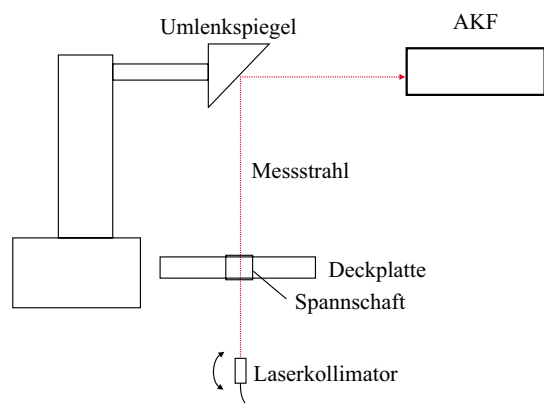
2. Ausrichtung des Messstrahls auf Messachse:

Im zweiten Schritt kann nun der Messstrahl des eingebauten Planspiegelinterferometers parallel zur Spannschaftachse ausgerichtet werden (Bild 24-2). Der Laserstrahl gelangt in das AKF und muss durch die Winkelverstellung des Kollimators auf den Nullpunkt des AKF justiert werden. Somit hat man erreicht, dass die Messachse des Interferometers parallel zur Achse der Spannschaftaufnahme in der Deckplatte des Prüfgerätes, und damit parallel zur Prüflingsachse verläuft. Die Genauigkeit der Parallelität ist von der Auflösung des AKF ($15''$) abhängig. Hier liegt die Abweichung bei ca. $\pm 15''$.

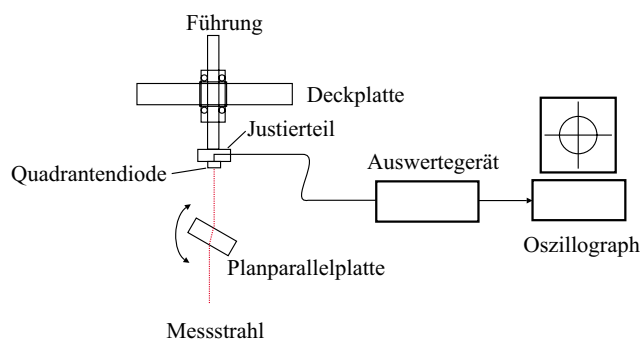
3. Minimierung des lateralen Versatzes Messachse-Messstrahl:

Nach Erreichung einer optimalen Parallelität muss der laterale Versatz zwischen den beiden Achsen minimiert werden. Dazu wird eine Quadrantendiode verwendet (Bild 24-3). Im Interferometer des Prüfgerätes befindet sich eine Parallelplatte. Diese kann in zwei senkrechten Achsen mit Justierelementen verkippt werden. Durch die Verkipfung der justierbaren Planparallelplatte (Abschnitt 3.4, Bild 4-1) wird eine laterale und parallele Verschiebung des Messstrahls ermöglicht. Der Justierbereich beträgt ca. $500 \mu\text{m}$, was für die feine Justierung ausreicht.

Das Justierverfahren beginnt zunächst mit der Einstellung einer Quadrantendiode, die mit Hilfe eines Justierteils auf einer Führung befestigt ist. Diese Quadrantendiode mit der Führung wird in den Spannschaft und gegenüber dem Messstrahl eingesetzt (Bild 24-3). Durch die Drehung der Führung entsteht eine Ellipse auf dem Oszilloskop, wenn die Quadrantendiode nicht in der Mitte der Führung, bzw. Mitte der Messachse liegt. Die Position der Quadrantendiode wird nun so justiert, dass ein Kreis auf dem Oszilloskop entsteht. Damit stimmt die Achse der Quadrantendiode mit dem Mittelpunkt der Messachse überein. Danach wird der Messstahl auf diesen Mittelpunkt gebracht, indem die Parallelplatte so justiert wird, dass der Radius des Kreises auf dem Oszilloskop so klein wie möglich ist. Mit einer Auflösung von $1 \mu\text{m}/4 \text{ mV}$ der Quadrantendiode ist nach Untersuchungen eine Unsicherheit der Positionierung von $30 \mu\text{m}$ erreichbar. Bei einer Verkipfung von $0,2''$ kann somit erreicht werden, dass der Abbe-Fehler kleiner als $0,03 \text{ nm}$ beträgt.



2. Justierung des Messstrahls



3. Versatzjustage

Bild 24-2, 24-3: Justierverfahren der Parallelität und des Versatzes

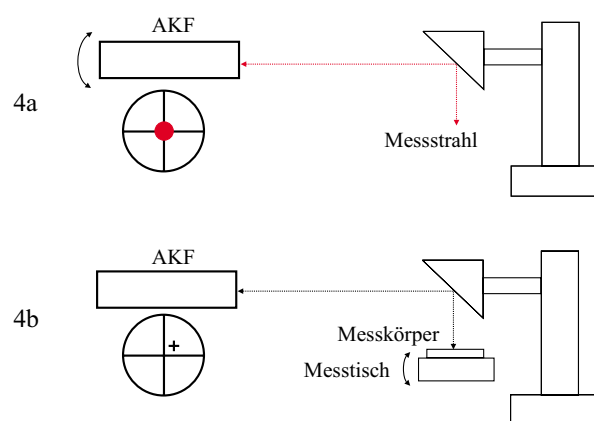
4. Ausrichtung des Normalvektors des Messkörpers auf den Messstrahl:

Nun muss der Messkörper (Glasspiegel bzw. Parallelendmaß) so auf dem Messtisch aufgesetzt (Bild 24-4, Bild 25) werden, dass er senkrecht auf Messachse und damit auch

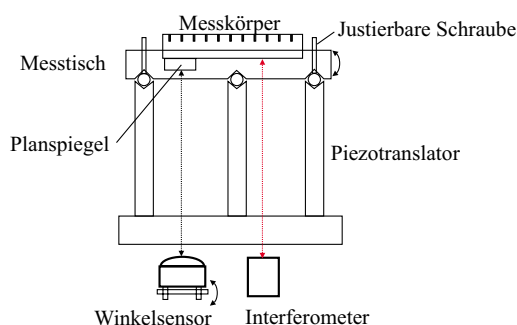
senkrecht zum Messstrahl des Interferometers steht. Damit wird der optische Kosinusfehler im Prüfgerät gemäß Gleichung (23) minimiert. Dazu wird ein zusätzlicher Umlenkspiegel über dem Messtisch angeordnet, um den Messstrahl zu einem externen AKF zu lenken. Zuerst wird das AKF senkrecht zum Messstrahl justiert. Dann wird der Messkörper in den Messtisch eingesetzt. Der Messtisch wird nun mit den Justierschrauben so lange in beiden Kippachsen justiert, bis auch er senkrecht zum AKF steht.

5. Justage des Winkelsensors:

Um den Winkelsensor optimal betreiben zu können, wird nun der Strahl des Winkelsensors senkrecht zum Planspiegel justiert, der unmittelbar neben dem Messkörper fest angebracht ist (Bild 24-5, Bild 25). Dadurch steht der gesamte Messbereich des Winkelsensors zur Verfügung.



4. Justage des Messkörpers

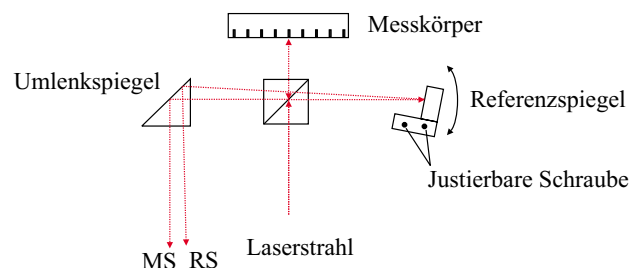


5. Justage des Winkelsensors

Bild 24-4, 24-5: Justierverfahren des Messkörpers und des Winkelsensors

6. Justierung des Referenzspiegels:

Schließlich muss der Referenzspiegel so justiert werden, dass er senkrecht zum Messkörper steht und ein optimales Interferenzsignal entsteht (Bild 24-6). Dazu wird der Strahlteiler vor dem Fotoempfänger 3 entfernt und auf der Position dieses Strahlteilers ein Hilfsumlenkspiegel eingesetzt, der den Mess- und Referenzstrahl aus dem Interferometer eine lange Strecke weiterleitet, so dass zwei Laserflecke auf einem Beobachtungsschirm zu sehen sind. Der Referenzspiegel wird zunächst grob justiert, dass sich beide Strahlen überdecken (Fehler $< 10''$, bei 1mm / 20m). Danach wird der Hilfsumlenkspiegel entfernt und der Strahlteiler wieder eingesetzt. Anschließend wird durch feine Justierung des Referenzspiegels eine optimale Lissajous-Figur eingestellt.



6. Justage des Referenzspiegels

Bild 24-6: Justierverfahren des Referenzspiegels

Mit dem oben erläuterten Justierverfahren liegt der Versatz zwischen der Messachse und dem Messstrahl bei ca. 30 µm und die Parallelität bei ca. 1,63'. Da die Verkippung des Messtisches kleiner als 0,2'' ist, ist der Abbe-Fehler viel kleiner als 1 nm. Die mögliche Kosinus-Messabweichung ist dabei kleiner als 2,2 nm im Messbereich von 20mm.

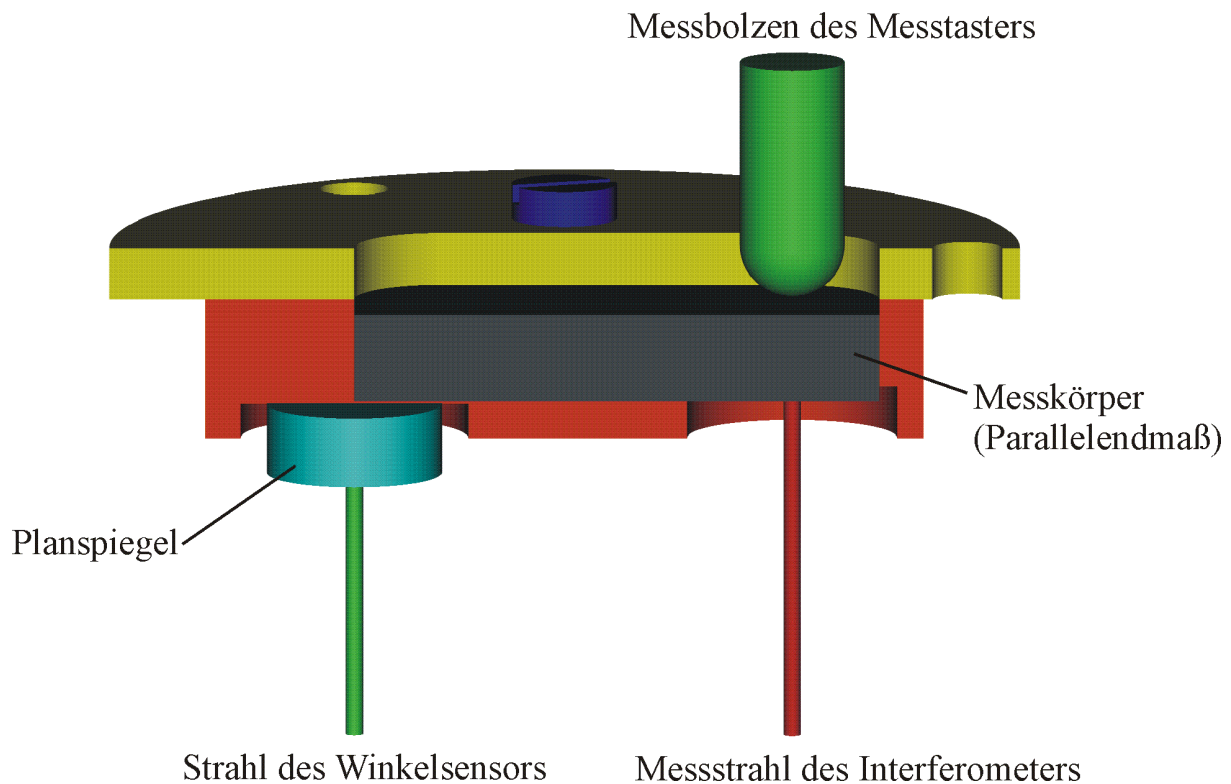


Bild 25: Antastgruppe mit Parallelendmaß als Messkörper

5.2.2.2 Überprüfung der Flucht zwischen der Messachse des Messtasters und des Interferometers im Präzisionsprüfgerät

Mit oben genanntem Justierverfahren wurde eine Flucht von ca. 30 µm erreicht. Im Prüfgerät wird durch die Einführung des Winkelsensors eine experimentelle Überprüfung der Flucht ermöglicht.

Die Gesamtanordnung bestehend aus Messtaster, Interferometer und Winkelsensor. Dieses Verfahren kann nicht nur hier zur Überprüfung der Flucht dienen, es ist auch allgemein zur Ermittlung des Abbe-Offsetes geeignet und auf andere optische Messsysteme anwendbar.

Zur diesem Zweck wird der Messkörper gezielt verkippert. Die Verkippung kann mit Hilfe des eingebauten Winkelsensors gemessen werden. Gleichzeitig wird die Differenz der Anzeigen des Interferometers und des Messtasters ermittelt. Diese Differenz ist von der Flucht und dem Kippwinkel abhängig. Durch den bekannten Kippwinkel und die Längendifferenz kann die Flucht berechnet werden. Je größer die Verkippung des Messkörpers gemacht werden kann, um so genau kann der Versatz ermittelt werden.

Beispielsweise wird mit einem Kippwinkel von 20'' und einer Auflösung der Längenmessung von 1,3 nm beim Bestimmen des Versatzes eine Auflösung von 13 µm erreicht.

Die Längendifferenz zwischen Messtaster und Interferometer des Prüfgerätes infolge einer Verkippung kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\Delta l = v \cdot \tan(\Delta\phi) + d' \cdot \left(\frac{1}{\cos(\phi_1)} - \frac{1}{\cos(\phi_2)} \right) + l_{\text{path}} \left[\frac{1}{\cos(\phi_1)} - \frac{1}{\cos(\phi_2)} \right] \quad (42)$$

Aus dieser Längenänderung kann umgekehrt auf den Versatz v geschlossen werden:

$$v = \left\{ \Delta l - (d' + l_{\text{path}}) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\phi_1)} - \frac{1}{\cos(\phi_2)} \right) \right\} \cdot \frac{1}{\tan(\Delta\phi)} \quad (43)$$

Ermittelt man die Differenz der Längenmessung mit einer Genauigkeit von 2-3 nm bei einer Winkeländerung von 20'', kann ein Versatz von ca. 20-30 μm ermittelt werden (Diagramm 8). Mit dieser Methode kann also eine direkte Prüfung von Flucht und Justierung vorgenommen werden.

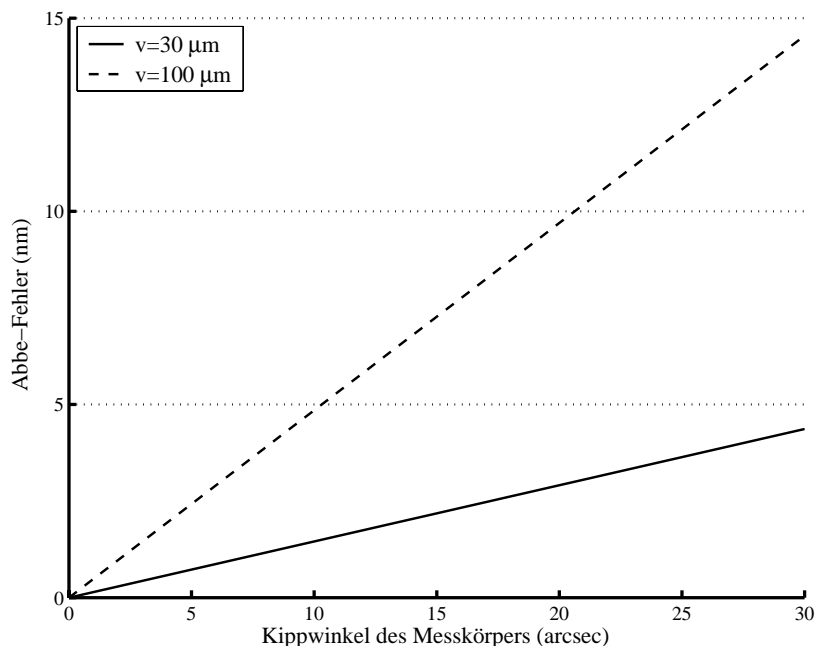


Diagramm 8: Verhältnis zwischen der Winkeländerung des Messkörpers und der verursachten Längenänderung, beispielweise bei $v=30 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$

5.2.3 Mechanische Deformation

Im Prüfgerät bewegt sich der Messtisch, bzw. der Messkörper mit Hilfe der Kugelführungen und des motorischen Antriebssystems zu jedem Messpunkt. Die drei Kugelführungen (siehe Abschnitt 4.2.1.2) sind zwischen den Zwischenplatten 1 und 2 eingespannt (Bild 2). Das Interferometer wird an der Trägerplatte angebracht, die an der Zwischenplatte 1 befestigt ist. Diese Verbindung zwischen den Führungen und dem Interferometer kann durch eine aus möglichem Zwang der Führungen entstehende Deformation der Zwischenplatte 1 zu einer winzigen Lageänderung des Interferometers im Prüfgerät führen. Führt diese Lageänderung zu einer Abstandsänderung zwischen dem Interferometer und der Deckplatte des Prüfgerätes, in der der zu prüfende Messtaster eingespannt ist, entsteht eine Längenmessabweichung. Um diese mögliche Abweichung zu ermitteln und die Messunsicherheit des Prüfgerätes zu minimieren, wäre eine theoretische Analyse, z.B. mit FEM notwendig. Eine Simulation wurde mit der Konstruktion und einer angenommenen konstanten Zwangskraft von 13 N ausgeführt. Die Verteilung der Deformation der Zwischenplatte 1 ist in Bild 26 dargestellt /5-19/. An der Zwischenplatte 1 ergibt sich eine maximale Deformation von ca. -60 bis 100 nm. Wichtig für das Interferometer ist die Lageänderung an der Festposition der Trägerplatte, wo sich das Interferometer befindet. Dabei ist eine Deformation von ca. 40 nm zu sehen, die möglicherweise eine entsprechende Lageänderung der Trägerplatte bzw. des Interferometers hervorrufen kann.

Auf Grund der Kompliziertheit des mechanischen Aufbaus und einer Vielzahl von Parametern, die nicht genau erfasst und bekannt sind, ist diese Analyse nicht erfolversprechend. Eine andere Möglichkeit bietet sich durch eine praktisch experimentelle Untersuchung, wobei die Lageänderung durch wiederholte Beobachtungen und Messungen erfasst werden kann. Diese Untersuchungen werden im folgenden unternommen und der Einfluss dieses mechanischen Fehler wird näher erläutert.

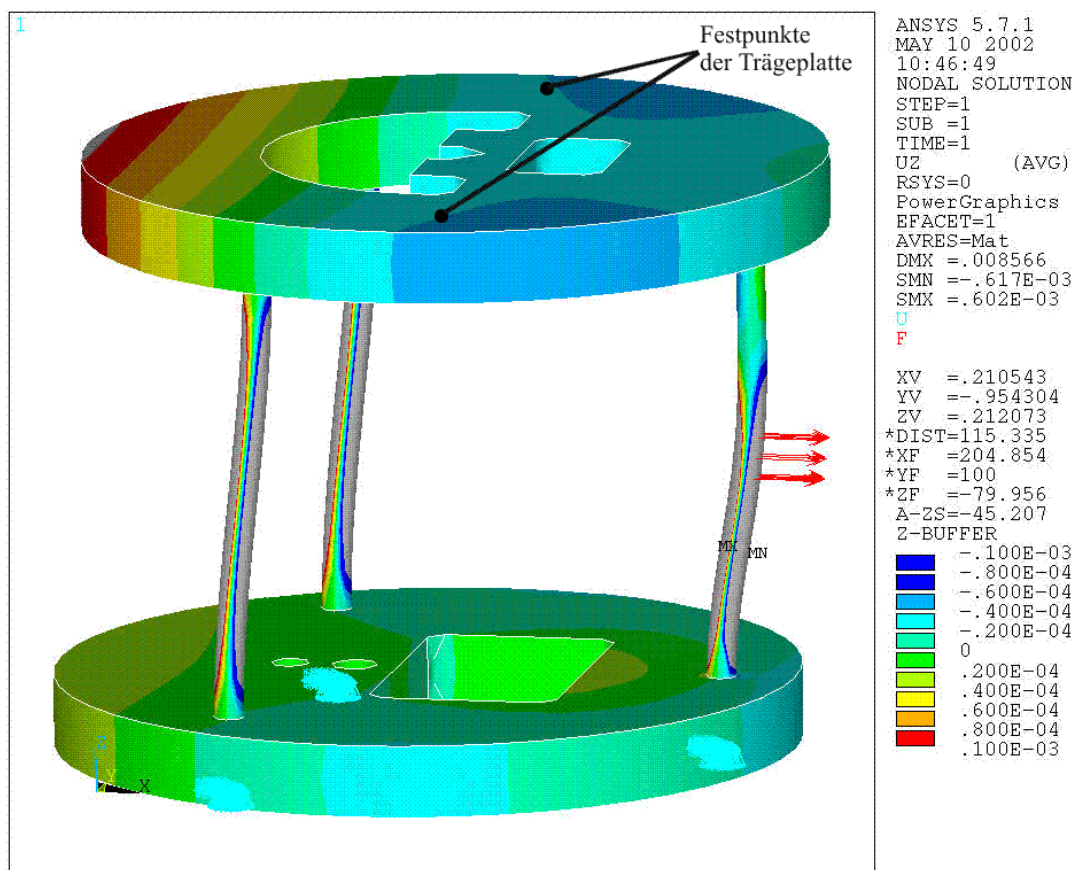


Bild 26: Theoretische Simulation der mechanischen Deformation

5.2.3.1 Experimentelle Untersuchungen der mechanischen Deformation

Um die Deformation experimentell zu ermitteln, muss also der Abstand zwischen Interferometer und Deckplatte bei einer motorischen Verschiebung des Messtisches gemessen werden. Das kann mit Hilfe des Interferometers des Prüfgerätes selbst durchgeführt werden. Dazu muss lediglich der Messkörper aus dem Messtisch herausgenommen werden und ein Planspiegel an der Deckplatte als Messreflektor angebracht werden (Bild 27). Mit dem Messablauf 1 (Abschnitt 4.6.1) wird der Messtisch auf- und abwärts verschoben. Dabei werden die Längenwerte des Prüfgerätes aufgenommen.

Theoretisch sollte während der Messfahrt keine Längenänderung auftreten, wenn der Abstand zwischen der Deckplatte und dem Interferometer bzw. der Zwischenplatte 1 ständig konstant bleibt. Die experimentelle Untersuchung ergab jedoch eine systematische Längenänderung (Diagramm 9) von ca. 21 nm im Messbereich von 18 mm. Mit dieser Untersuchung deutet sich als Fehlerursache eine Deformation der mechanischen Baugruppen des Prüfgerätes an. Diese Deformation kann nach langzeitigen Untersuchungen als eine wiederholbare Erscheinung betrachtet werden.

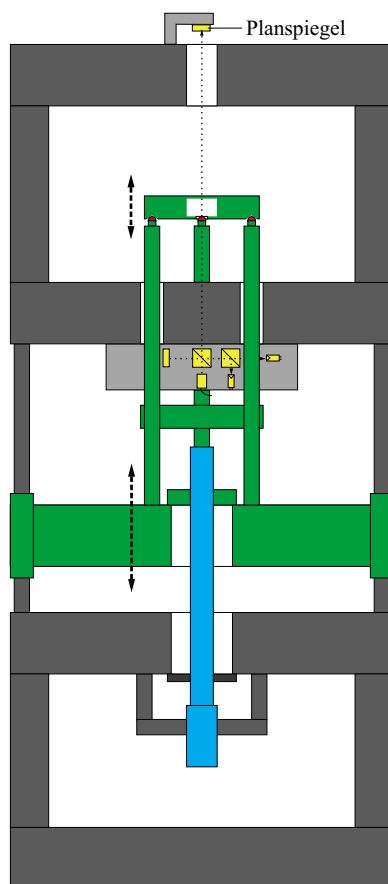


Bild 27: Untersuchung der Lageänderung

5.2.3.2 Kompensation mit ermittelter Kennlinie

Weil diese Deformation wiederholbar und allein von der Konstruktion bzw. der Montage abhängig ist, kann sie als korrigierbarer systematischer Fehler betrachtet werden. Diese systematische Abweichung kann mit einer ermittelten Kennlinie im Messprogramm kompensiert werden. Zur Abschätzung des korrigierten Deformationsfehlers wird die Unsicherheit dieser Kompensation ermittelt. Nach der Analyse wird eine approximierte Kennlinie zweiter Ordnung zur Minimierung dieser systematischen Abweichung verwendet. Nach der Kompensation bleibt eine maximale Abweichung von ca. ± 3 nm (Diagramm 10). Die Unsicherheit beträgt 3,6 nm ($k=2$). Diese Unsicherheit verbleibt nach der Korrektur der Deformationsfehler als zufälliger Fehler des Prüfgerätes.

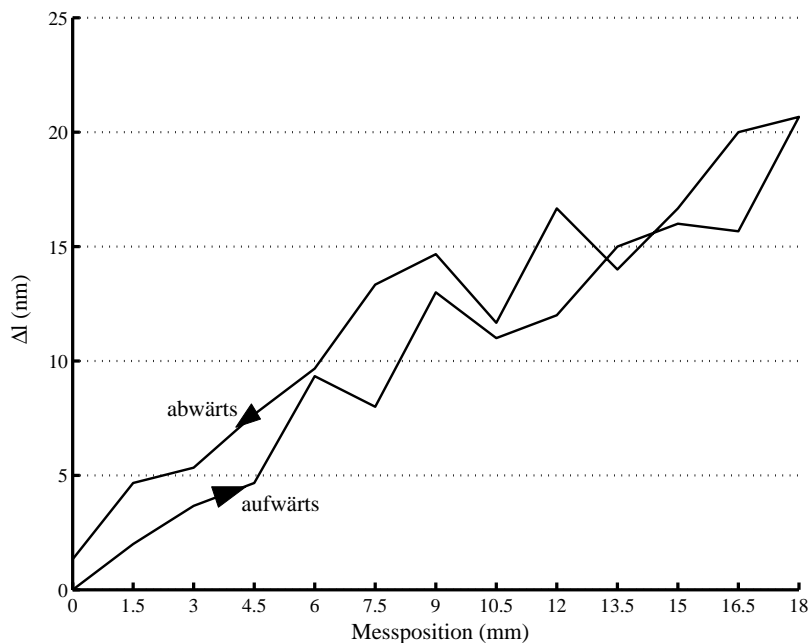


Diagramm 9: Lageänderung im Messbereich von 18 mm

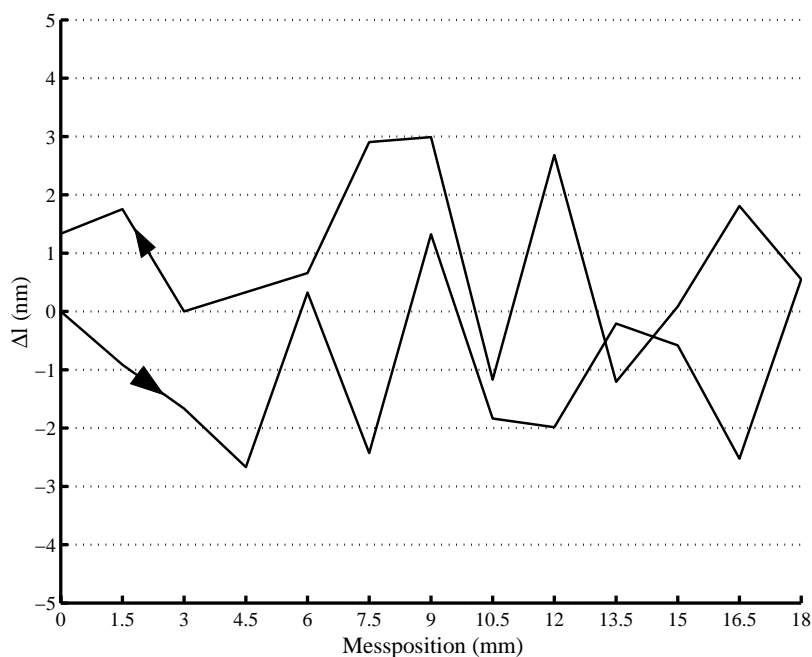


Diagramm 10: Unsicherheit der Deformationskorrektur im Messbereich von 18 mm

5.2.4 Einfluss der thermischen Ausdehnung

Eine Temperaturänderung wirkt sich nicht nur auf die Brechzahl aus. Es kommt zusätzlich zu einer thermischen Ausdehnung der Bauteile im Prüfgerät, denn die geometrischen Maße der Bauteile sind unterschiedlich und von der Temperatur und ihren Ausdehnungskoeffizienten abhängig. Dies kann eine Längenänderung während der Messung verursachen, die sich direkt als Längenmessfehler auswirkt. Um diesen Messfehler abzuschätzen und zu minimieren, muss der thermische Einfluss analysiert werden.

5.2.4.1 Ermittlung des thermischen Faktors des Prüfgerätes mit theoretischer Analyse

Der Zusammenhang zwischen der Längen-, der Temperaturänderung und dem Ausdehnungsfaktor kann mit folgender Gleichung dargestellt werden:

$$\Delta l = \sum [l_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta \vartheta_i] \quad (44)$$

Δl : die gesamte thermische Längenänderung der Konstruktion

l_i : die Längen des einzelnen Teils

α_i : Ausdehnungsfaktor des einzelnen Teils

$\Delta \vartheta_i$: Temperaturänderung während der Messung

Die Größen von l_i und α_i sind meistens bekannt. Die einzelnen $\Delta \vartheta_i$ sind aber schwer zu ermitteln, weil für jedes Bauteil ein Temperatursensor erforderlich wäre. Dazu werden eine große Menge von Temperatursensoren gebraucht und praktisch ist der Platz dafür auch nicht ausreichend. Es wird davon ausgegangen, dass $\Delta \vartheta_i$ allgemein nahezu gleich und die Differenz sehr gering ist, wenn das System thermisch stabil ist. Zur Temperierung wird das Prüfgerät in einem passiven Temperaturschutz (Styroporhaube) untergebracht. Dabei wird durch den Einsatz des Temperaturschutzes das Prüfgerät als ein homogenes temperiertes System betrachtet bzw. angenommen, dass die Temperaturänderung des Prüfgerätes gleich ist und die Temperaturänderung des Gesamtprüfgerätes durch eine Temperaturänderung ausreichend genau beschrieben werden kann. Nach experimentellen Untersuchungen mit zwei PT 1000 an der Stelle der Deckplatte und der Zwischenplatte 1 zeigt sich, dass die Temperaturänderungen fast miteinander übereinstimmen und die Differenz zwischen den beiden kleiner als 0,006 K (2σ , 95%) (Diagramm 11) ist. Damit ist diese Annahme gerechtfertigt.

Zur theoretischen Analyse des Ausdehnungsfaktors des Prüfgerätes kann (44) mit einer mittleren Temperaturänderung des Prüfgerätes $\Delta \vartheta_p$ vereinfacht werden:

$$\Delta l_p = \Delta \vartheta_p \cdot \sum (l_i \cdot \alpha_i) \quad (45)$$

Die thermische Längenausdehnung Δl_p setzt sich aus den Einzelausdehnungen zusammen und es wirkt eine resultierende Temperaturänderung $\Delta \vartheta_p$. Temperaturgradienten im Prüfgerät werden damit vernachlässigt.

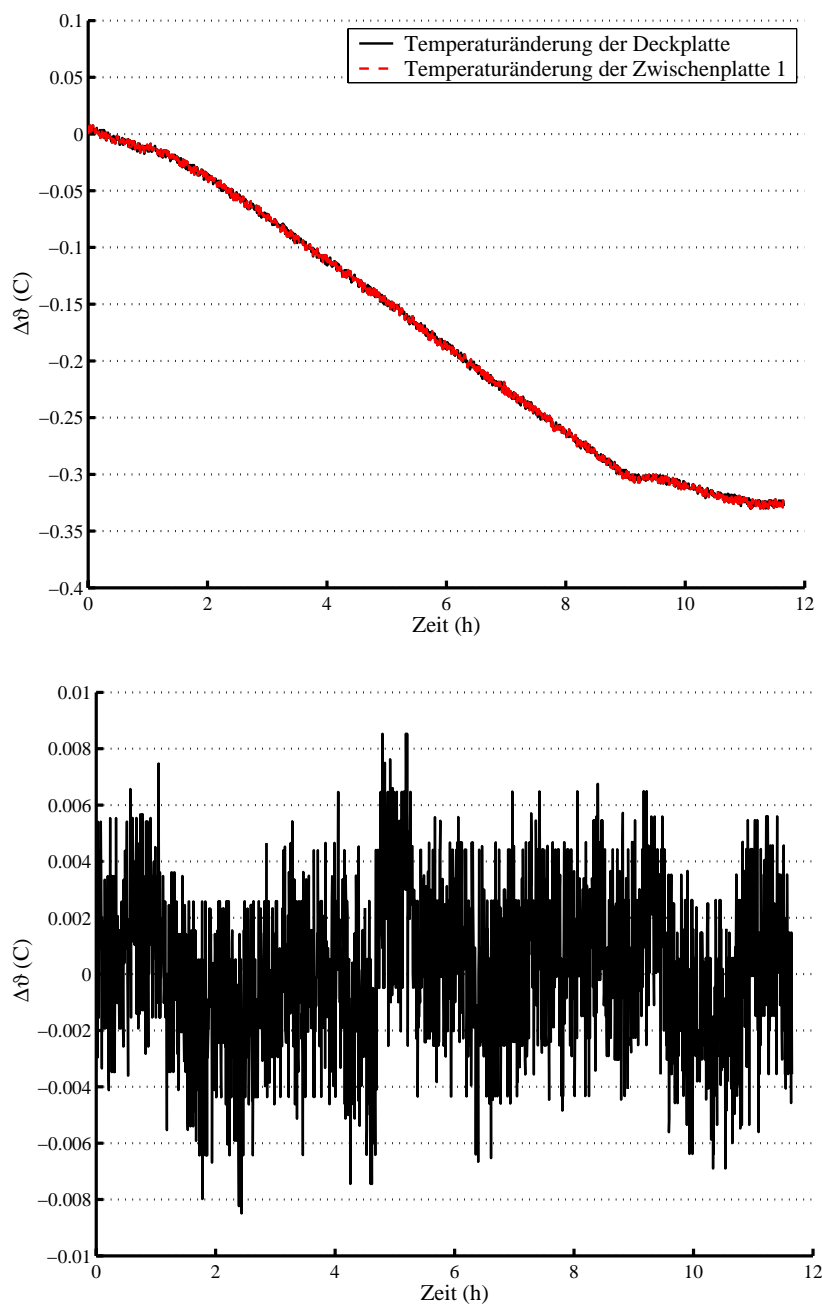


Diagramm 11: oben: Temperaturänderung an der Deckplatte und der Zwischenplatte 1, unten: Differenz zwischen den beiden

Zur Analyse wird angenommen, dass der Messtaster einen Ausdehnungsfaktor $\frac{\Delta l_{\text{Messtaster}}}{\Delta \vartheta}$ besitzt. Die thermische Ausdehnung des Prüfgerätes stellt die Differenz der Längenausdehnung zwischen Punkt 1 – 2 und der Längenausdehnung zwischen Punkt 2 – 3 dar (Bild 28-1).

$$\left. \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \right|_{\text{Punkt 1-2}} = (St_{1b} - \text{Endmaß}) \cdot \alpha_{st} + \frac{\Delta l_{\text{Messtaster}}}{\Delta \vartheta} - St_2 \cdot \alpha_{st} - Inv_1 \cdot \alpha_{inv} - St_3 \cdot \alpha_{st} - St_4 \cdot \alpha_{st} - St_5 \cdot \alpha_{st} + St_5 \cdot \alpha_{st} + Inv_2 \cdot \alpha_{inv} + St_6 \cdot \alpha_{st} + PT \cdot \alpha_{pt} + (St_{1a} - S_{1b}) \cdot \alpha_{st} \quad (46)$$

$$\left. \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \right|_{\text{Punkt 2-3}} = (St_{1a} - St_{1b}) \cdot \alpha_{st} + Pt \cdot \alpha_{pt} + St_6 \cdot \alpha_{st} + Inv_2 \cdot \alpha_{inv} + St_5 \cdot \alpha_{st} - St_5 \cdot \alpha_{st} - St_4 \cdot \alpha_{st} - St_3 \cdot \alpha_{st} - Inv_5 \cdot \alpha_{inv} + Inv_5 \cdot \alpha_{inv} + St_3 \cdot \alpha_{st} + Inv_3 \cdot \alpha_{inv} - Inv_4 \cdot \alpha_{inv} \quad (47)$$

Damit kann nach (45), (46) und (47) der theoretische Ausdehnungsfaktor des Prüfgerätes F_{P-theo} mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$F_{P-theo} = \left. \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \right|_{\text{Punkt 1-2}} - \left. \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \right|_{\text{Punkt 2-3}} = ((St_1 - \text{Endmaß}) \cdot \alpha_{st}) - St_2 \cdot \alpha_{st} - Inv_1 \cdot \alpha_{inv} - (Inv_3 - Inv_4) \cdot \alpha_{inv} - St_3 \cdot \alpha_{st} \quad (48)$$

Der Einfluss der Luftstrecke wird hier nicht mitberechnet, weil dieser im Messprogramm bei der Korrektur der Totstrecke (5.1.3) kompensiert wird.

Nach der Berechnung beträgt der Faktor -427 nm/K . Aus dieser Analyse ist zu sehen, dass die Strecken St_2 und St_3 den größten Einfluss haben, weil der Ausdehnungsfaktor von Stahl viel größer als Invar ist. Die beiden Platten wurden aus Gründen der Verfügbarkeit und des Preises aus Stahl gefertigt. Sollte die thermische Stabilität zu einem Problem werden, muss überprüft werden, ob diese Platte aus Invar gefertigt werden können. Der Ausdehnungsfaktor würde sich dadurch erheblich auf $2,5 \text{ nm/K}$ verringern.

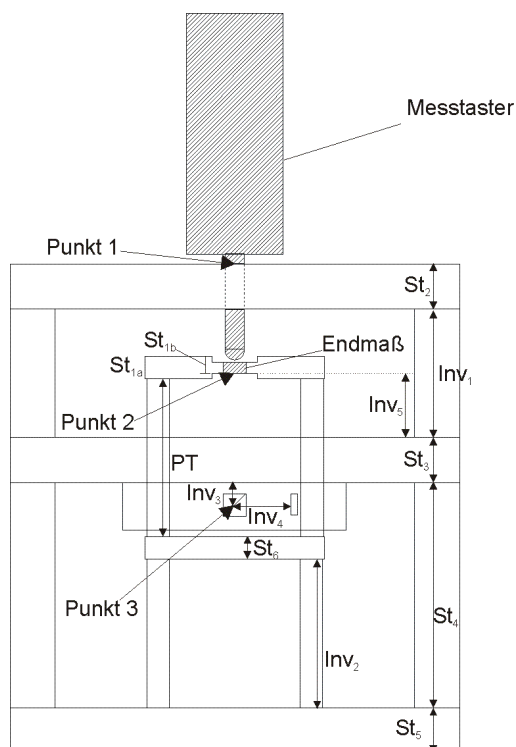


Bild 28-1: Konstruktion der Analyse des theoretischen Ausdehnungsfaktor des Prüfgerätes

Um diesen theoretischen ermittelten Faktor durch Experimente nachzuweisen, wird erst der Faktor des Messtasters ermittelt werden. Durch die Längenänderung von Messtaster und Interferometer im Prüfgerät bildet sich eine Ausdehnung des Gesamtsystems, die dann mit der Temperaturänderung des Gesamtsystems zur Berechnung des Ausdehnungsfaktors zur Verfügung steht (49). Es wird davon ausgegangen, dass für das Gesamtsystem ein

resultierender Ausdehnungsfaktor angegeben werden kann (Gleichung (45)). Damit kann der Faktor des Gesamtsystems F_G wie folgt beschrieben werden:

$$F_G = \frac{\Delta l_G}{\Delta \vartheta_G} \quad (49)$$

Hier stellen Δl_G und $\Delta \vartheta_G$ die Ausdehnung und die systematische Temperaturänderung des Gesamtsystems dar. Dabei wird das Gesamtsystem auch als homogen und thermisch stabil betrachtet. Die Ausdehnung kann durch die Längenwerte des Messtaster und des Interferometers im Prüfgerät bzw. mit der Differenz der beiden ermittelt werden. Damit kann der Zusammenhang zwischen dem Ausdehnungsfaktor von Gesamtsystem, Messtaster und Prüfgerät im folgenden beschrieben werden:

$$F_G \cdot \Delta \vartheta_G = F_T \cdot \Delta \vartheta_T + F_P \cdot \Delta \vartheta_P \quad (50)$$

$$F_P = \frac{F_G \cdot \Delta \vartheta_G - F_T \cdot \Delta \vartheta_T}{\Delta \vartheta_P} \quad (51)$$

Als Temperaturänderung des Gesamtsystems wird der Mittelwert der Temperaturänderung von Messtaster und Interferometer im Prüfgerät benutzt. Denn nach der Untersuchung der Temperaturänderungen (Diagramm 11) ist diese Annahme akzeptabel.

Mit dieser Annahme $\Delta \vartheta_T \cong \Delta \vartheta_P \cong \Delta \vartheta_G$ gilt dann vereinfacht:

$$F_P = F_G - F_T \quad (52)$$

Zur Ermittlung von F_P muss der Faktor des Messtasters F_T bekannt sein. Dazu soll im weiteren dieser Faktor F_T ermittelt werden (Abschnitt 5.3.2).

Die Temperaturdrift ($\Delta \vartheta$) führt zu einer Längenmessabweichung der Vergleichsmessung. Zur Eliminierung des Messfehlers muss diese Drift während der Messung klein gehalten werden. Außer der Temperaturdrift spielt die Größe des Ausdehnungsfaktors F eine wichtige Rolle. Mit der Kenntnis des Ausdehnungsfaktors des Prüfgerätes ist es möglich Aussagen über die thermische Einflussgröße des Prüfgerätes zu treffen.

5.2.4.2 Ermittlung des thermischen Faktors des Messtasters

Die Ermittlung des Ausdehnungsfaktors des Messtasters kann wie bereits erwähnt, sowohl theoretisch als auch experimentell durchgeführt werden. Hier werden wiederum beide verwendet, um die theoretischen Ergebnisse durch die praktische Messung zu verifizieren.

Theoretisch kann F_T auch nach (45) mit den konstruktiven Größen entsprechend Bild 28-2 berechnet werden, der sich aus der Differenz von der Mess- und Referenzstrecke berechnet und wie folgt beschrieben wird:

$$\left. \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \right|_{MS} = Gl_1 \cdot \alpha_{glas} + Gl_2 \cdot (\alpha_{al} - \alpha_{glas}) + Al_1 \cdot \alpha_{al} + St_1 \cdot \alpha_{st} - Al_2 \cdot \alpha_{al} - Al_3 \cdot \alpha_{al} \quad (53)$$

$$\left. \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \right|_{RS} = Gl_3 \cdot \alpha_{glas} + Gl_4 \cdot \alpha_{glas} - Al_4 \cdot \alpha_{al} - Al_5 \cdot \alpha_{al} - Al_6 \cdot \alpha_{al} \quad (54)$$

Aus der Differenz von Gleichung (53) und (54) ergibt sich der theoretische Faktor F_{T-theo} :

$$F_{T-theo} = \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \Big|_{MS} - \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} \Big|_{RS} = -41,5, \text{ nm/K}$$

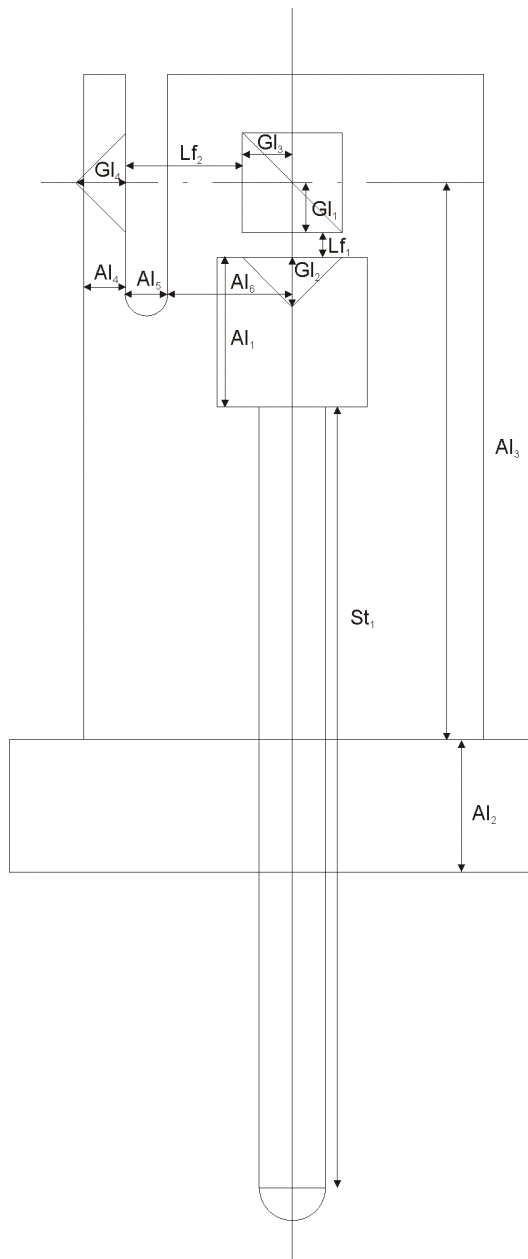


Bild 28-2: Konstruktion der Analyse des praktisch Ausdehnungsfaktor des Messtasters

Zur experimentellen Untersuchung wurde der Messtaster in einem Messportal eingesetzt (Bild 28-3). Mit diesem Aufbau kann der Ausdehnungsfaktor des Messtasters F_{T-exp} aus dem experimentell ermittelten $\frac{\Delta l}{\Delta \vartheta}$ und unter Berücksichtigung der anderen bekannte Maße und Ausdehnungsfaktoren bestimmt werden. Diese Berechnung wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\frac{\Delta l}{\Delta \vartheta} = F_{T-exp} + ((Endmaß + Messtisch) \cdot \alpha_{st}) - (Inv \cdot \alpha_{inv}) - (St_1 \cdot \alpha_{st}) \quad (55)$$

Nach der Untersuchung und Berechnung ergibt sich der experimentelle Faktor:

$$F_{T-\text{exp}} = -80 \text{ nm/K}$$

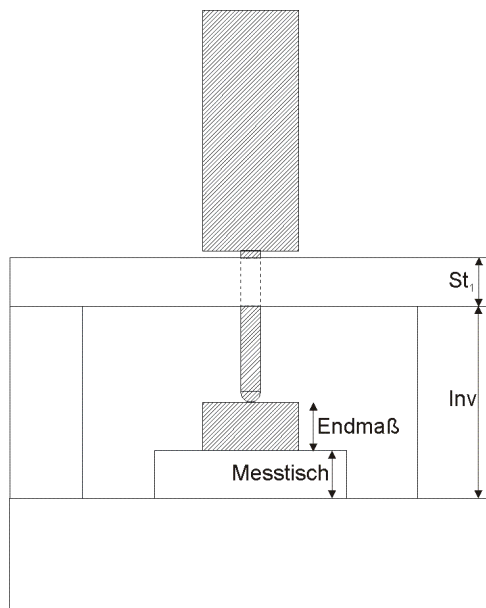


Bild 28-3: Konstruktion der Analyse des praktischen Ausdehnungsfaktor des Messtasters

Im Vergleich zu theoretischer Analyse bleibt eine Differenz von ca. 40 nm/K zwischen dem experimentellen und theoretischen Faktor. Bei der theoretischen Analyse konnten einige Details der Konstruktion, wie z.B. Schrauben, Klebstoff usw., nicht komplett in die Analyse mit eingezogen sind. Dadurch ist die thermische Auswirkung nicht vollständig erfassbar. Deswegen soll zur weiteren Analyse der experimentelle Faktor verwendet werden, da der experimentelle Faktor dem realen Ausdehnungsfaktor besser entspricht.

5.2.4.3 Ermittlung des thermischen Faktors des Prüfgerätes mit praktischer Untersuchung

Wie in 5.3.1 und (51) bereits erläutert und dargestellt, kann nach der Erfassung des Ausdehnungsfaktors des Messtasters der experimentelle Ausdehnungsfaktor des Prüfgerätes mit dem Messaufbau von Bild 27-1 ermittelt werden.

Der Messtaster, dessen Ausdehnungsfaktor bekannt ist, wird im Prüfgerät eingesetzt. Danach werden die Längen- und Temperaturwerte von Messtaster und Interferometer im Prüfgerät aufgenommen. Aus der Längendifferenz von Messtaster und Interferometer kann die Längenänderung des Gesamtsystems bestimmt werden. Der Mittelwert der Temperaturänderung von Messtaster und Prüfgerät stellt die systematische Temperaturänderung dar. Durch diese Längen- und Temperaturänderung kann der Faktor des Gesamtsystems dann berechnet werden. Der Faktor beträgt des Gesamtsystems -434 nm/K (Unsicherheit 35 nm/K , 2σ , 95%). Da der Faktor des Messtaster bei -80 nm/K liegt, ist der Faktor des Prüfgerätes -354 nm/K .

Es ist zu erkennen, dass hier auch eine signifikante Diskrepanz zwischen dem theoretischen und experimentellen Faktor besteht. Die Ursache kann wiederum darin bestehen, dass in der theoretischen Analyse die kompletten Bauteilen nicht eingeschlossen werden können und dadurch die thermische Auswirkung nicht konkret abgeschätzt wird.

5.2.4.4 Schlussfolgerung der Analyse des Ausdehnungsfaktors

Im Vergleich zu dem Ergebnis der experimentellen Untersuchungen besteht sowohl im Prüfgerät (bzw. Gesamtsystem) als auch im Messtaster eine deutliche Diskrepanz zwischen theoretischem und experimentellem Faktor. Es wird davon ausgegangen, dass bei der theoretischen Untersuchung einige Details in der Analyse nicht berücksichtigt wurde. Darüber hinaus können natürlich auch im System vorhandene mechanische Spannungen bei Temperaturänderung zu erheblichen Längenänderungen führen, die im hier benutzten Modell nicht beachtet wurden. Deshalb wird der experimentell ermittelte Faktor zur Abschätzung der Fehler verwendet.

Mit diesem Faktor kann allerdings nur die mögliche statische Abweichung durch die thermische Ausdehnung abgeschätzt werden, weil die dynamischen Verhältnisse der Wärmeübertragung während des Messablaufes nur sehr schwer beschrieben werden können. Eine punktuelle und dynamische Korrektur der Temperaturdrift ist daher schwer zu realisieren. Deswegen können die Wirkungen der Ausdehnung nur für einen komplette Messablauf mit der entstehenden Temperaturänderung abgeschätzt werden, die dadurch resultierenden Messfehler allerdings nicht punktuell korrigiert werden. Zur Eliminierung des thermischen Einflusses auf die Überprüfung wird vorgeschlagen, dass die Messabläufe unter geringer Temperaturänderung und kurzer Messzeit durchgeführt werden sollen. Dadurch kann sich für die Überprüfung eine geringe Messunsicherheit aus der Temperaturänderung ergeben. Zusammengefasst sollen diese experimentell erzielten Faktoren nur den möglichen Wirkungsbereich der Temperaturänderung auf die gesamte Längenmessung aufzeigen und beim Unsicherheitsbudget des Prüfgerätes zur Verfügung stehen.

5.2.5 Einfluss der Messkraft

Als Messkraft wird bei Längenmessgeräten (z.B. Messuhr, Feinzeiger, Bügelmessschraube) stets diejenige Kraft bezeichnet, die mittels des Messbolzens auf den Messgegenstand wirkt. Bei der Verwendung von Kugelmesseinsätzen kommt es zu elastischen Verformungen des Werkstoffes an der Berührungsstelle /5-20/. Dadurch wird das Maß des Prüflings verfälscht. Für Längenmessungen muss natürlich eine plastische Verformung verhindert werden. Die Messkraft wird auch als statische Messkraft bezeichnet. Ihre Auswirkung lässt sich in den meisten Fällen rechnerisch ermitteln. Im Vergleich zur dynamischen Messkraft ist die im Ruhezustand wirkende statische Messkraft klein. Bei der Überprüfung der Messtaster mit dem Prüfgerät findet die Messung erst ein paar Sekunden nach der Antastung beim Messpunkt statt. Deswegen wird hier nur die statische Messkraft behandelt und analysiert.

Durch die Berührung zwischen der Kugel des Messbolzens und dem Messkörper des Prüfgerätes entsteht eine elastische kreisförmige Verformung. Während der Messung auf verschiedenen Messpunkten kann diese Verformung eine zusätzliche Längenänderung verursachen, wenn sich diese Messkraft inzwischen geändert hat. Ideal wäre, die Messkraft bei allen Antastpunkten konstant zu halten. Damit ergibt sich eine gleiche Verformung, die dann keinen Messfehler verursacht. Aus mechanischen Sicht ist das schwer zu erreichen. Der Einfluss von Schwankungen der Messkraft auf die Abplattung soll im folgenden analysiert und untersucht werden.

5.2.5.1 Theoretische Analyse

Weil während der Überprüfung des Messtasters eine gleichzeitige Ermittlung der Messkraft (bzw. Abplattung) im Prüfgerät nicht praktisch durchführbar ist, werden eine theoretische Analyse und eine separate Untersuchung der Messkraft des Messtasters vorgenommen.

Nach /5-8, 5-21/ kann die Abplattungsänderung mit folgender Gleichung beschrieben werden.

$$\Delta u = \sqrt[3]{\left(\frac{1-\nu_k^2}{E_k} + \frac{1-\nu_e^2}{E_e}\right)^2} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{F \cdot r'} \cdot \Delta F \quad (56)$$

Die Abplattungsänderung ist vom Material (Elastizitätsmodul E und Poisson-Konstante ν), der Antastkraft F , den Radius der Antastkugel r' und der Messkraftänderung ΔF abhängig. Durch unterschiedliches Material des Messkörpers kann die Größe der Abplattung geändert werden. Es wird diese Auswirkung theoretisch ermittelt, indem die Analyse mit einer Stahlkugel ($r'=1,5$) und einem Messkraft von $0,8$ N gegenüber Messkörper aus Glas und Stahl durchgeführt wird. Wenn die Messkraft während der Messung eine Schwankung von $\pm 0,02$ N hat, ergibt sich eine Abplattungsänderung von ± 4 nm beim Stahl-Messkörper und von ± 7 nm beim Glas-Messkörper (Diagramm 12a). Es ist eindeutig zu sehen, dass die Abplattungsänderung Δu proportional zur Änderung der Messkraft ΔF ist. Außerdem ist die Abplattungsänderung von Stahl etwas besser als Glas.

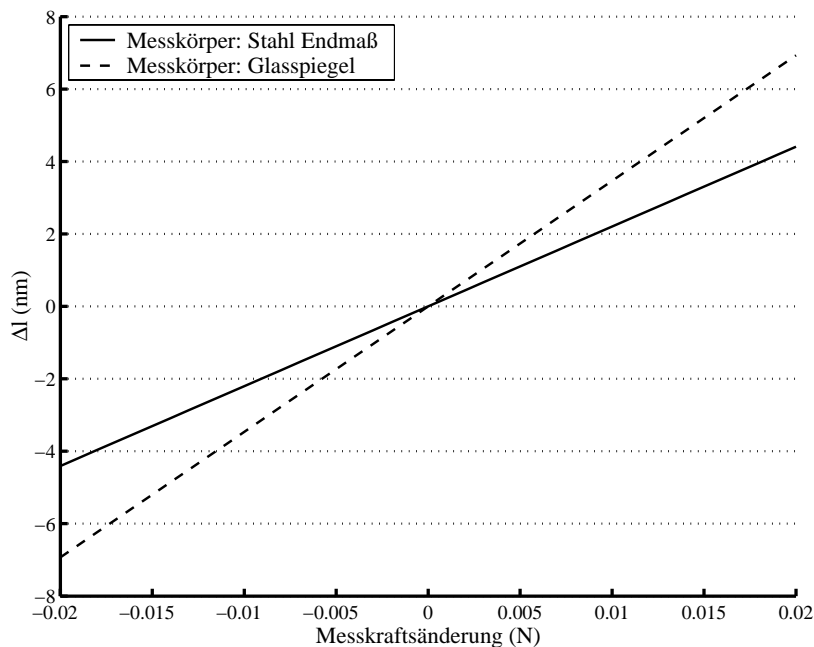


Diagramm 12a: Abplattungsänderung, Stahl Messkugel mit Stahl Endmaß und Glasspiegel

5.2.5.2 Experimentelle Untersuchung der Verteilung der Messkraft des Messtasters

Zur experimentellen Untersuchung wird der Messtaster extern in einem Messtisch eingespannt. Mit Hilfe von gestuften Endmaßen (Intervall $1,5$ mm) und einer Waage wird die Messkraft im Messbereich von 18 mm ermittelt. Es wird die Messkraft des Messtasters im Messbereich in der hinaufgehenden und heruntergehenden Richtung wiederholt gemessen. Die Schwankung der Messkraft lag beim untersuchten Messtaster bei ca. $0,025$ N. Mit Gleichung (56) beträgt die Unsicherheit der Abplattungsänderung dann ca. $5,5$ nm. Die Verteilung der Mittelwerte der Messkraft und der entsprechende theoretische Abplattungsänderung ist in Diagramm 12b dargestellt.

Erfahrungsgemäß liegt die Messkraftänderung bei ca. $\pm 0,015$ N. Damit ist die Einflussgröße der Abplattungsänderung ca. ± 3 nm. Um diesen Einfluss auf die Längenvergleichsmessung im Prüfgerät genau zu erkennen, sollte vor der Überprüfung eines Messtasters seine Messkraftverteilung im ganzen Messbereich gemessen werden.

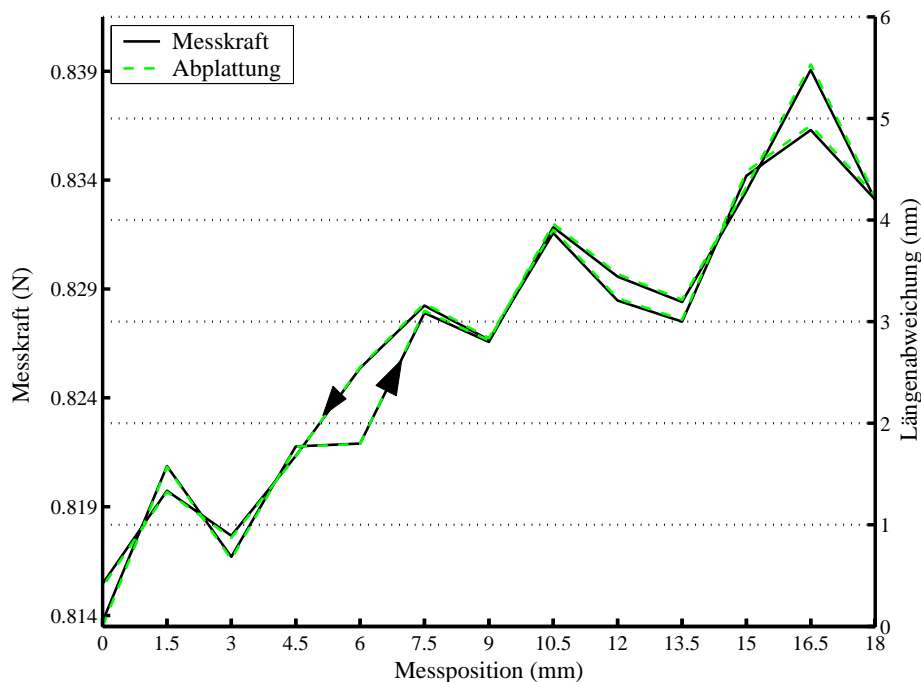


Diagramm 12b: Experimentelle Untersuchung der Messkraft und theoretisch berechnete Abplattung

5.3 Unsicherheitsbudget

Um die komplette Messunsicherheit des Prüfgerätes abschätzen zu können, wird nach dem Prinzip des Leitfadens GUM /5-2, 5-22, 5-23/ ein Unsicherheitsbudget erstellt (Tabelle 6), das die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Messfehleranalysen zusammenfasst. Laut GUM kann die gesamte Unsicherheit (Standardmessunsicherheit) wie folgt beschrieben werden:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (57)$$

hier ist f die Funktion zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen dem Längenwert und entsprechendem Einflussparameter x_i . $u(x_i)$ stellt die Standardmessunsicherheit der einzelnen Fehlermöglichkeit aus x_i dar. In den ersten beiden Spalten von Tabelle 6 sind die Fehlerursachen und ihre entsprechenden Standardunsicherheit dargestellt. Diese ergibt sich aus dem Produkt von der Unsicherheitsgröße und der Verteilungsfaktor. Es folgt die angewandete Verteilungsfunktion. Die Sensitivitätskoeffizienten werden aus den entsprechenden Gleichung abgeleitet. Durch die Multiplikation der Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ und Sensitivitätskoeffizienten $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ wird der einzelne Unsicherheitsbeitrag berechnet. Aus

der Summierung der Quadrate der Einzelbeiträge wird dann das Unsicherheitsquadrat des Prüfgerätes u_c^2 bestimmt.

In der Analyse sind einige Unsicherheiten, derer Einflussgröße nicht direkt ermittelt werden können bzw. aus Erfahrungswerten oder Kalibrierdaten bestimmt wird; wie z. B. die Umweltbedingungen. Nach dem GUM gehören sie zum Typ B der Unsicherheit. Einige andere, derer Einflussgröße direkt per Experiment untersucht werden können, werden als Typ A bezeichnet.

Ursachen	Standard- messunsicherheit $u(x_i)$	Verteilungsfunktion	Sensitivitäts- koeffizient $\frac{\partial f}{\partial x_i}$	Unsicherheits- beitrag $\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i)$	Typ
Vakuumwellenlänge	$0,577 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda$	Rechteckverteilung	$1/\lambda$	$0,58 \cdot 10^{-8} \cdot l$	B
Totstrecke	0,31 nm	Rechteckverteilung	1	0,31 nm	B
Interpolation	0,72 nm	Rechteckverteilung	1	0,72 nm	B
Phasenfehler	0,05 nm	Rechteckverteilung	1	0,05 nm	B
Temperatur	0,1 K	Normalverteilung	$9,5 \cdot 10^{-7} \cdot l/K$	$9,5 \cdot 10^{-8} \cdot l$	B
Druck	25 Pa	Normalverteilung	$-2,68 \cdot 10^{-9} \cdot l/Pa$	$-6,7 \cdot 10^{-8} \cdot l$	B
Feuchtigkeit	1%	Normalverteilung	$8,5 \cdot 10^{-9} \cdot l/\%$	$8,5 \cdot 10^{-9} \cdot l$	B
Temperaturänderung	0,015 K	Rechteckverteilung	354 nm/K	4,1 nm	A
Koeffizient des Prüfgerätes	20 nm/K	Rechteckverteilung	0,02 K	0,40 nm	A
Kosinusfehler	$0,577 \cdot 10^{-7} \cdot l$	Rechteckverteilung	1	$5,8 \cdot 10^{-8} \cdot l$	B
Abbe-Fehler	0,17 nm	Rechteckverteilung	1	0,17 nm	B
Keilwinkel	$1,15 \cdot 10^{-10} \cdot l$	Rechteckverteilung	1	$1,15 \cdot 10^{-10} \cdot l$	B
Gangunterschied wegen Dejustierung des Messkörpers	-0,23 nm	Rechteckverteilung	1	0,23 nm	B
Deformation	2,1 nm	Rechteckverteilung	1	2,1 nm	A
Abplattungsänderung	3,18 nm	Rechteckverteilung	1	3,18 nm	B

Tabelle 6: Unsicherheitsbudget

Zur Analyse der Unsicherheit des Prüfgerätes wird die Unsicherheit der Abplattungsänderung nicht mitberechnet, weil diese von der Messkraft des Messtasters abhängig ist und damit einen Fehler des Messtasters selbst darstellt.

In vielen Fällen ist es üblich, die erweiterte Messunsicherheit anzugeben. Die erweiterte Messunsicherheit ergibt sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor k [5-22]. Die erweiterte Messunsicherheit U kann wie folgt dargestellt werden:

$$U^2 = k^2 \cdot u_c^2 \quad (58)$$

Für den Kalibrierschein des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) ist der Erweiterungsfaktor $k=2$ verbindlich vorgeschrieben. Unter der Voraussetzung einer Normalverteilung entspricht das einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% [5-21]. Aus der Analyse ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit des Prüfgerätes $U_{\text{prüfgerät}}$:

$$U_{\text{prüfgerät}}^2(l) = 87,55 \cdot \text{nm}^2 + 6,75 \cdot 10^{-14} \cdot l^2 \quad (59)$$

Zur Vereinfachung der Darstellung der erweiterten Unsicherheit wird für den Messbereich von 20 mm eine approximierete lineare Kennlinie $a(l)$ ermittelt:

$$a_{\text{prüfgerät}}(l) = \pm(9,34 + 6,7 \cdot 10^{-2} \cdot l) \text{ nm}, k=2, l \text{ in mm}, 0 < l < 20 \text{ mm} \quad (60)$$

Damit ergibt eine Unsicherheit des Prüfgerätes von ca. $\pm 10,6$ nm im Messbereich von 20 mm (60). Das entspricht einer relativen erweiterten Unsicherheit ($k=2$) von $\pm 5 \cdot 10^{-7}$. Die Verteilungen von $U(l)$ und $a(l)$ sind in Diagramm 13 dargestellt.

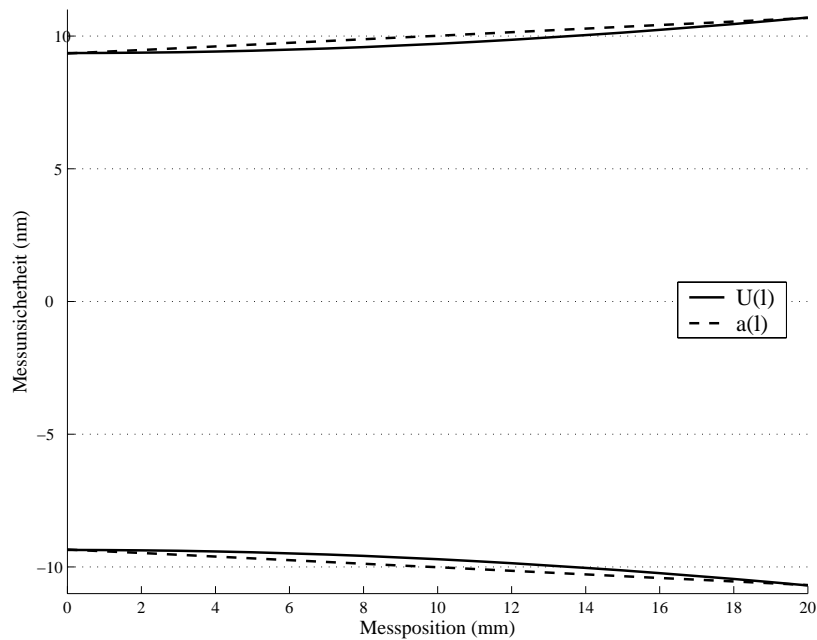


Diagramm 13: Messunsicherheit des Prüfgerätes

Aus der Analyse ist deutlich zu sehen, dass die Temperaturänderung sowohl für die Korrektur der Wellenlängen als auch für die thermischen Ausdehnung einen dominanten Einfluss hat. Infolge dieser Auswirkung soll die Überprüfung unter geringer Temperaturänderung durchgeführt werden. Bei den drei Messabläufen (Abschnitt 4.6.1) dauert ein Messablauf ca. 25 Minuten. Wegen dieser kurzen Messzeit ist eine geringe Temperaturänderung von 0,02 K erreichbar, wenn die Messumgebung thermisch stabil ist. Zur Erreichung oberer Messunsicherheit ist daher vorgesehen, dass die Überprüfung unter dieser Bedingung als gültig zur Auswertung beurteilt wird. Ist die Temperaturänderung größer, muss die Überprüfung wiederholt werden.

6 Untersuchung des Präzisionsprüfgerätes

6.1 Bedeutung der Überprüfung

Vor dem Einsatz des Präzisionsprüfgerätes sollen seine messtechnischen Eigenschaften untersucht und, damit die Messunsicherheit des Prüfgerätes bestimmt werden. Diese Ermittlung soll auf der Grundlage des GUM (guide to the expression of uncertainty in measurement) durchgeführt werden. Im GUM werden Unsicherheitskomponenten nach Typ A und nach Typ B unterschieden. Die Komponenten des Typs B werden durch eine theoretische Analyse ermittelt, wogegen die Einflüsse vom Typ A durch experimentelle Untersuchungen erfasst werden.

Um die Messgenauigkeit des Prüfgerätes experimentell zu bestimmen, ist normalerweise ein Normal zur Überprüfung des Prüfgerätes notwendig. Auf Grund der hohen Genauigkeit ist es zur Zeit schwer, für die Überprüfung des Prüfgerätes ein 5-10 fach genaueres Normal zur Verfügung zu stellen. Das Prüfgerät soll durch den Einsatz eines stabilisierten Lasers und mit sorgfältigen Maßnahmen zur Vermeidung der Messfehler entsprechend der theoretischen Untersuchungen in Abschnitt 5 eine Genauigkeit kleiner als 10 nm erreichen.

Es ist möglich, die Messgenauigkeit des Prüfgerätes indirekt nachzuweisen, indem das Gerät mit mehreren anderen Längenmeßsystemen verglichen wird, die eine Messunsicherheit in der Größenordnung des Prüfgerätes selbst besitzen. Dazu werden hier zwei Messtaster zum Vergleich mit dem Prüfgerät verwendet, ein von der Firma SIOS hergestellter interferenzoptischer Messtaster (taktiler Messtaster) und ein zweiter auf Basis derselben Grundkonstruktion umgebauter, berührungsloser Messtaster (optischer Messtaster). Beide Messtaster werden ebenfalls mit einem stabilisierten Laser betrieben. Damit ist man in der Lage, einen genauen Vergleich durchzuführen.

6.2 Zur Vergleichsmessung angewandete Messtaster

6.2.1 Taktile Messtaster

Der taktile Messtaster ist ein von der Firma SIOS hergestellter Messtaster LM 20. Die Beschreibung dieses Messtasters befindet sich im Kapitel 4.3. Im Gegensatz zur Standardversion wurde der Messtaster mit einem stabilisierten Laser ausgerüstet. Außerdem wurde der Messtaster vor dem Einsatz nochmals genau geprüft und justiert.

6.2.2 Optischer Messtaster

Bei der Vergleichsmessung zwischen taktilem Messtaster und Prüfgerät können durch die Berührung der Messkugel des Messtasters mit dem Messkörper im Prüfgerät und die Anwendung der Führungen im Messtaster bei der Längenmessung einige Messfehler, wie z.B. Abplattung und Unparallelität oder Versatz zwischen optischen und mechanischen Achsen, auftreten. Deswegen ist für die Überprüfung des Prüfgerätes die berührungslose Untersuchung mit dem optischen Messtaster eingeführt worden. Man vermeidet damit insbesondere mechanische Antastfehler.

Der optische Messtaster ist ein Umbau eines oben genannten taktilem Messtasters. Die Konstruktion ist in Bild 28 dargestellt. Statt des Tripelprismen-Interferometers im taktilem Messtaster wird im optischen Messtaster ein $\lambda/2$ -Planspiegelinterferometer verwendet. Das Ausgangssignal dieses $\lambda/2$ -Planspiegelinterferometers wird wie beim taktilem Messtaster von zwei Fasern fotoelektrisch abgetastet /6-1, 6-2/. Durch die Justierung des Referenzspiegels wird der Streifenabstand des Interferenzbildes zu einer optimalen Lissajous-Figur eingestellt, wodurch zwei um 90° phasenverschobene Interferenzsignale entstehen.

Um die Parallelität zwischen Messstrahl des optischen Messtasters und des Interferometers im Prüfgerät zu justieren, benutzt man ein Bauteil aus Strahlteiler und genauem Tripelprisma.

Die Justierung ist in Bild 29 schematisch dargestellt. Gegenüber einem externen optischen AKF wird erst der Messstrahl des Interferometers im Prüfgerät auf Null justiert und anschließend wird der Messstahl des optischen Messtasters genau parallel zu diesem justiert. Anschließend wird der Referenzspiegel des Planspiegelinterferometers so justiert, dass ein ideales Interferenzsignal (90° Phasenverschiebung) entsteht.

Ein Vorteil dieses umgebauten optischen Messtasters besteht darin, dass er den gleichen Spannschaft wie der taktile Messtaster besitzt und deshalb keine extra Halterung gebraucht wird. Gleichzeitig kann die gleiche Auswerteeinheit benutzt werden. Dadurch sind mögliche elektronische Fehler auch ausgeschlossen.

Von Nachteil ist der Versatz zwischen beiden Messstrahlen. Er ist mit den vorhandenen Komponenten nicht zu minimieren. Mit dem in Abschnitt 5.2.1.3 beschriebenen Verfahren kann der Versatz v durch eine definierte Verkippung α des Messkörpers und die daraus resultierende Längendifferenz Δl zwischen dem optischen Messtaster und dem Interferometer des Prüfgerätes bestimmt werden. Die Berechnung erfolgt dann durch $v = \frac{\Delta l}{\tan(\alpha)}$. Bei einer

Verkippung von $12''$ wurde eine Längendifferenz von 64 nm hervorgerufen. Damit beträgt der Versatz ca. 1,1 mm. Mit diesem großen Versatz kann jedoch mit der Winkelregelung (Unsicherheit $< 0,2''$) immer noch ein Abbe-Messfehler von kleiner als 1,1 nm erreicht werden. Deswegen ist der Einsatz dieses optischen Messtaster unter der Vermeidung der Verkippung des Messkörpers akzeptabel.

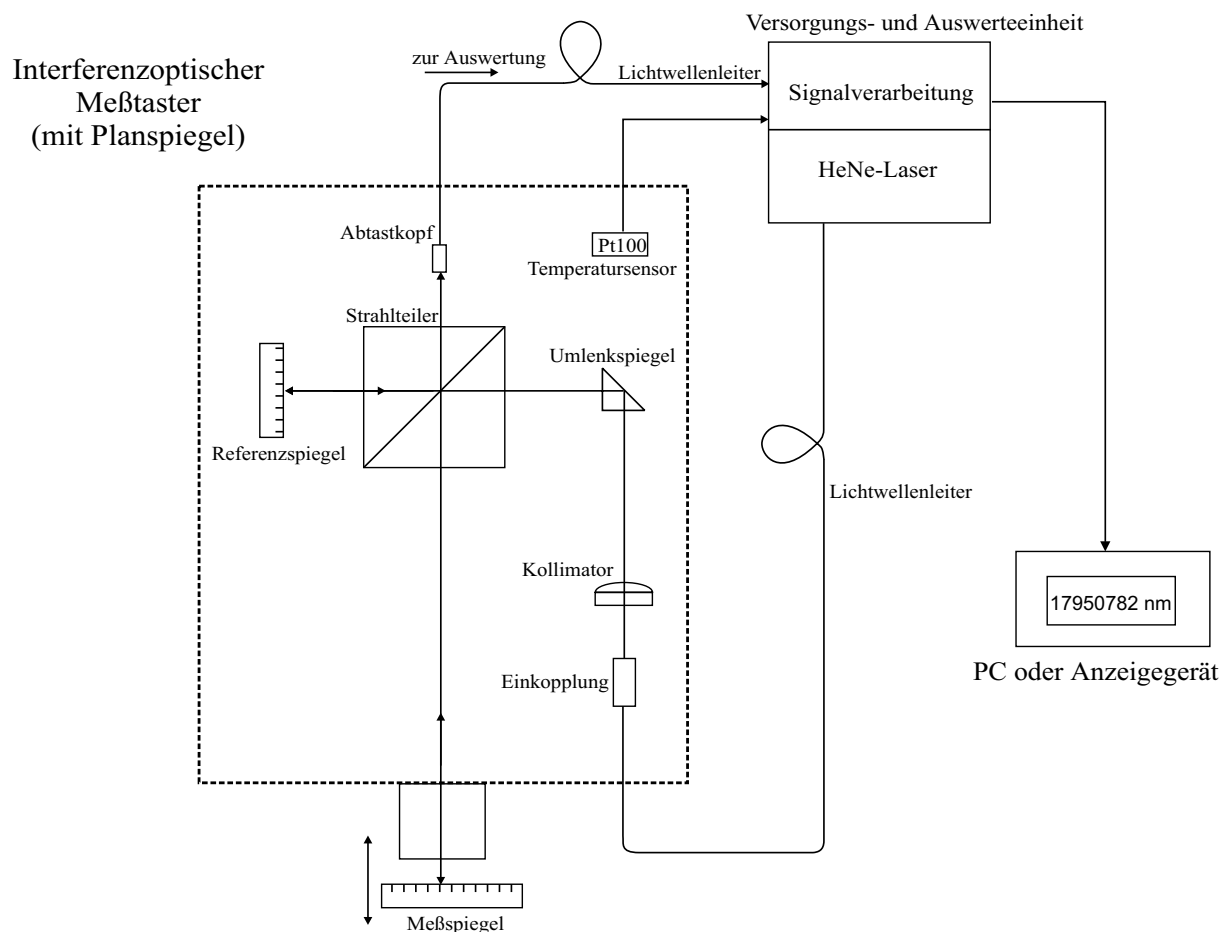


Bild 29: Optischer Messtaster

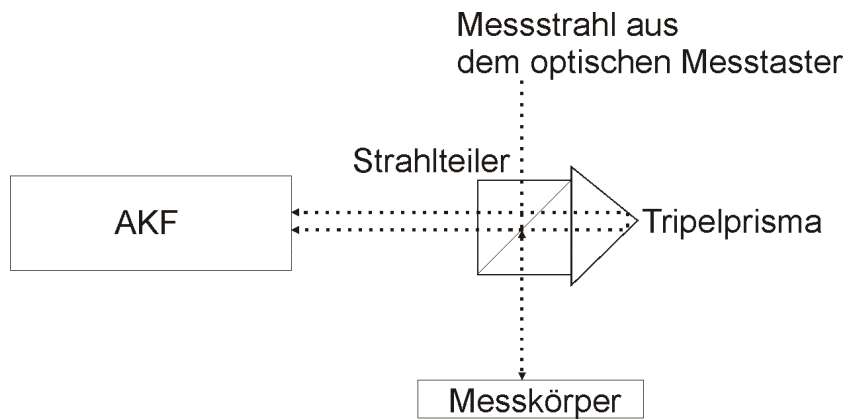


Bild 30: Justierung der Parallelität der Messstrahlen von optischem Messtaster und Interferometer des Prüfgerätes

Die drei Messverfahren nach VDI/VDE 2617 werden auch für Vergleichsmessungen zwischen dem optischen Messtaster und dem Prüfgerät verwendet. Im Unterschied zum taktilen Messtaster wurde das Messprogramm teilweise geändert, weil die Steuerung des Messbolzens des taktilen Messtasters nicht benötigt wird, wodurch die Messzeit reduziert werden kann. Ansonst sind die Messabläufe prinzipiell ähnlich.

6.3 Voraussetzungen zur Ermittlung der Messgenauigkeit des Präzisionsprüfgerätes

Zur Ermittlung der messtechnischen Eigenschaften des Prüfgerätes werden zuerst Stabilität und Wiederholbarkeit untersucht. Anschließend wird eine Vergleichsmessung durchgeführt. Dabei soll ermittelt werden, ob das Prüfgerät in der Lage ist, die Anforderungen an die Positionierung bei der bidirektionalen Verschiebung des Messtisches zu erfüllen. Gleichzeitig wird mit dem Winkelsensor die konkrete Verkippung gemessen (siehe 4.2.1.2). Mit einsetzfähiger Längen- und Winkelmessung kann die Messgenauigkeit des Prüfgerätes ermittelt werden.

Weil der interferenzoptische Messtaster als Referenzstandard zur Vergleichsmessung mit dem Prüfgerät dient, soll dieser zunächst eingehend untersucht werden. Hierbei sind insbesondere die Stabilität und Wiederholbarkeit des Messtasters von Bedeutung. Damit ist zu erkennen, ob der Messtaster die Voraussetzung zur Vergleichsmessung erfüllt.

Es wird die Stabilität des Messtasters, des Winkelsensors und –reglers, des Prüfgerätes und schließlich des Gesamtsystems (Messtaster und Prüfgerät) und ermittelt. Danach wird die Wiederholbarkeit des Messtasters, des Gesamtsystems und des Winkelreglers untersucht. Zum Schluss wird die Vergleichsmessung durchgeführt und die Wirkung der Temperaturänderung auf die Vergleichsmessung erläutert.

6.4 Untersuchung der Stabilität

Unter Stabilität soll verstanden werden, wie sich die Anzeige eines Messgerätes ändert, wenn das Gerät stationär und dauerhaft auf einem Messpunkt steht. Es kann kurzzeitig oder langfristig beobachtet werden und dadurch eine kurzzeitige oder langzeitige Stabilität ermittelt werden.

Hier wird die langzeitige Stabilität bestimmt. Diese Untersuchung bezieht sich sowohl auf den Messtaster, das Prüfgerät als auch auf das Gesamtsystem (Messtaster mit Prüfgerät).

Es handelt sich dabei um statische Messungen, die über einen längeren Zeitraum betrieben wurden, damit die Stabilität sicher bestimmt werden kann. Um den Einfluss der Umweltbedingungen, insbesondere einer großen Temperaturdrift, zu reduzieren, wird die Messvorrichtung mit Styropor isoliert. Durch diese passive Klimatisierung bleiben die Temperaturschwankungen innerhalb der Anordnung kleiner als 0,1 K/Stunde. Damit werden

Störungen durch Umweltbedingungen minimiert. Trotz der reduzierten Temperaturdrift wirkt die kleine Temperaturänderung eine zeitlich abhängige Längendrift aus, die beispielweise bei einer Untersuchung des Messtasters aus einer Temperaturänderung von 0,2 K eine Längendrift von ca. 70 nm verursacht (Diagramm 14-a1). Um den Einfluss der Temperaturdrift auf die Längenmessung vollkommen auszuschließen, wird bei der weiteren Analyse die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Längenmesswerten benutzt [6-3]. Hierdurch werden nur die Änderung aufeinanderfolgender Messwerte registriert. Diese Differenz soll im weiteren die Stabilität der Längenmesssysteme unter Eliminierung des Temperatureinflusses beschreiben.

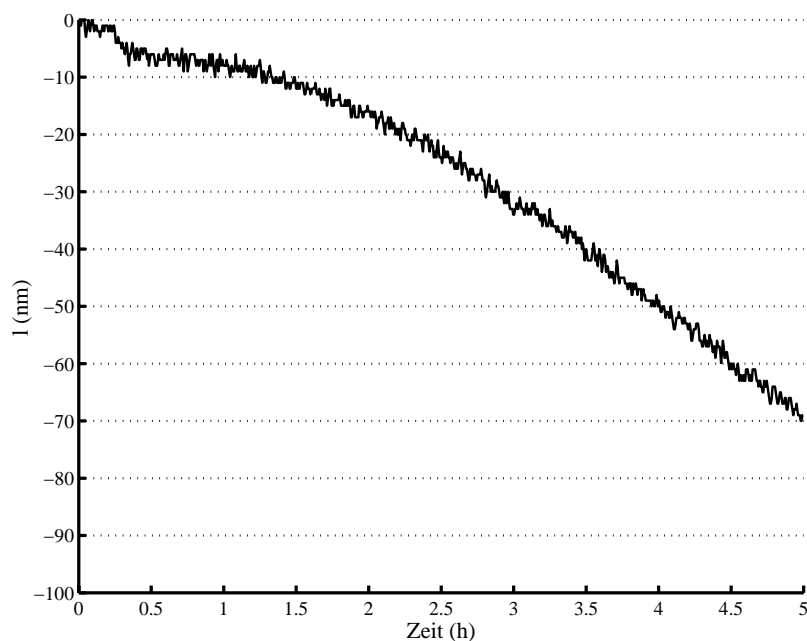


Diagramm 14-a1: Zeitliche Längendrift des Messtasters infolge der Temperaturänderung von 0,2 K.

6.4.1 Stabilität des Messtasters

Der Messtaster wird in einem Portalbau (Bild 28-3) untersucht. Die Stabilitätsuntersuchung des Messtasters dauert ca. fünf Stunden. In dieser Zeit wurde das Endmaß dauerhaft von dem Messbolzen angetastet. Die maximale temperaturkompensierte Längenänderung beträgt hier ± 2 nm (Diagramm 14-a2). Nach der statistischen Analyse ergibt sich eine Unsicherheit von 0,06 nm ($k=2$). Mit der geringen Abweichung von 0,06 nm wird gezeigt, dass die Stabilität des Messtasters der Voraussetzung der Vergleichsmessung entspricht.

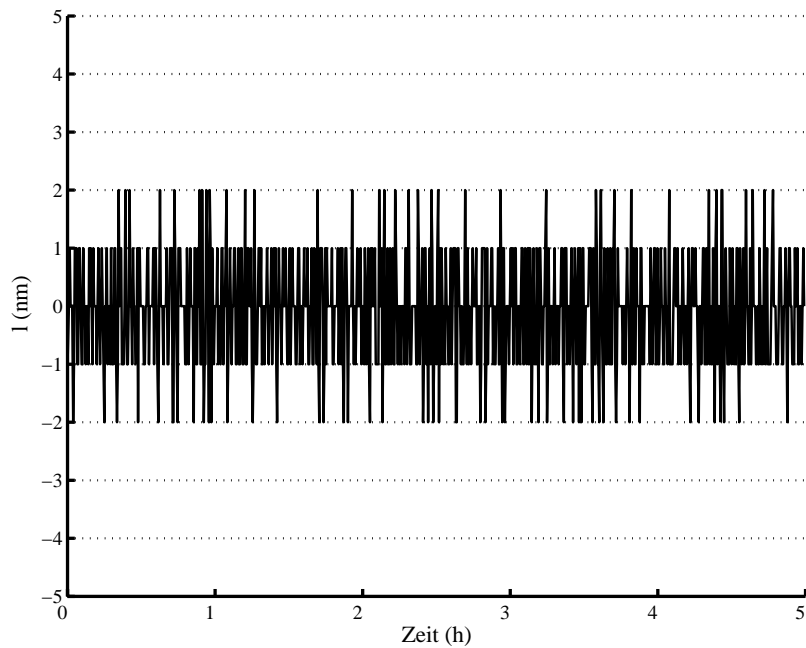


Diagramm 14-a2: Differenz aufeinanderfolgender Längenwerte des Messtasters

6.4.2 Stabilität des Präzisionsprüfgerätes

Die Stabilität des Prüfgerätes wird ermittelt, indem ebenfalls über einen längeren Zeitabstand (fünf Stunden) der Längenwert des Interferometers im Prüfgerät aufgezeichnet wird (Diagramm 14b).

Nach der Analyse beträgt die Unsicherheit ebenfalls 0,06 nm ($k=2$). Die Messwerte liegen bei ± 3 nm, die etwas größer als die Messwertverteilung des Messtasters ist, weil im Vergleich mit dem Messtaster die Konstruktion des Prüfgerätes viel komplizierter und der vertikale Abstand des Prüfgerätes länger ist. Insgesamt kann damit eine gute Stabilität des Prüfgerätes nachgewiesen werden.

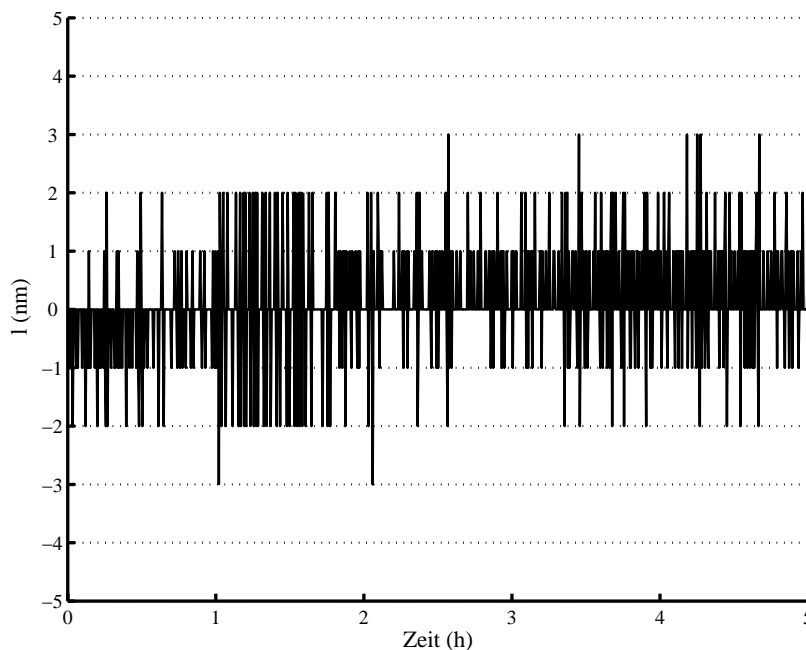


Diagramm 14b: Differenz aufeinanderfolgender Längenwerte des Prüfgerätes

6.4.3 Stabilität des Gesamtsystems (Messtaster und Präzisionsprüfgerät)

Nach den Untersuchungen der Stabilität des Messtasters und des Prüfgerätes, bleibt nur noch offen, ob auch im Zusammenspiel die Stabilität des Gesamtsystems die benötigte Stabilität erreicht. Zu dieser Messung wird der Messtaster in das Prüfgerät eingesetzt und die Längenwerte des Messtasters, des Prüfgerätes und die Differenz zwischen den beiden über eine Dauer von fünf Stunden aufgezeichnet. Diagramm 14c stellt wiederum die Differenz von zwei aufeinanderfolgenden Längenwerten des Gesamtsystems dar. Die Messwerte des Gesamtsystems liegen bei ± 2 nm. Die Unsicherheit ist 0,04 ($k=2$). Diese Abweichung der Stabilität ist mit der Forderung der Überprüfung im Nanometerbereich in Übereinstimmung.

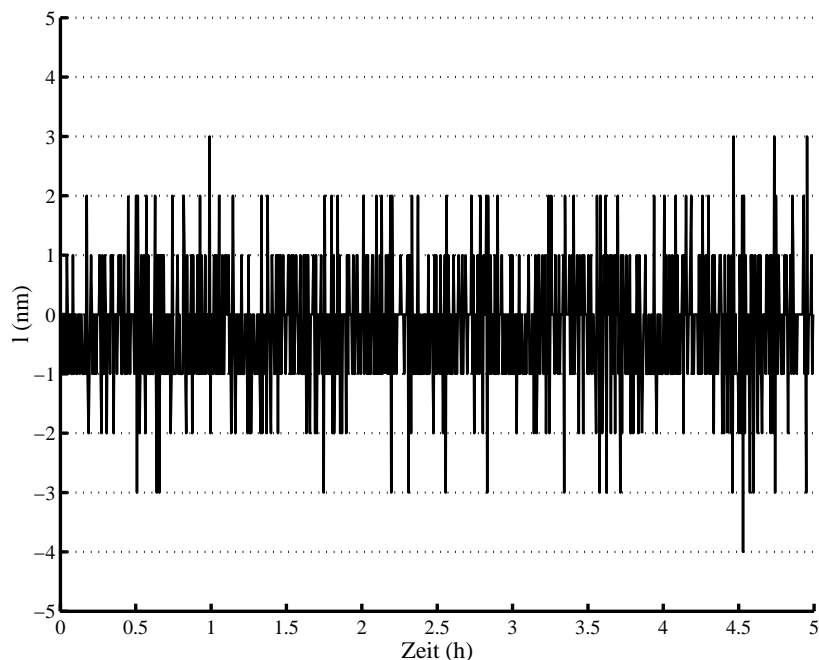


Diagramm 14c: Differenz aufeinanderfolgender Längenwerte des Gesamtsystems

6.4.4 Stabilität des Winkelsensors

Der Winkelsensor dient zur Messung der Verkippung und liefert Daten an den Winkelregler. Aus diesem Grund ist seine Stabilität näher zu untersuchen, um mögliche Einflüsse auf die Messung zu erkennen.

Die Untersuchung erfolgt mit Hilfe eines externen Tripelprismas, das auf die Zwischenplatte 1 gegenüber dem Winkelsensor gelegt wird. Theoretisch darf dabei keine Winkeländerung auftreten, da das Tripelprisma das Licht des Winkelsensors in sich zurückreflektiert. Damit kann erkannt werden, ob der Winkelsensor sowohl mechanisch als auch fotoelektrisch stabil arbeitet. Der Einfluss der Temperaturdrift kann wie zuvor mit der Differenzbildung aufeinanderfolgender Messwerte bei der Analyse eliminiert werden.

Im oberen Teil von Diagrammen 15 sind die Winkelwerte α und β jeweils in x- und y-Richtung dargestellt. Während der Messung (Messzeit: fünf Stunden) treten eine Temperaturänderung von $\pm 0,06$ K und eine Winkeländerung von ca. $\pm 0,2''$ in x- und y-Richtung auf. Das entspricht eine zeitliche Winkeländerung von $0,08''$ pro Stunde. Weil der Überprüfvorgang ca. 20 Minuten dauert, wird mit einer geringen Winkeländerung von $< 0,03''$ zu rechnen sein.

In unteren Teil von Diagramm 15 wird jeweils die Differenz zwei aufeinanderfolgender Winkelwerte abgeleitet. Dabei wird deutlich, dass Abweichungen auftreten, die kleiner als $\pm 0,1''$ (Unsicherheit: $0,002''$) sind, wenn der Einfluss der Temperatur ausgeschlossen wird. Kommt es dagegen zu einer Temperaturänderung, hat dies eine entsprechende

Winkeländerung zur Folge. Die Abweichung des Winkels durch die Temperaturänderung kann damit mit ca. 3" pro Kelvin angegeben werden.

Da die Überprüfung innerhalb einer halben Stunde abgeschlossen ist und die durchschnittliche Temperaturänderung innerhalb dieses Zeitraumes in der Regel kleiner als 0,05 Kelvin gehalten werden kann, ist der von der Temperaturänderung verursachte Fehler sehr gering (< 0,15").

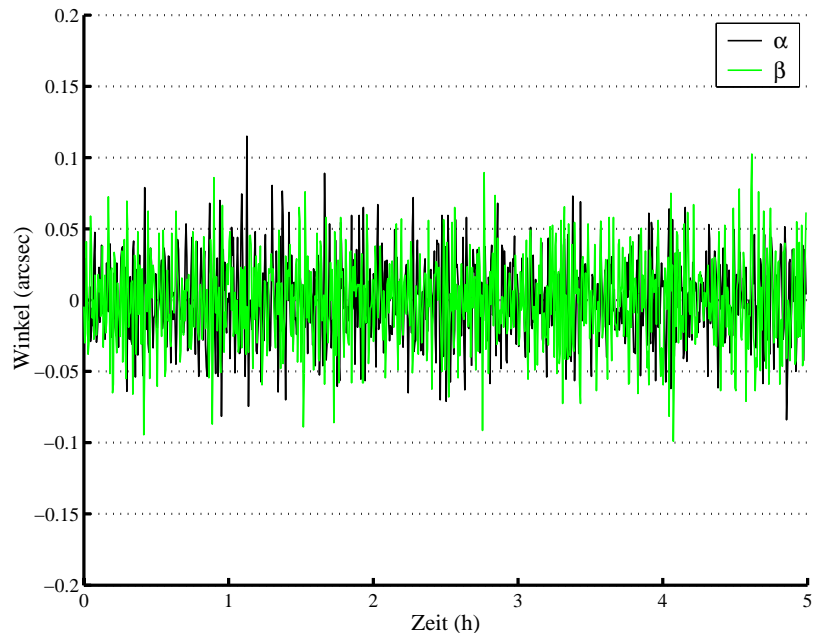
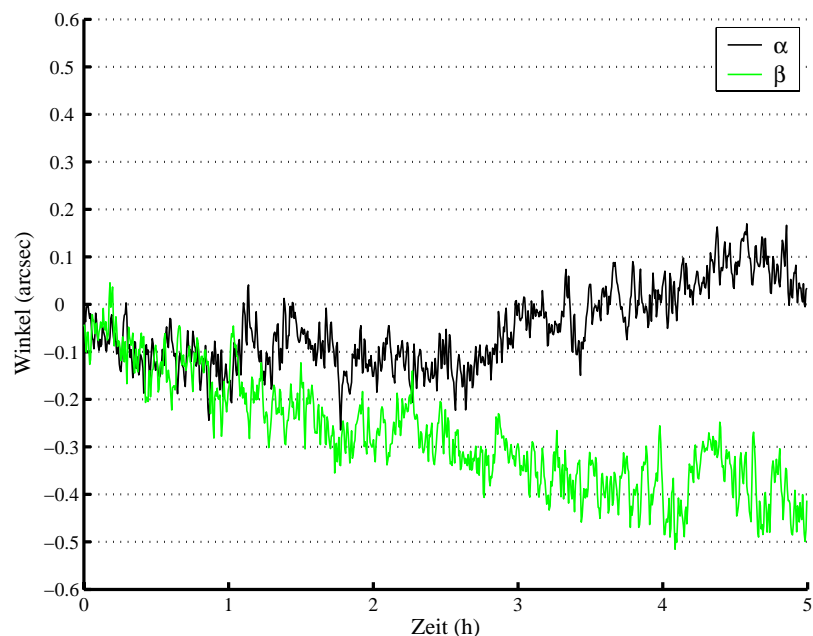


Diagramm 15: oben: Winkelwerte in x- und y-Richtung,
unten: Differenz aufeinanderfolgender Winkelwerte

6.4.5 Stabilität der Winkelregelung

Mit Hilfe der Winkelregelung wird die Verkippung auf den Sollwert Null geregelt, um den Abbe-Fehler zu eliminieren. Es ist deswegen notwendig, auch die Stabilität der Winkelregelung zu ermitteln.

Für die statistischen Betrachtungen werden wiederum die Winkelwerte α und β jeweils in x- und y-Richtung über einen längeren Zeitraum von fünf Stunden gemessen. Dabei wird die Winkelregelung ständig betrieben und die Winkelwerte werden aufgezeichnet.

Die Ergebnisse sind in Diagramm 16 dargestellt. Die Messwerte liegen bei $\pm 0,15''$. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit von $0,002''$ ($k=2$) in der x- und y-Richtung. Da die Abweichungen der Winkelregelung sehr gering sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Winkelregler eine gute Stabilität aufweisen und durch die Winkelregelung keine zusätzlichen Fehler während der Überprüfung auftreten werden.

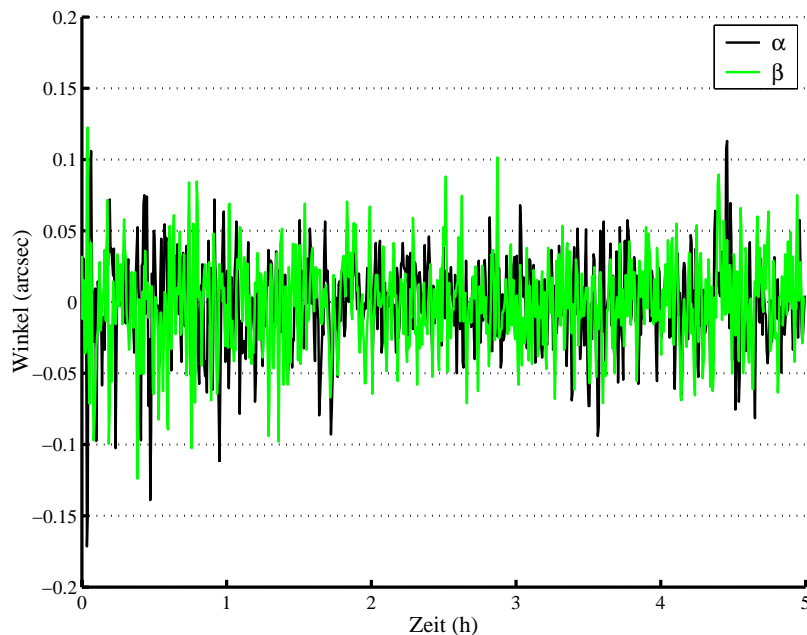


Diagramm 16: Winkelwerte bei der Langzeit-Winkelregelung

6.5 Untersuchung der Wiederholbarkeit

Unter der Wiederholbarkeit soll verstanden werden, wie sich die Anzeige eines Messgerätes ändert, wenn nacheinander wiederholt ein und derselbe Messwert angefahren wird. Im Gegensatz zur Stabilität wird also der Messbolzen des Messtasters mechanisch (motorisch) um einen bestimmten Betrag verschoben und anschließend wieder in die Ausgangslage zurückgefahren.

Zu Beginn wird die Wiederholbarkeit für den Messtaster wiederum im Messportal ermittelt. Danach wird der Messtaster in das Prüfgerät eingesetzt und auch eine wiederholte Antastung auf dem Messkörper ausgeführt. Daraus ergibt sich eine Längendifferenz zwischen Messtaster und Interferometer des Prüfgerätes. Außer dieser statischen Wiederholbarkeit ist eine Ermittlung der dynamischen Wiederholbarkeit durchzuführen, indem Messtaster und Prüfgerät vom Startpunkt zum Endpunkt wiederholt auf- und abwärts bewegt und eine Differenzbildung bei Start- und Endpunkt durchgeführt wird.

Da sich auch die Winkelregelung während des gesamten Überprüfungsprozesses in Betrieb befinden wird, ist auch deren Wiederholbarkeit zu untersuchen.

Um Einflüsse der Temperatur ausschließen zu können, wird wiederum jeweils nur die Differenz aufeinanderfolgender Messwerte in Betracht gezogen.

6.5.1 Statische Wiederholbarkeit

Die Ermittlung der Wiederholbarkeit des Messtasters erfolgt durch Auf- und Abwärtsbewegen des Messbolzens mit einhundertfacher Wiederholung über eine Messdauer von ca. 20 Minuten, weil ein Überprüfungsvorgang etwa diese Wiederholungszahlen und

diesen Zeitraum in Anspruch nimmt. Zuerst wird mit dem Messtaster im Messportal ein auf dem Messtisch befindliches Endmaß angetastet. Dabei wird der Längenwert des Messtasters zur Analyse aufgenommen.

Durch die Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass bei der Messung maximale Abweichung von etwa ± 4 nm auftreten, die in Diagramm 17 schematisch dargestellt werden. Die Messunsicherheit beträgt hierbei ca. 1,1 nm ($k=2$). Im Vergleich zur Stabilitätsmessung ist hier sowohl die Unsicherheit als auch die Messwertverteilung größer geworden.

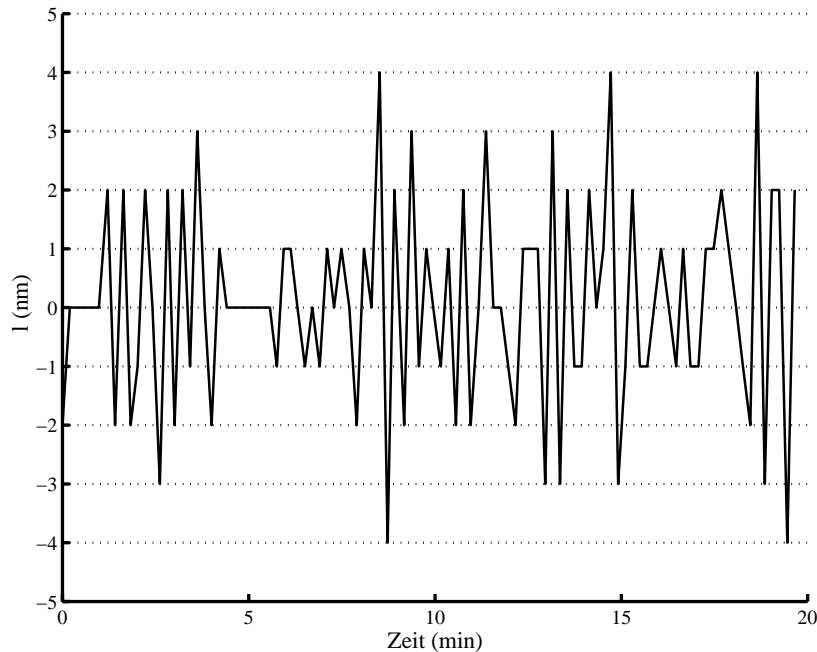


Diagramm 17: Untersuchung der Wiederholbarkeit des Messtasters im Portal

Zur Ermittlung der statischen Wiederholbarkeit des Messtasters im Prüfgerät wurde der obere Messablauf statt im Messportal im Prüfgerät durchgeführt. Dazu wurde der Messtaster im Prüfgerät eingesetzt und die Messung der Wiederholbarkeit des Messtasters gestartet. Das Untersuchungsergebnis ist im Diagramm 18 dargestellt.

Die maximale Abweichung der Messwerte liegt bei ± 4 nm und aus der Analyse ergibt sich eine Unsicherheit von 1,0 nm ($k=2$). Das Verhalten gegenüber dem im Messportal hat sich nicht geändert. Dadurch kann bestätigt werden, dass das Prüfgerät eine gute Steifigkeit aufweist. Mit den Untersuchungen ist zu erkennen, dass das Prüfgerät die Wiederholbarkeit des Messtasters nicht beeinträchtigt.

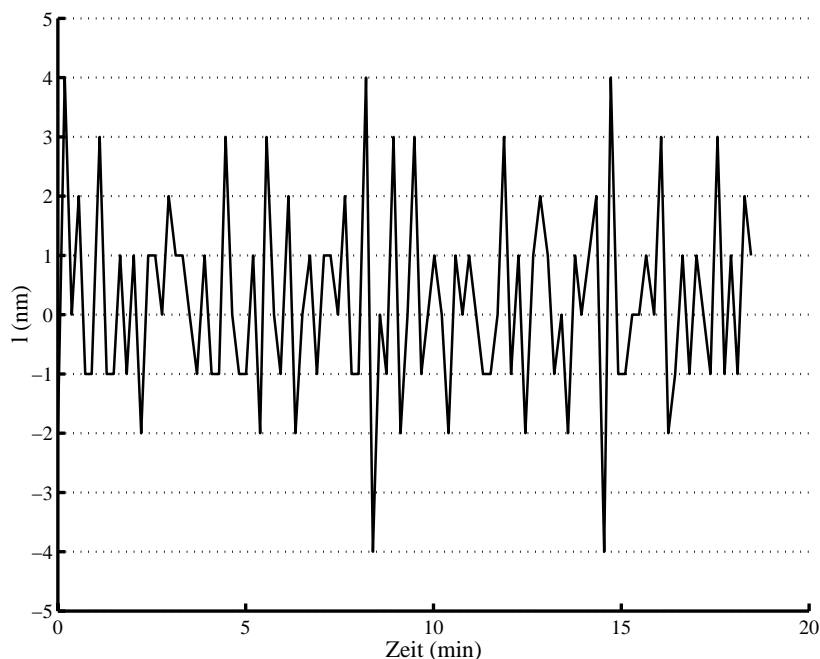


Diagramm 18: Untersuchung der Wiederholbarkeit des Messtasters im Prüfgerät

6.5.2 Wiederholbarkeit an zwei Punkten

Weil der Messablauf bzw. die Messfahrt immer eine Unterschiedsmessung zwischen zwei Punkten ist, wurde im weiteren die Wiederholbarkeit des Gesamtsystems nacheinander an zwei Punkten innerhalb des Prüfbereiches untersucht. Dabei wurde der Messtaster im Prüfgerät eingesetzt und die Messung mehrere Male zwischen Start- und Endmesspunkt (d.h. zwischen 0 mm und 18 mm) wiederholt. Die Längenwerte vom Start- und Endmesspunkt werden jeweils aufgenommen und zur Analyse verwendet. Die absolute Abweichung ist zunächst nicht von Interesse.

Es zeigte sich, dass die Wiederholbarkeit der Einzelmessungen wiederum zwischen ± 4 nm (Diagramm 19-1) mit einer Unsicherheit von 1,3 nm. Die Wiederholbarkeit der Differenz zwischen Messbereichsanfang und -ende liegt ebenfalls bei ± 4 nm (Diagramm 19-2). Die Unsicherheit beträgt dabei ca. 1,5 nm.

Es ist zu sehen, dass sich die Wiederholbarkeit durch die Abtastung an zwei Messpositionen verschlechtert. Man muss davon ausgehen, dass die Prüfung verschiedener Messposition mit der hier ermittelten Messunsicherheit von $\pm 1,5$ nm behaftet ist.

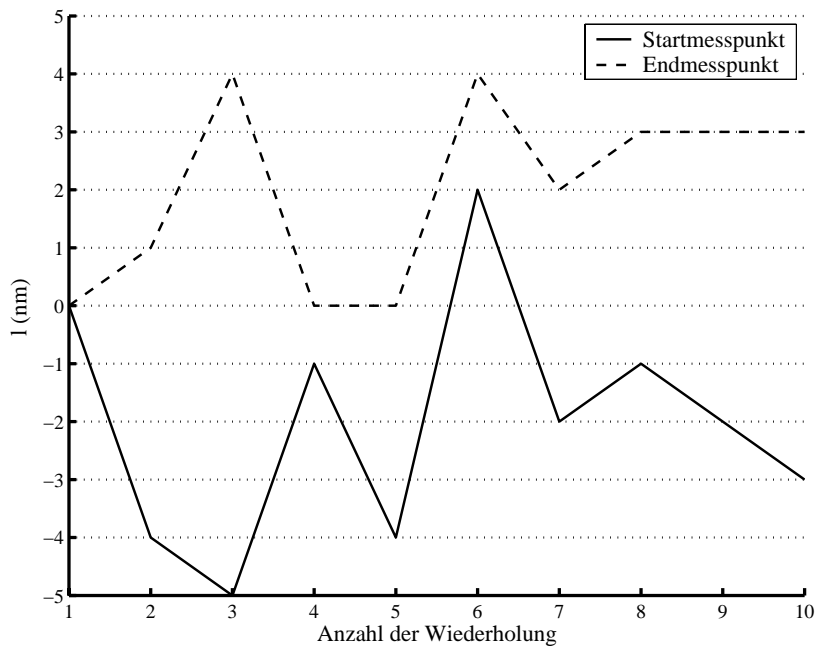


Diagramm 19-1: Wiederholbarkeit an zwei Messpunkten

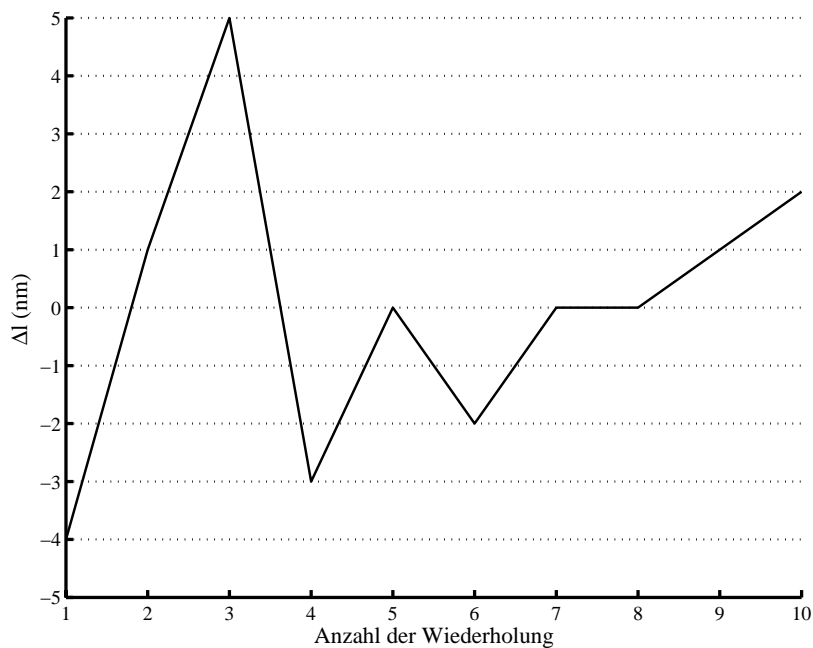


Diagramm 19: Wiederholbarkeit der Differenz zwischen den beiden Messpunkten, in bezug auf dem Mittelwert der absoluten Abweichung von 23 nm

6.5.3 Wiederholbarkeit des Winkelreglers

Um die Wiederholbarkeit des Winkelreglers zu ermitteln, werden wiederholte Messreihen, jeweils durch Auf- und Abwärtskippen des Messkörpers, durchgeführt, wobei dieser jeweils auf bestimmte Winkel (hier 10") innerhalb der Intervalle geregelt wird. Diese Einstellungen, die zehn mal wiederholt werden und ca. 20 Minuten dauern, werden jeweils durch ein externes elektronisches AKF überwacht. Durch den Vergleich der Winkelwerte von AKF und Winkelsensor wurde die Differenz zwischen Winkelwert des AKF und des Winkelsensors abgeleitet. Das Untersuchungsergebnis zeigt, dass der Winkelregler eine Wiederholbarkeit von ca. $\pm 0,4''$ aufweist (Diagramm 20). Dabei beträgt die Unsicherheit ca. $0,06''$ ($k=2$). Ein

entsprechender Abbe-Fehler bei einem angenommenen Versatz von $100\ \mu\text{m}$ liegt bei $0,03\ \text{nm}$. Dadurch konnte gezeigt werden, dass der Winkelregler die Anforderung zur Eliminierung der Verkippung erfüllt.

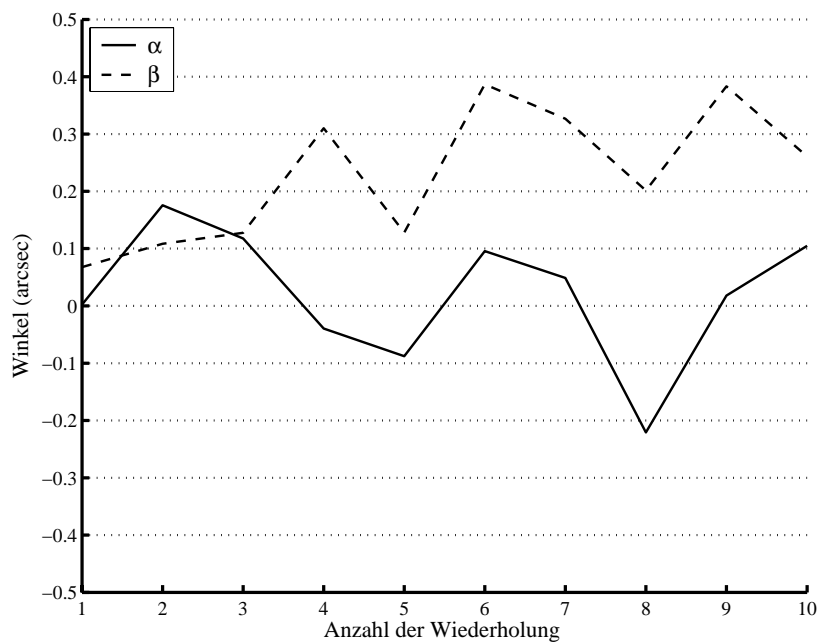
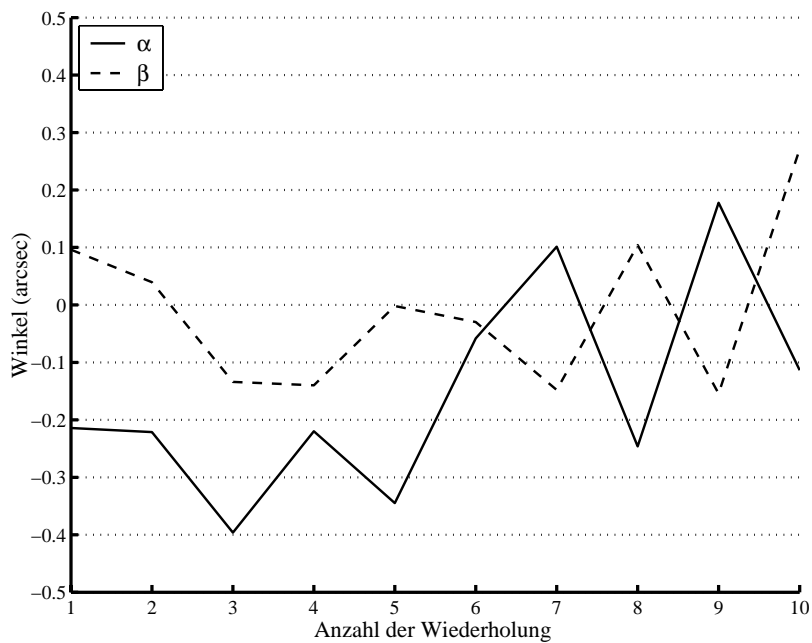


Diagramm 20: Wiederholbarkeit der Winkelregelung, oben: in der x-Richtung; unten: in der y-Richtung

6.6 Durchführung der Messabläufe

6.6.1 Messergebnisse der Vergleichsmessung

Nach den Justierungen und den Überprüfungen der Eigenschaften des Messsystems kann bestätigt werden, dass sowohl der Messtaster als auch das Prüfgerät die Voraussetzungen aufweist, die für die Anwendung einer Vergleichsmessung als notwendig erachtet werden.

In verschiedenen Ländern oder Regionen werden unterschiedliche Messabläufe zur Längenprüfung eingesetzt. Einige nationale Standards wurden vom amerikanischen NMTBA, dem deutschen VDI/VDE und dem britischen MTTA erstellt. Sie sind ähnlich, aber unterschiedlich bezüglich der Zahl der Wiederholungen an jedem Messpunkt. In den USA und Großbritannien wird das Linearverfahren verwendet. Auf dem europäischen Festland wird das Quasi-Pilgerschrittverfahren verwendet /6-4/.

Nach VDI/VDE 2617 soll die Messung mindestens bei elf Messpunkten und mit fünf Wiederholungen ausgeführt werden. Nach /6-5/ soll der Messbolzen über die Messspanne hinaus einen Freihub von mindestens 1 mm haben. Hier wird deswegen im Messbereich von 20 mm eine Messspanne von 18 mm und ein Messintervall vom 1,5 mm mit fünf Wiederholungen im Messprogramm eingestellt.

In beiden Bewegungsrichtungen (d.h. Auf- und Abwärtsbewegung) erfolgen an jedem Messpunkt fünf Messungen. Die Messwerte werden während der Überprüfung gespeichert und später für die Analyse zur Verfügung gestellt.

Nunmehr kann ein konkreter Messablauf mit dem Messprogramm durchgeführt werden.

Der taktile und optische Messtaster werden dabei mit dem Prüfgerät unter Durchführung der drei Messabläufe verglichen.

In Diagramm 21-1 und 21-2 werden die Ergebnisse dieses Vorgangs dargestellt. Es ist eine systematische Abweichung von 20-25 nm im Messbereich von 18 mm erkennbar, die zuvor bei der Untersuchung der Wiederholbarkeit an zwei Punkten bereits festgestellt worden war. Nach wiederholten Messungen mit dem taktilen und optischen Messtaster wird bestätigt, dass diese allein vom Prüfgerät herrührt und die Ursache nicht auf den Messtaster zurückgeführt werden kann. Offensichtlich ist dieser Fehler aus einer mechanischen Deformation innerhalb des Prüfgerätes hervorgerufen. Um diesen Fehlereinfluss zu reduzieren, können die Messergebnisse bezüglich dieser Deformation kompensiert werden. Die Korrektur der Messergebnisse wird im folgenden Abschnitt dargestellt und weiter erläutert.

Außer der systematischen Abweichung ist bemerkenswert, dass beim Linearverfahren des taktilen Messtasters eine Hysterese von ca. 10 nm beobachtet werden kann, die in den zwei anderen Messabläufen nicht so ausgeprägt zu finden ist und auch im optischen Messtaster nicht auftritt (Diagramm 21-2). Allerdings weisen Quasi-Pilgerschritt- und Pendelschrittverfahren mit dem taktilen Messtaster beim Zurückfahren in die Ausgangsposition eine große Messabweichung auf. Man kann sich vorstellen, dass bei diesen Messabläufen die Hysterese quasi gespeichert wird und erst beim Zurückfahren auf den Nullpunkt sichtbar wird. Durch wiederholtes Anfahren des Nullpunktes kann diese aus der Hysterese verursachte Abweichung kompensiert werden und der Messwert wieder nahe auf Null zurückkehren.

Beim Linearverfahren bewegt sich der Messkörper von Punkt zu Punkt durch den gesamten Messbereich. Beim Quasi-Pilgerschrittverfahren werden die entsprechenden Messungen dagegen in jedem Messintervall wiederholt. Dadurch ist die Hysterese offenbar kleiner geworden (ca. 2-3 nm). Die Hysterese ist beim Pendelschrittverfahren kaum sichtbar, da bei der Messung die wiederholte Bewegung des Messbolzens nur innerhalb eines kleinen Bereiches (ca. 0,5 mm) liegt.

Weil die größere Diskrepanz im Auftreten der Hysterese speziell im Linearverfahren auffällig ist, kann die Ursache bei den Bewegungen während dieses Messvorgangs gesucht werden. Eine detaillierte Untersuchung in verschiedenen Messbereichen wird anschließend durchgeführt, um die mögliche Ursache zu erklären.

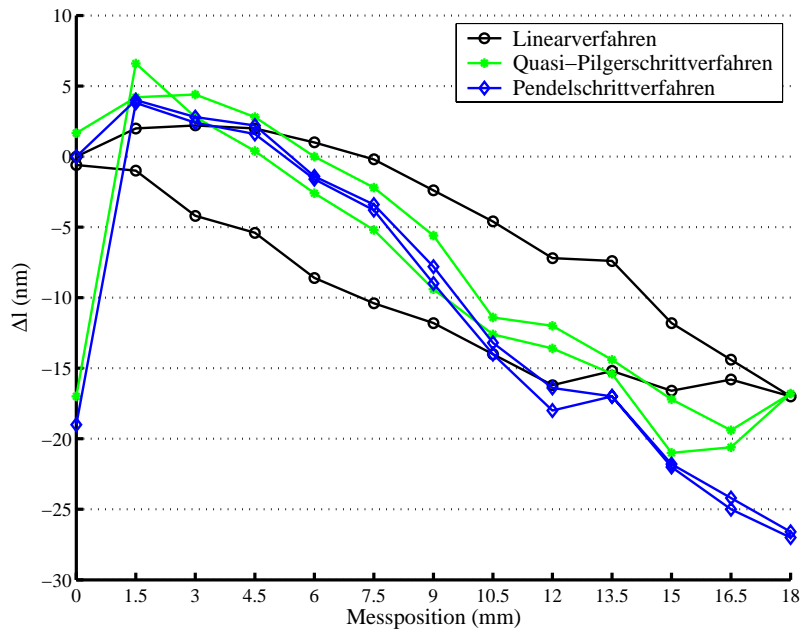


Diagramm 21-1: Vergleichsmessungen zwischen taktilen Messtaster und Prüfgerät

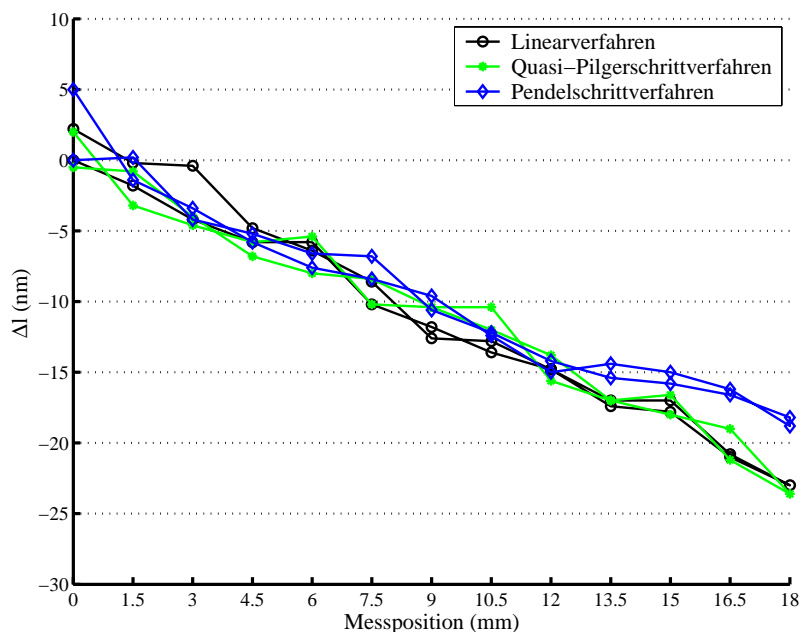


Diagramm 21-2: Vergleichsmessungen zwischen optischem Messtaster und Prüfgerät

6.6.2 Rechnerische Korrektur der Lageänderung

Mit der ermittelten Deformation können die Messergebnisse der Vergleichsmessungen zwischen Messtastern und dem Prüfgerät korrigiert werden. Durch diese Korrektur wird die systematische Messabweichung erheblich reduziert (Diagramm 22-1 und 22-2). Die Messunsicherheit der Vergleichsmessungen beträgt ca. ± 5 nm im Messbereich von 18 mm. Diese Unsicherheit enthält die Unsicherheit des Prüfgerätes und des Messtasters.

Nach der Korrektur bleibt die Hysterese des taktilen Messtasters beim Linearverfahren vorhanden. Die Vergleichsmessungen mit der optischen Messtaster zeigen, dass die Messwertverteilung bei ca. ± 5 nm liegt, damit die Messunsicherheit des Prüfgerätes kleiner als das sein soll und seine Messunsicherheit experimentell erwiesen werden kann.

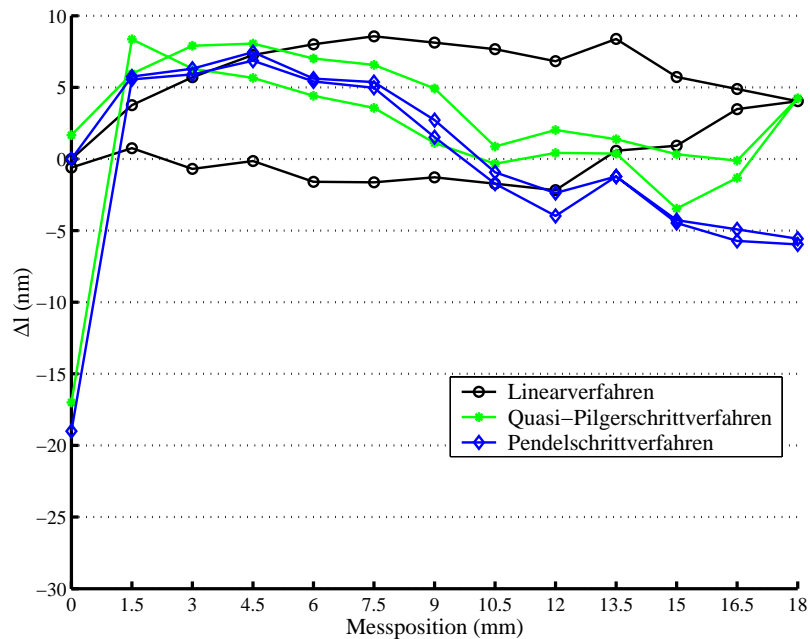


Diagramm 22-1: Drei Messabläufe mit dem mechanischen Messtaster, nach der Korrektur

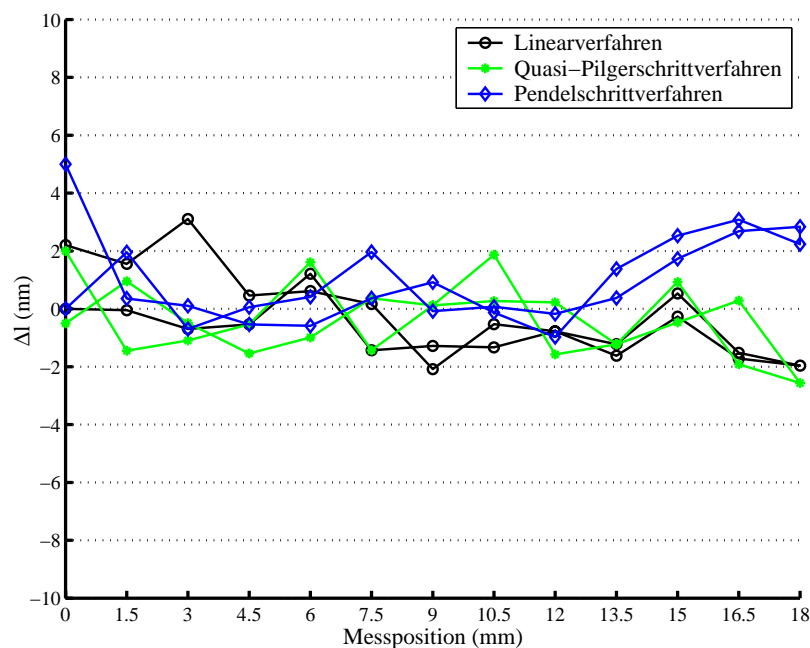


Diagramm 22-2: Drei Messabläufe mit dem optischen Messtaster, nach der Korrektur

6.6.3 Einfluss größerer Temperaturänderungen

Für die Längenmessung mit Laserinterferometern spielen die Umweltsbedingungen eine wichtige Rolle. Der Einfluss der Temperaturänderungen dominiert die Messabweichungen. Um diese Störungen einzudämmen, wird ein passiver Klimaschutz für die Überprüfung eingeführt. Dabei wird eine kleine Temperaturänderung von 0,05 K/pro Stunde erzielt, wenn die Schwankung der Temperatur im Labor klein ist, was meistens nur in der Nacht erreichbar ist.

Untersuchungen zeigen, dass nur unter oben genannter Temperatur-Bedingung genaue Messwerte zur Analyse verwendet werden sollen, weil eine größere Temperaturänderung zu

einer entsprechende Drift der Längenmessung während der Messung führen kann, wodurch die Genauigkeit der Überprüfung beeinträchtigt wird.

Als Beispiel sei hier eine Messung mit Linearverfahren gezeigt (Diagramm 23a,b). Es ist deutlich zu sehen, dass sich eine Drift periodisch bei jeder Wiederholmessung zeigt. Während die Messung fünfmal wiederholt wurde, trat eine Temperaturänderung von ca. 0,07 K auf, was zu einer Längenabweichung von insgesamt etwas 20 nm führt. Der Mittelwert aller Längenmessungen zeigt eine Drift von insgesamt 10 nm (Diagramm 23c). Wenn die Längeabweichung beim Startpunkt immer auf Null gesetzt wird (Diagramm 23c), ist die Abweichung kleiner, aber es gibt eine Drift beim Startpunkt bei der rückkehrenden Richtung. Es wird deswegen empfohlen, nur Messungen bei kleinen Temperaturänderungen (z.B. kleiner als 0,02 K) als gültig zu betrachten. Im Messprogramm ist eine solche Beurteilung implementiert. Nach dem Messablauf wird die Temperaturänderung zwischen Start und Ende berechnet und die Gültigkeit der Messung angezeigt.

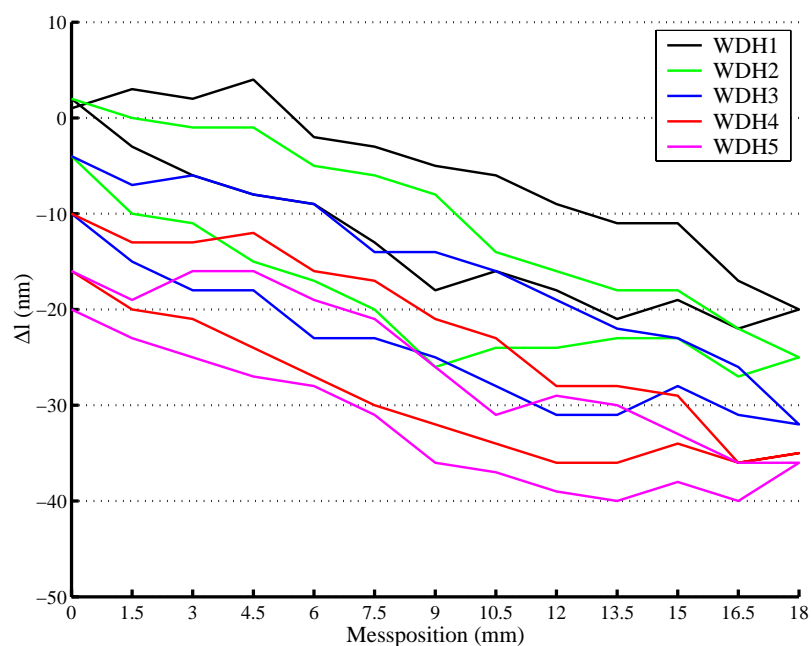


Diagramm 23a: Längenwerte mit dem Linearverfahren, bei großer Temperaturdrift von 0,07 K zwischen WDH1 und WDH5

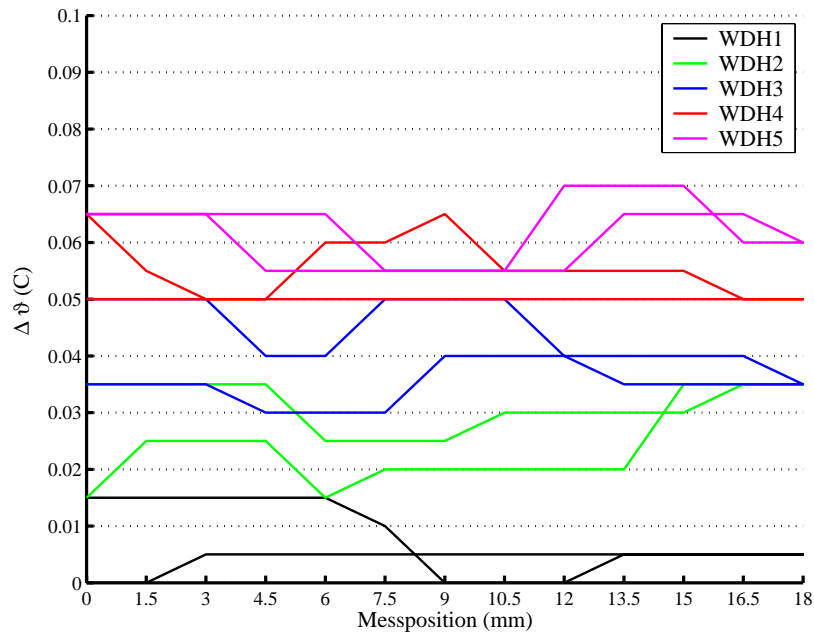


Diagramm 23b: Temperatur mit dem Linearverfahren, bei großer Temperaturdrift

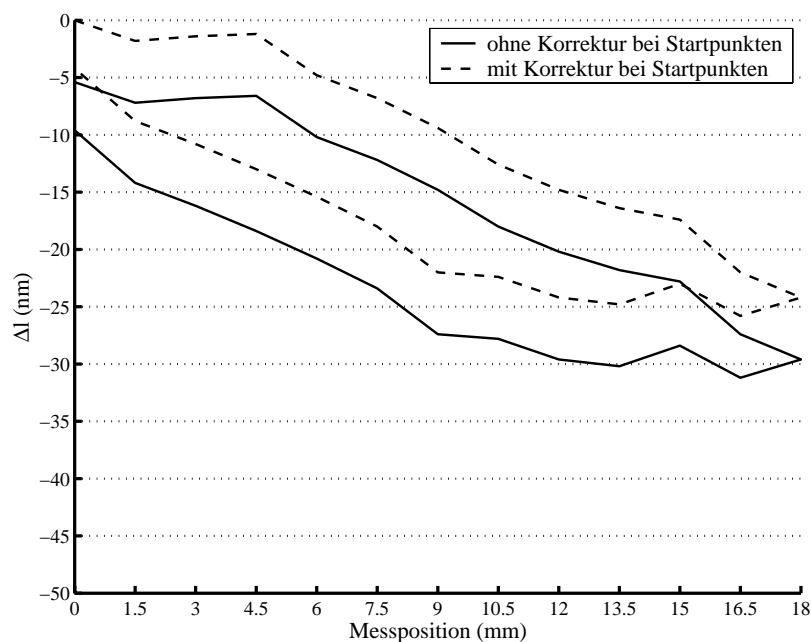


Diagramm 23c: Mittelwerte der Längenmessung mit dem Linearverfahren, bei großer Temperaturdrift

6.6.4 Hysterese des taktilen Messtasters

Die deutliche Hysterese des taktilen Messtasters beim Linearverfahren wird hier in verschiedenen Messbereichen untersucht, damit das Verhältnis zwischen Hubgröße und Entwicklung der Hysterese besser zu erkennen ist.

In Diagramm 24 ist das Messergebnis in den Messbereichen von 3, 6, 9, 12, 15 und 18 mm dargestellt. In jedem Messbereich wird die Messung wie zuvor bei Linearverfahren mit 11 Messpunkten durchgeführt, d.h. je kleiner der Messbereich ist, desto kleiner ist die Hubgröße bzw. das Messintervall. Aus der Kurven ist deutlich zu sehen, dass die Größe der Hysterese fast proportional zum Messbereich ist. Beispielweise tritt kaum Hysterese im Messbereich von 3 mm auf.

Mit dieser Untersuchung kann bestätigt werden, dass die Hysterese der Vergleichsmessung zwischen taktilem Messtaster und Prüfgerät allein vom Messtaster verursacht wird.

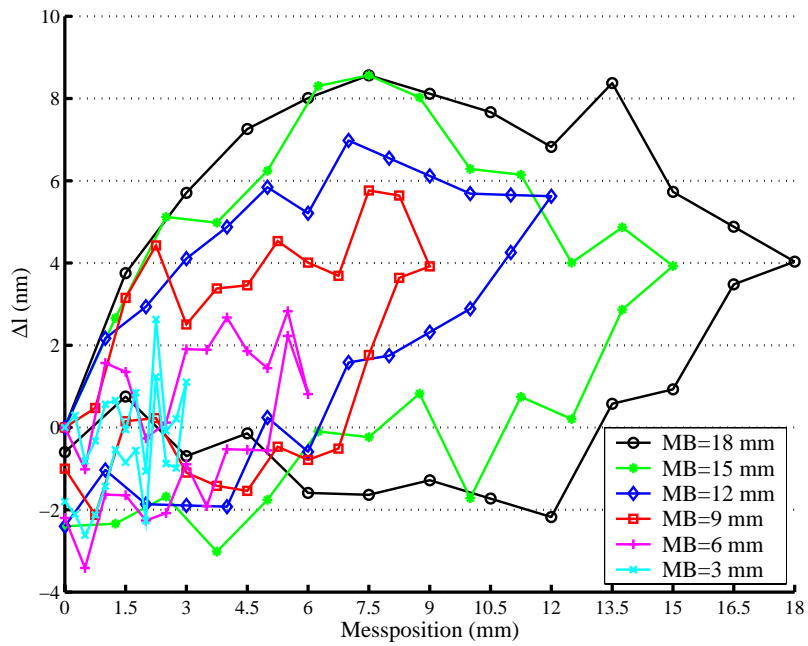


Diagramm 24: Untersuchung der Hysterese des taktilem Messtasters beim Linearverfahren

7 Eliminierung des Einflusses von Lageänderungen

7.1 Umbau des Referenzspiegels und Untersuchung der neuen Lageänderung

7.1.1 Referenzspiegel auf der Deckplatte

Um die im vorangegangenen Abschnitt 6.6.2 beschriebenen Lageänderung zu minimieren, wurde ein Umbau der Konstruktion des Prüfgerätes unternommen (Bild 31). In der neuen Konstruktion wird der Referenzspiegel nach oben auf die Deckplatte verlegt. Mit der neuen Konstruktion soll erreicht werden, dass die Lageänderung innerhalb des Prüfgerätes durch die gleichzeitige Änderung des Referenzarms kompensiert wird. Damit soll die Messgenauigkeit des Prüfgerätes durch die reduzierte Lageänderung verbessert werden.

Außerdem hat die Vergleichsmessung durch die neue Konstruktion einen kleineren thermischen Ausdehnungsfaktor als zuvor, weil die Ausdehnung der Deckplatte durch den Referenzarm kompensiert wird.

Nachteil dieser Konstruktion ist, dass die Totstrecke vergrößert wird, die nun bei 100 mm liegt. Weil allerdings der Prüfvorgang weniger als 25 Minuten dauert und während der Überprüfung eine minimale Temperaturänderung von kleiner als 0,02 K angehalten wird, sollte aus der Totstrecke eine Unsicherheit von 2 nm resultieren. Durch eine Totstrecke-Korrektur im Messprogramm wird dieser Restfehler eliminiert.

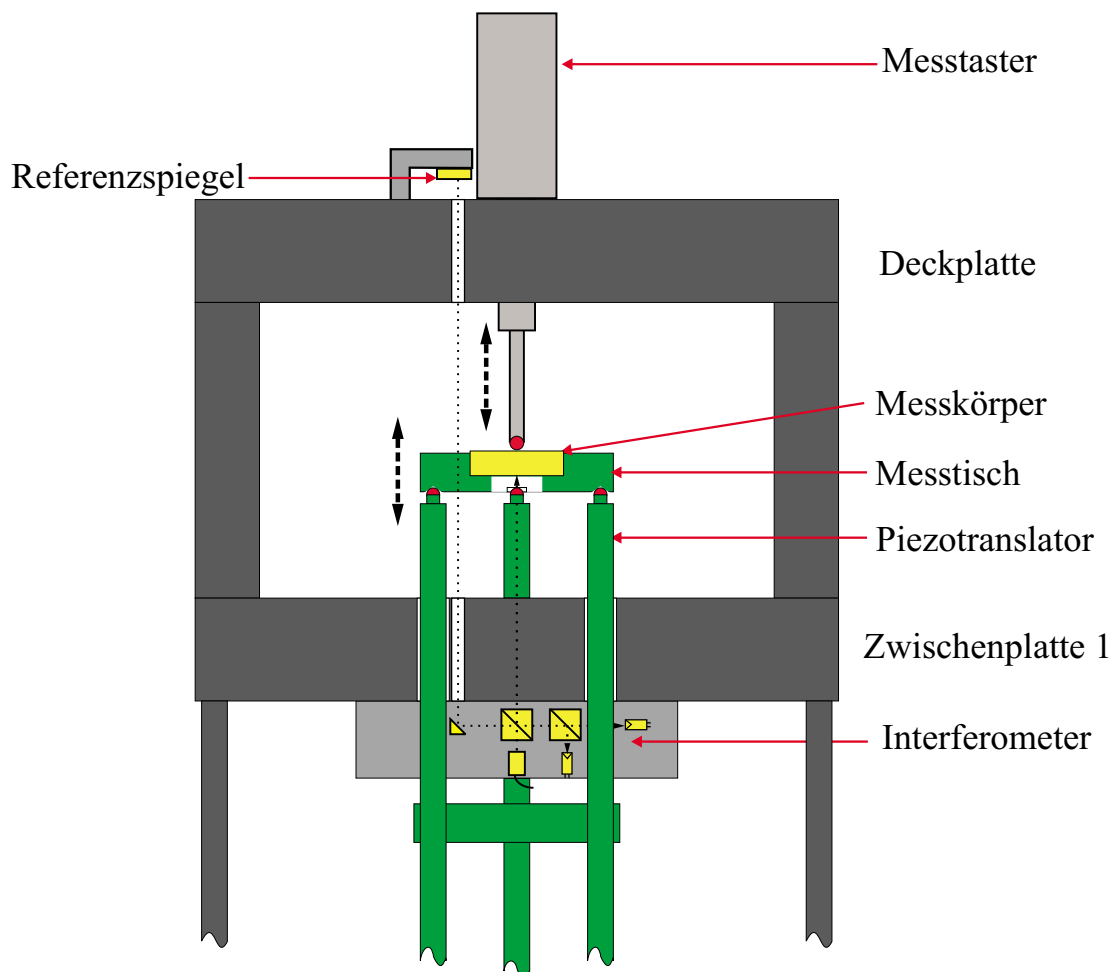


Bild 31: Konstruktion nach dem Umbau des Referenzspiegels

7.1.2 Untersuchung neuer Lageänderung

Mit der neuen Konstruktion wird wiederum zuerst die Lageänderung mit einem festen Planspiegel auf der Deckplatte (vergleiche Abschnitt 5.2.2) ermittelt. Die Untersuchung zeigt, dass die Lageänderung um etwa zwei Drittel, auf 7 nm, reduziert. Dieses Messergebnis ist in Diagramm 25 dargestellt. Die verbleibende Lageänderung ergibt sich offenbar daraus, dass der Referenzspiegel nicht am Maximum der Durchbiegung angeordnet. Dieses befindet sich offenbar in der Messachse. Mit dieser Methode kann demzufolge der Einfluss der Lageänderung zwar verkleinert, aber nicht vollständig eliminiert. Da die Lageänderung reproduzierbar ist, kann dieser Fehler im Messprogramm mit einer Kennlinie zweiter Ordnung korrigiert werden, um so die Messgenauigkeit wesentlich verbessern.

Die Ursachen der Lageänderung liegen offenbar in mechanischen Spannungen durch die Überbestimmtheit der Linearführung mit drei Wälzkörperführungen. Ohne die Konstruktion prinzipiell zu ändern, können mit einer rechnerischen Korrektur bereits sehr geringe Messunsicherheiten erreicht werden. Geht man davon aus, dass sich die mechanischen Spannungen in längeren Zeiträumen allerdings auch ändern können, wird empfohlen, die Untersuchung der Lageänderung regelmäßig durchzuführen, damit die im Messprogramm eingesetzte Kennlinie kontrolliert oder eventuell angepasst wird. Damit sollte es möglich sein, die entsprechende Lageänderung genau zu kompensieren und die Genauigkeit des Prüfgerätes zu gewährleisten.

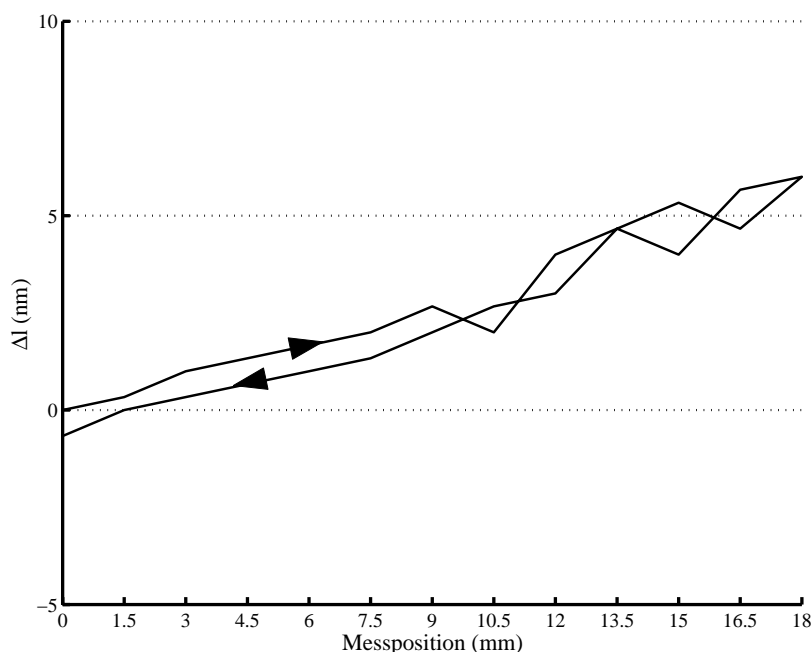


Diagramm 25: Lageänderung nach Konstruktionsänderung im Messbereich von 18 mm

7.1.3 Untersuchungen der Stabilität von neuen Konstruktion

Nach der Ermittlung der Deformation wurde die Stabilität des Prüfgerätes untersucht. Die Messergebnisse zeigen, dass die Schwankung der Messabweichungen sich auf ± 5 nm vergrößert hat und sich die Stabilität auch leicht verschlechtert hat (Diagramm 26). Dabei beträgt die Unsicherheit der Stabilität ca. 0,2 nm. Es wird davon ausgegangen, dass durch die längere Totstrecke der Einfluss von Schwankungen der Umweltbedingungen zugenommen haben. Dadurch wird die Stabilität und die Längenvergleichsmessung beeinträchtigt werden. Offenbar wirken sich die Luftschichtung negativ auf die Stabilität der Messwerte aus.

Zum Vergleich mit der vorherigen Konstruktion sind alle anderen Eigenschaften unverändert geblieben. Damit erwies sich allerdings, dass die Verlegung des Referenzspiegels sich insgesamt nicht als vorteilhaft erwies.

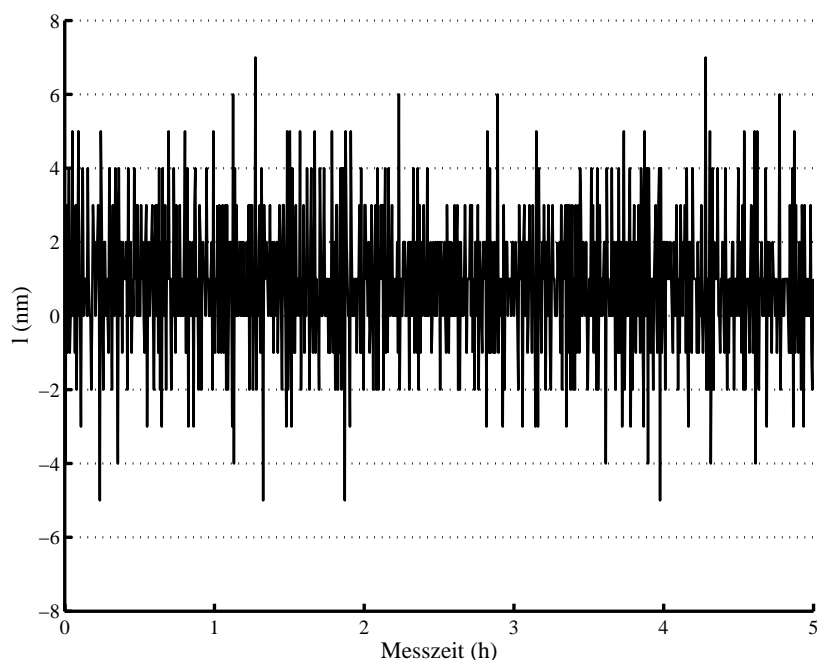


Diagramm 26: Vergleich der Stabilität vor und nach dem Umbau des Referenzspiegels.

7.2 Lageänderungsuntersuchung

7.2.1 Einfluss der Spannkraft der Kugelführungen auf die Lageänderung

Die Lageänderung ist offensichtlich von der mechanischen Deformation abhängig. Um den Einfluss der Deformation nähern zu ermitteln, wird versucht, durch die Änderung der Spannkraft der Führungswellen die Größe der Lageänderung zu beeinflussen. Bei dieser Untersuchung wird die Spannkraft der Führungswellen mit einem Momentenschlüssel eingestellt, um die Wirkung verschiedener Spannkraften zu ermitteln. Durch die experimentellen Untersuchungen wird bestätigt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Spannkraft und der Lageänderung gibt. Es zeigt sich, dass mit größerer Spannkraft die Lageänderung zunimmt. Eine unterschiedliche Spannkraft zwischen dem oberen und unteren Ende der Stäbe der Kugelführungen führt ebenfalls zu einer größeren Lageänderung. Hier wurden drei Momente, 0,7, 0,5 und 0,3 Nm, untersucht. Bei 0,3 Nm hat das Prüfgerät eine minimale Deformation, allerdings die Befestigung nicht mehr stark genug. Das kann die Stabilität des Prüfgerätes gefährden. Daher wird für alle drei Führungen des Prüfgerätes 0,5 Nm eingesetzt, wodurch mit einer Deformation von ca. 9 nm zu rechnen ist (Diagramm 27).

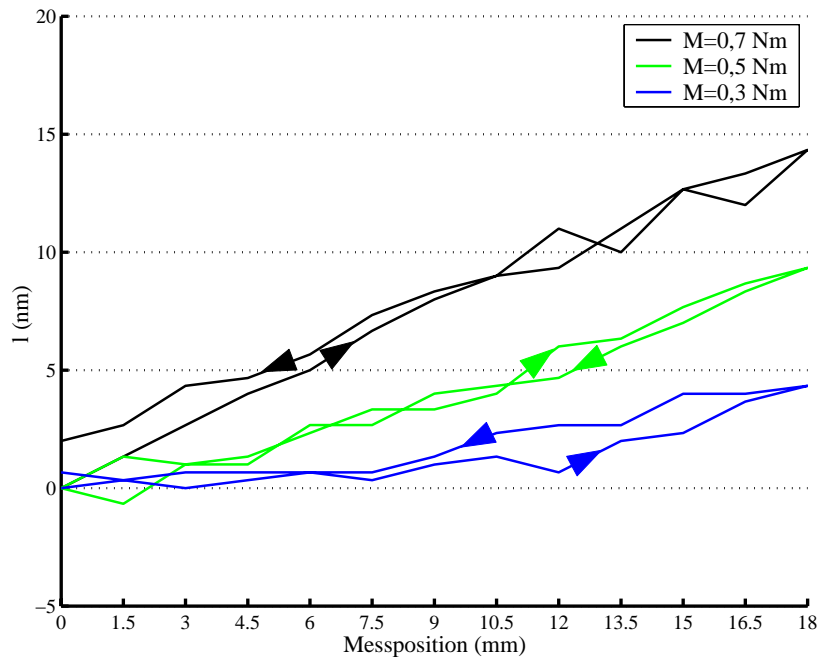


Diagramm 27: Einfluss verschiedener Spannkräfte der Kugelführungen auf die Deformation

7.2.2 Eliminierung der Deformation durch Justierung

Nach dem neuerlichen Umbau des Prüfgerätes in den Ausgangszustand (Referenzspiegel auf Trägerplatte) trat unerwartet eine große Lageänderung auf, die möglicherweise durch die neue Montage verursacht worden. Die neue Lageänderung (Diagramm 28) betrug ca. -14 nm im Messbereich von 18 mm. Die Richtung der Lageänderung hat sich damit umgekehrt.

Nach den Untersuchungen des Spannkrafteinflusses auf die Führungswellen in Abschnitt 7.2.1 wurde versucht durch eine höhere Spannkraft eine minimale Lageänderung zu erreichen. Bei einer Spannkraft von 1,3 Nm wurde die kleinste Lageänderung erreicht. Die Lageänderung konnte von ca. -14 nm auf $(0 \pm 2,5)$ nm reduziert werden (Diagramm 28). Dies ist der nahezu optimale Zustand sein. Um die Anweisungen der Maßnahme weiter zu beurteilen, wurde auch die Verkippung des Messtisches beim motorischen Verfahren untersucht. Dabei ist zu sehen, dass neben der reduzierten Lageänderung auch die Verkippung kleiner geworden ist (Diagramm 29). Das soll heißen, dass durch kleine Verkippung der Zwang auch verringert wurde. Nach der Untersuchung ist eine systematische Lageänderung kaum mehr zu sehen und es bleibt nur eine Schwankung der Deformation von ca. 2-3 nm im Messbereich von 18 mm. Nach der Analyse beträgt die Unsicherheit der Deformation ca. 3 nm.

Wie durch die Untersuchungen erwiesen wurde, wird die Lageänderung von der Spannkraft der Wellen beeinflusst. Es kann eine Minimierung der Lageänderung erreicht werden. Allerdings sollte die Lageänderung in regelmäßigen Zeitabständen kontrolliert werden.

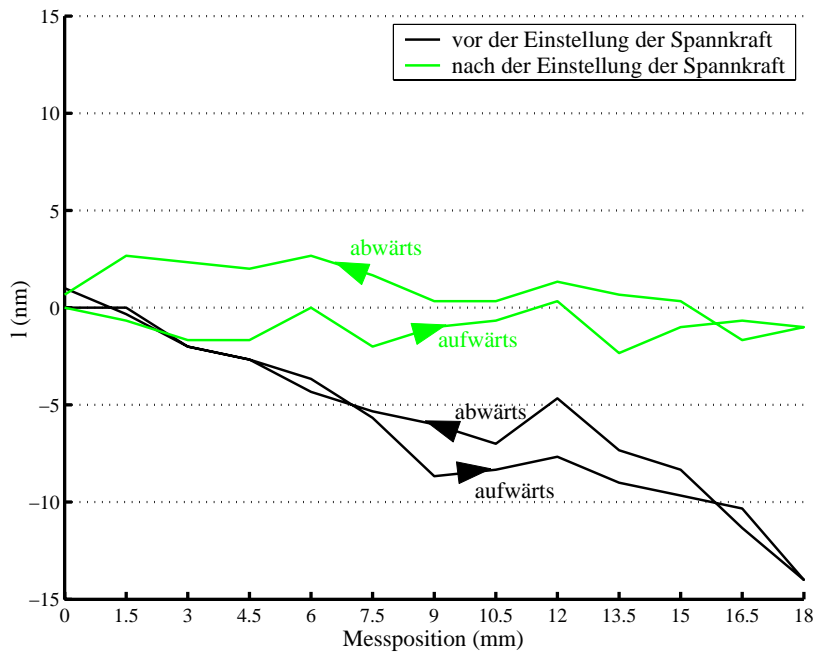


Diagramm 28: Deformation nach der Justierung

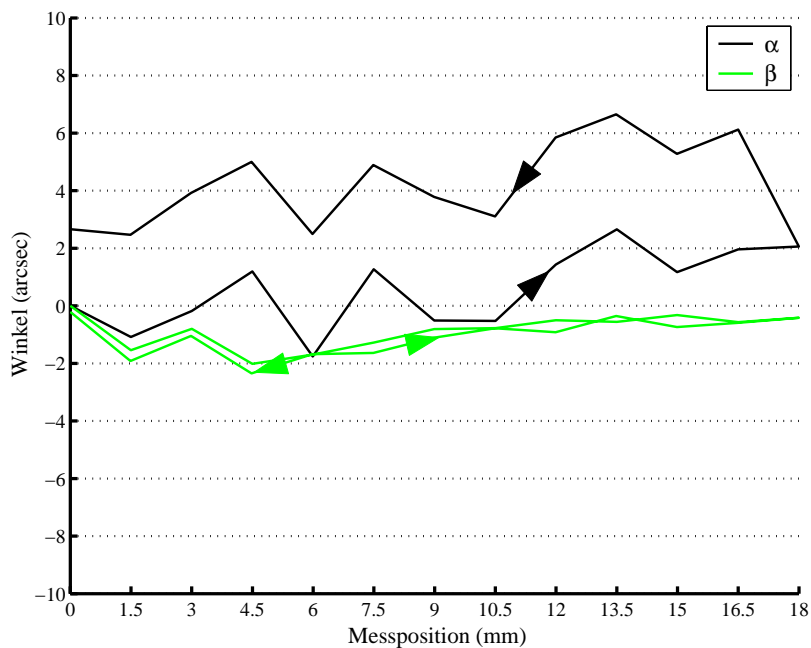


Diagramm 29: Kippbereich nach der Montage

7.2.3 Vergleichsmessungen mit dem taktilen und optischem Messtaster

Mit diesem mechanischen Zustand werden die Messabläufe der Vergleichsmessung mit optischem und taktilen Messtaster wieder durchgeführt. Bei den Untersuchungen mit dem optischen Messtaster zeigt sich, dass die Messunsicherheit der Vergleichsmessung bei $< \pm 3$ nm liegt. Dadurch wird nachgewiesen, dass die Genauigkeit des Prüfgerätes im Bereich der Unsicherheitsbudgets ist und die Aufgabe der Überprüfung erfüllen kann.

Die Untersuchungsergebnisse sind in Diagramm 30-1 und 30-2 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass beim Linearverfahren mit dem taktilen Messtaster eine Hysterese vorhanden ist, die beim Quasi-Pilgerschrittverfahren sehr klein und beim Pendelschrittverfahren fast kaum

zu bemerken ist. Zur Überprüfung wird daher vorgeschlagen, dass das Linearverfahren unbedingt durchgeführt werden soll, damit die mechanische Eigenschaft des Messbolzens genau ermittelt werden können. Quasi-Pilger- oder Pendelschrittverfahren kann daneben zum Vergleich ausgewählt werden. Mit dem Linearverfahren und Quasi-Pilger- oder Pendelschrittverfahren soll die messtechnische Eigenschaften eines zu prüfenden Messtasters ausreichend ermittelt werden können.

Um die Auswirkung der Lageänderung im Prüfgerät auch langfristig zu vermeiden, sollen weitere Möglichkeiten vorgeschlagen werden.

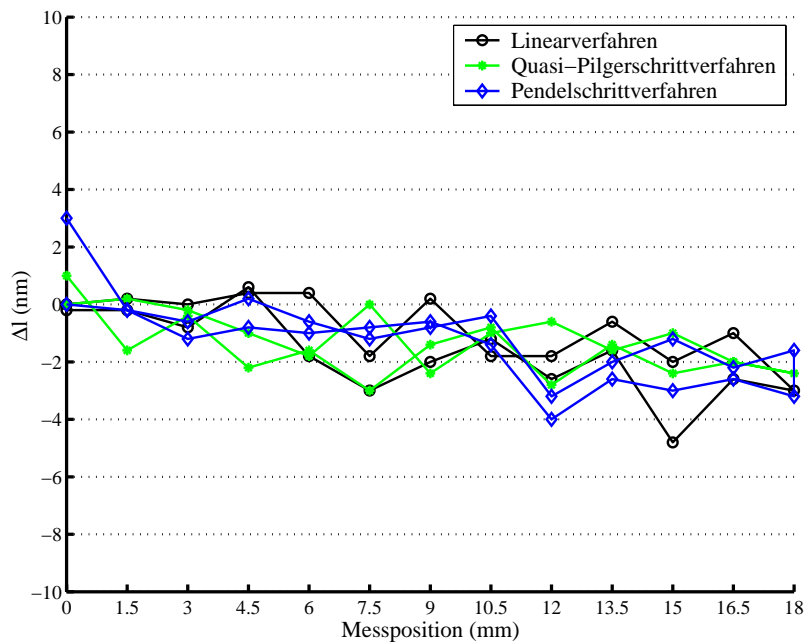


Diagramm 30-1: Drei Messabläufe mit dem optischen Messtaster, nach dem neuen Montage

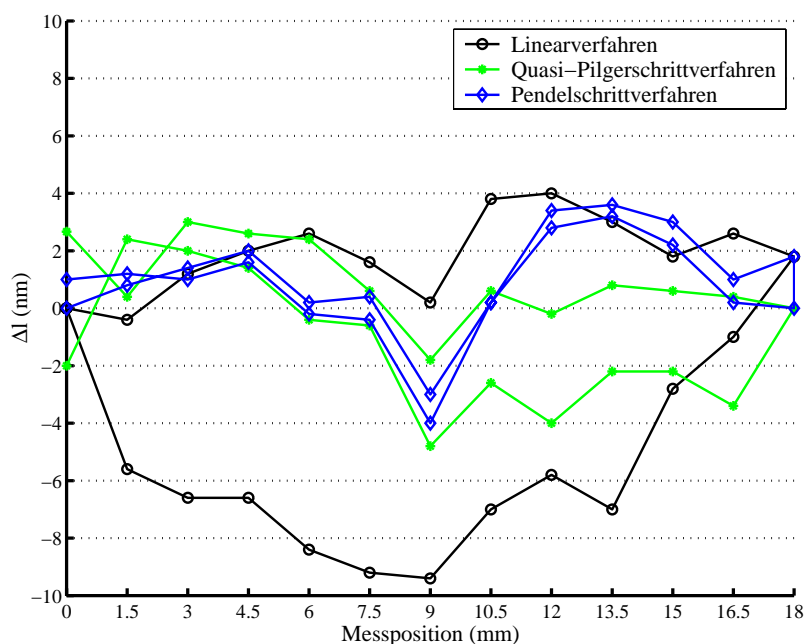


Diagramm 30-2: Drei Messabläufe mit dem mechanischen Messtaster, nach dem neuen Montage

7.3 Weitere Möglichkeit zur Minimierung der Lageänderung

Eine weitere Verbesserung des Präzisionsprüfgerätes ist nur möglich, wenn Lageänderung zwischen Interferometer und Deckplatte grundsätzlich vermieden werden. Die Ursache der systematischen Messabweichung während der Messfahrt ist die mechanische Deformation (Bild 32) zwischen den verschiedenen Bauelementen des Prüfgerätes durch Zwang der mechanischen Führungen.

Da die Lageänderung in Experimenten reproduzierbar ist, kann sich die Auswirkung auf den Prüfvorgang durch eine rechnerische Korrektur im Messprogramm verringern lassen.

Um die Lageänderung permanent zu vermeiden, müssen die mechanischen Bewegungsteile und die optischen Bauteile entkoppelt werden. Damit hat die mechanische Deformation keinen Einfluss mehr auf die optische Längenmessung.

Im folgenden sind einige Möglichkeiten dargestellt, um dieses Ziel zu erreichen.

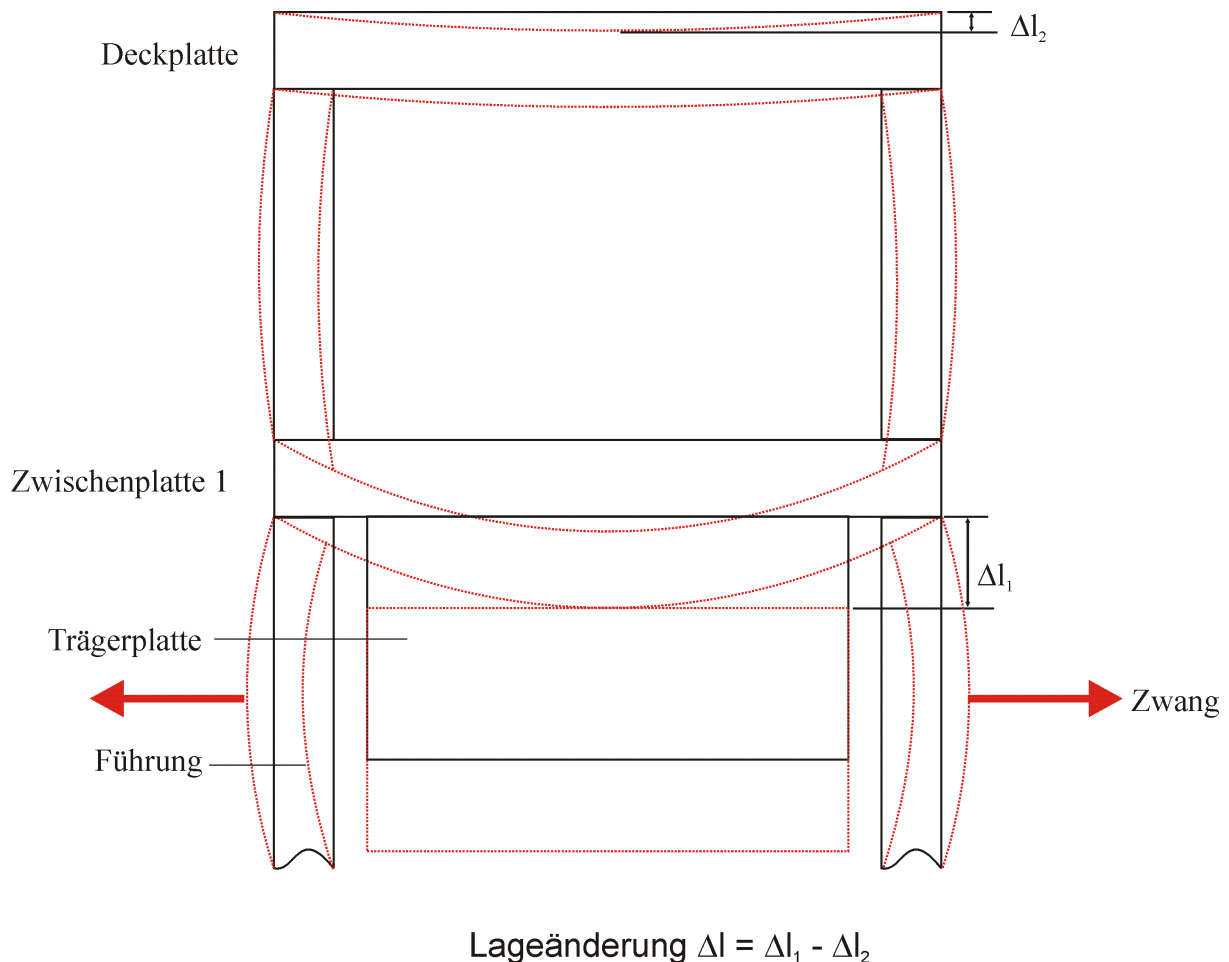


Bild 32: Darstellung der Lageänderung

7.3.1 Externer Antrieb

Die erste Möglichkeit der Entkopplung besteht darin, dass das Antriebssystem nicht fest mit der Längenmeseinheit verbunden wird. Konkret soll der Bewegungsteil separat mit einem externen Antrieb- und Führungssystem angekoppelt werden. Das Prinzip ist in Bild 33 dargestellt.

Mit dieser Konstruktion hat jede mechanische Deformation aus der Bewegung keinen Einfluss auf die Deckplatte und die Zwischenplatte 1, wodurch eine Lageänderung durch mechanische Deformation vermieden werden kann.

7.3.2 Trennung von Interferometer und Bewegungsteil bezüglich auf vorhandener Konstruktion

Will man auf eine derartig umfangreiche Änderung verzichten, kann man mit der vorhandener Konstruktion das derzeitige Konzept so modifizieren, dass das Interferometer und der Bewegungsteil getrennt werden (Bild 34). Dadurch hätte die zusätzliche Zwischenplatte 3 eine Lageänderung, die aber keinen Einfluss auf die Längenmessung mehr. In der neuen Konstruktion werden zwei zusätzliche Säulen zwischen der Zwischenplatte 1 und 2 vorgesehen werden. Um das obere Ende der Führungen zu befestigen, benötigt man eine zusätzliche Zwischenplatte 3. Durch diesen Umbau sollte kein Zwang während der Messfahrt auf die Messstrecke übertragen werden. Möglicherweise kann eine laterale Positionsänderung des Bewegungsteils verursacht werden. Diese Positionsänderung verursacht keinen zusätzlichen Messfehler, weil der Messkörper ein Parallelendmaß ist.

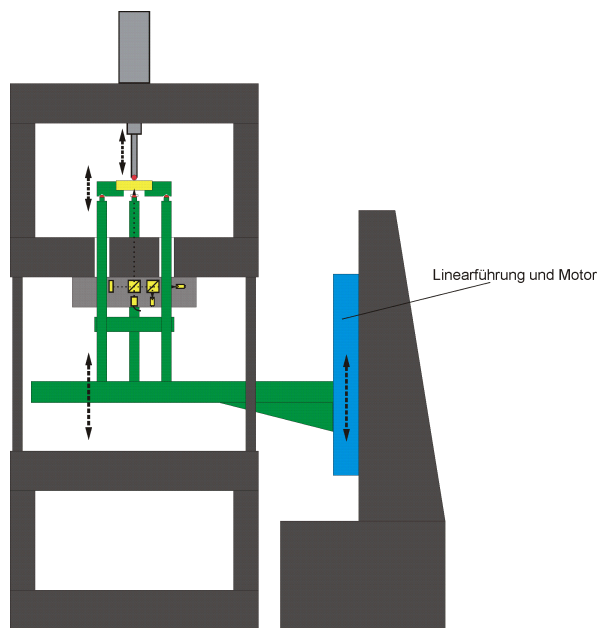


Bild 33: Messtisch durch einen externen Antrieb bewegt

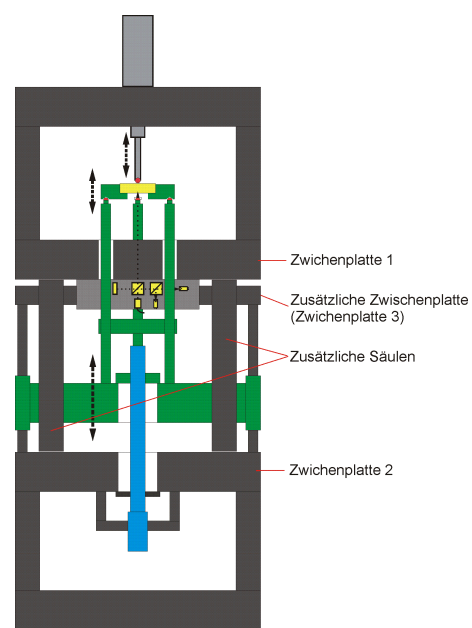


Bild 34: Interferometer und Bewegungsteil getrennt

8 Zusammenfassung

In Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prüfgerät zur automatischen und hochgenauen Überprüfung von Präzisionsmesstastern mit Messbereichen von 20 mm (bis 50 mm) und einer Auflösung im Nanometerbereich entwickelt. Für das Präzisionsprüfgerät wurden ein Laserinterferometer und ein Winkelsensor an einer mit Kugelführungen und linearen Antriebmotor ausgerüsteten Mechanikkonstruktion angebracht. Nach der Unsicherheitsanalyse und den entwickelten Justierverfahren können eine Reihe von möglichen Fehlereinflüssen eliminiert werden. Zur experimentellen Ermittlung der messtechnischen Eigenschaften des Prüfgerätes werden Vergleichsmessungen mit zwei interferenzoptischen Messtastern mit stabilisiertem He-Ne Laser durchgeführt.

Zur Reduzierung des Einflusses des bei einer Vergleichsmessung unvermeidbaren Abbe-Fehlers wird im Prüfgerät ein Winkelregler vorgesehen. Dazu werden ein Winkelsensor und drei Piezotranslatoren im Prüfgerät verwendet. Mit Hilfe des Winkelsensors und des Winkelreglers kann die Verkippung des Messkörpers bei der Überprüfung ständig auf Null geregelt werden. Dabei besitzt der Winkelregler eine Messunsicherheit von 0,2", womit der Abbe-Komparatorfehler bei einem Versatz kleiner 100 µm weniger als 0,1 nm beträgt.

Daneben entstand durch die Automatisierung des Prüfvorgangs ein zeitsparendes und genaues Prüfgerät, das die geforderte Genauigkeit bei der Überprüfung der eingesetzten interferenzoptischen Messtaster oder anderen Messtaster gewährleisten kann. Ein solches Prüfgerät ist insbesondere für Kalibrierstellen, wie Eichämter, Forschungsinstitute und Hochschulen interessant, wenn Messungen mit Messunsicherheiten im Bereich von 10 – 20 nm erreicht werden sollen [8-1]. Mit der Konstruktion des Prüfgerätes und dem entwickelten Messverfahren wird eine rationelle und dynamische Überprüfung präziser Messtaster ermöglicht, wobei eine Prüfgenauigkeit von 10 nm im Messbereich von 20 mm erreicht wird.

Die eigentliche Maßverkörperung der Längenmessung innerhalb des Prüfgerätes ist die Wellenlänge des im Planspiegelinterferometer verwendeten Laserlichts. Der Einsatz von Interferometern hat den großen Vorteil, dass die Laserwellenlänge mit höchster Präzision an ein nationales Längennormal angeschlossen werden kann. Dadurch ist die wegen der Übertragung der Maßverkörperung entstehende Messunsicherheit gering.

Weil nur die Längendifferenz der beiden Messsysteme für das Überprüfungsverfahren wichtig ist, wird eine relative grobe Positionierung mit einer Abweichung von kleiner als 20 µm an jedem Messpunkt mit einem Messintervall von 1,5 mm als hinreichend erachtet.

Um die möglichen Messfehler zu erkennen und mit Gegenmaßnahmen zu eliminieren, wurden mögliche Messfehler einzeln analysiert und ihre Ursachen sowie ihre Einflussgröße quantitativ untersucht.

Nach der Justierung der Flucht zwischen der Achse des Messstrahls des Interferometers und des Messtasters mit einer Quadrantendiode kann der Versatz mit Hilfe des Winkelsensors besser erkannt und überprüft werden. Optimal kann er bis auf ca. 30 µm reduziert werden. Durch geeignete Justierverfahren können die bei der praktischen Anwendung auftretenden mechanischen Messfehler, wie z.B. Kosinusfehler, verringert werden.

Neben der Winkelregelung wurde im Prüfgerät eine Längenfeinregelung entwickelt, mit der mögliche Messfehler durch elektronische Interpolation unterdrückt werden können. Die Regelung ist für einen Bereich von $\pm\lambda/2$ ausgelegt, das entspricht etwa ± 320 nm. Mit einer Unsicherheit von 1 Messimpuls, das sind ca. 1,2 nm, hat die Interpolation einen sehr geringen Einfluss auf die Längenmessung des Interferometers im Prüfgerät.

Die Positionierung des Messtasters und des Prüfgerätes erfolgt nach dem Prinzip der VDI-Richtlinie 2617 mit Hilfe eines Steuerungssystems. Alle drei in der VDI 2617 vorgeschlagenen Prüfabläufe wurden programmiert. Da die einzelnen Prüfabläufe jeweils bestimmte Vor- und Nachteile aufweisen, können diese nach Bedarf ausgewählt werden.

Nach der statistischen Aufbereitung der bei der aktuellen Messung ermittelten Daten kann sofort auf die qualitative und quantitativen Eigenschaften des Messtasters geschlossen werden.

Zur Angabe der Messunsicherheit des Prüfgerätes wurde ein Unsicherheitsbudget erstellt. Potentielle Abweichungen der Überprüfung aufgrund von Temperaturänderungen entstehen durch thermische Ausdehnung der Konstruktion. Wenn während der Überprüfung die Umweltbedingungen stabil gehalten werden können, kann davon ausgegangen werden, dass daraus resultierende Einflüsse auf das Ergebnis der Überprüfung vernachlässigt werden können. Dies kann u.a. durch eine Schutzhaube aus Styropor erreicht werden, durch die der Schwankungsbereich der Temperatur während der Messzeit von ca. 25 Minuten mit 0,02 K relativ klein gehalten werden kann. Eine andere bemerkwerte Fehlerursache ist die aus mechanischer Deformation verursachte Lageänderung, die während der Messfahrt möglicherweise aus Zwang der Wälzkörperführungen hervorgerufen wird. Diese Erscheinung ist von der Konstruktion, Montage und Spannkraft an den Führungsenden abhängig. Dies gehört zu den dynamisch-mechanischen Eigenschaften des Prüfgerätes und kann mit einer Kennlinie korrigiert werden. Um diesen systematische Fehler zu eliminieren, wird die Kennlinie der Deformation experimentell ermittelt, die dann zur Korrektur der Messergebnisse eingesetzt wird. Zur permanenten Vermeidung der Deformation wird vorgeschlagen, das Interferometer vom mechanischen Antriebssystem zu trennen. Dazu werden Konzepte zum Umbau vorgeschlagen.

Der Überprüfungsvorgang selbst hat eine Dauer von weniger als 25 Minuten. Im Vergleich zu anderen herkömmlichen Verfahren mit hochpräzisen Endmaßen ist dieses Messsystem auf der Basis eines lichtwellenleitergekoppelten Laserinterferometers als Längenmesseinheit genauer und leistungsfähiger und weist durch eine Automatisierung der Verfahren darüber hinaus ökonomische Vorteile auf.

Anhand der angestellten Untersuchungen und Tests konnten nachgewiesen werden, dass das Prüfgerät die Aufgabe der Überprüfung bei einer relativen Messunsicherheit von $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ erfüllen kann. In einem Messbereich von 18 mm liegt die Messabweichung bei der Überprüfung des Messtasters kleiner als ± 10 nm.

9 Literatur

- 1-1 Lemke, E.: Fertigungsmesstechnik, Verlag Vieweg, Braunschweig 1988
- 1-2 Taniguchi, N.: Nanotechnology, integrated processing systems for ultra-precision and ultra-fine products, Oxford Univ. Press, 1996
- 1-3 Shimokohbe, A.: The development of nano-meter positioning technology in Japan, International Conference on advanced manufacturing technology'99, 1999, pp. 83-87
- 1-4 WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Firmenschrift: <http://www.waycon.de/lvdt.html>
- 1-5 SIOS Firmenschrift: Endmaßprüfplatz der Serie EPP, <http://www.sios.de/deutsch/produkte/epp/epp.html>
- 1-6 Niehe, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines interferometrischen Endmaßprüfstandes, Dissertation, TU Ilmenau, (1997)
- 1-7 Dutschke, W.: Endmaßkalibrierung, expert Verlag, 1997
- 1-8 Decker, J.E., etc.: Updates to the NRC gauge block interferometer, NRC Document No. 42753, 8 Aug. 2000, <http://www.nrc.ca/inms/mechmet/menu.html>
- 1-9 Lan, Y.P.; Chang, W.C.: Measurement System Validation Procedure for gauge blocks measurement by Interferometry, CMS/ITRI Document No. 07-3-83-0007, May 17, 2000
- 1-10 Calibration services, NPL: http://www.npl.co.uk/npl/length/dmet/services/ms_gblocks.html
- 1-11 Endmaßkalibrierung, PTB: <http://www.ptb.de/de/org/5/index.htm>
- 1-12 Messmöglichkeiten / Länge, Eidgenössisches Amt für Messwesen: <http://www.ufmet.ch/de/mcm/index.html>
- 1-13 Postlethwaite, S.R.; Ford, D. G.; Morton, D.: Dynamic calibration of CNC Machine Tools, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 3, (1997), pp. 287-294
- 1-14 Büchner, H. J.; Jäger, G.: Digitales Kalibriergerät für Wegsensor, Feingerätetechnik, Berlin 32 (1983) 6, S. 248-249
- 2-1 Schaller, M. etc.: Eindimensionale Längenprüftechnik, DIN Beuth Kommentare, (1993)
- 2-2 Heinrich Gerling: Längenprüftechnik in der Fertigung, Braunschweig, Westermann, 1969
- 2-3 Dorenwendt, K., etc.: Interferenzgerät zur Prüfung induktiver Wegaufnehmer (Messtaster), Werkstatt und Betrieb, 107, (1974), 11, S. 663-666
- 2-4 Kounty, G.: Längenprüftechnik, VEB Verlag Technik Berlin, 1984
- 2-5 Tesa Firmenschrift: Inkrementale Messtaster und programmierbare Anzeigegeräte
- 2-6 Mahr Firmenschrift: Inkrementale Längenmesstaster
- 2-7 Heidenhain Firmenschrift: Messtaster / Heidenhain-Certo
- 2-8 SIOS Firmenschrift: Laserinterferometrische Messtaster der Serie LM
- 2-9 Dürschmid, Manfred: Untersuchung zur Messsignalerzeugung und Messsignalverarbeitung inkrementaler Längenmesssysteme unter besonderer Berücksichtigung der Analyse und Reduzierung systematischer und zufälliger Messabweichungen. Dissertation, TU Ilmenau, 1993
- 2-10 Niehe, S.: Neuartiges Verfahren für die Endmaßkalibrierung mit interferenzoptischen Taster. Microtecnic 3 (1994) , S. 48-49
- 2-11 Fischer, W.: Kontrolle von Parallel-Endmaßen mit Hilfe elektronischer Messgeräte, Technica Nr.3 1966, S.230-238
- 2-12 Hillmann, W.: PTB-Einstellnormal zum Kalibrieren der Vertikalvergrößerung von Oberflächenmessgeräten, Messtechnik, 1/73, 1973, S. 7-11
- 2-13 Schaller, M.: Toleranzen festzustellen, Maschinenmarkt, 92 (1986) , 28, S. 40-43
- 2-14 Banhart, A.: Prüfung von Messuhren und Feinzeigern, Industrie-Rundschau, 18 (1963), 2, S.20-22

-
- 2-15 Mahr Firmenschrift: OPTIMAR 100, Prüfmaschine für Messuhren, Feinzeiger, Fühlhebelmessgeräte und Taster, http://www.mahr.de/_private/hauptseite01/set1.htm
- 2-16 Helios Firmenschrift: HELIO-COM Supra, Ultrapräzises Längenkalibrierungssystem, <http://www.helios-messtechnik.de/>
- 2-17 Sporea, D.G., Miron, N.: Dial indicators check-up by laser interferometry, Rev. Sci. Instrum., 67(2), Feb. 1996, pp. 612-614
- 2-18 Dühmke, M., etc.: Interferentielle Prüfung von kugelgeführten induktiven Feinzeigern, Zeitschrift für Instrumentenkunde, 75 (1967), Heft 12, S. 399-402
- 2-19 Harb, S., etc.: Subnanometer behavior of a capacitive feedback, piezoelectric displacement actuator, Rev. Sci. Instrum. 63(2), February 1992, pp. 1680-1689
- 2-20 Bosse, H., etc.: Oberflächensimulator für die dynamische Kalibrierung von Längenmesstaster, Technisches Messen, 2/94, 1994, S. 82-88
- 2-21 Haitjema, H.: Dynamic probe calibration in the μm region with nanometric accuracy, Precision Engineering, 19, 1996, pp. 98-104
- 2-22 Haitjema, H.; Kotte, G.J.: Dynamic probe calibration up to 10 kHz using laser interferometer, Measurement, Vol.21, No.3, pp. 107-111, 1997
- 2-23 Downs, M.J.; Nunn, J.W.: Verification of the sub-nanometric capability of an NPL differential plane mirror interferometer with a capacitance probe, Meas. Sci. Technol. 9 (1998), pp. 1437-1440
- 2-24 Haitjema, H.; Schellekens, P.H.J.: Calibration of displacement sensors up to 300 μm with nanometre accuracy and direct traceability to a primary standard of length, Metrologia 2000, 37, pp. 25-33
- 2-25 Whitehouse, D. J., etc.: Nano-calibration for stylus-based surface measurement, J. Phys. E : Sci. Instrum. 21 (1988), pp. 46-51
- 2-26 Chetwynd, D.G.: X-ray interferometer calibration of microdisplacement transducers, J. Phys. E : Sci. Instrum., Vol. 16, 1983, pp. 871-874
- 2-27 Basile, G., etc.: Combined optical and X-ray interferometry for high-precision dimensional metrology, Proc. R. Soc. Lond. A (2000), 456, pp. 701-729
- 2-28 Bowen, D.K., etc.: Sun-nanometre displacements calibration using x-ray interferometry, Meas. Sci. Technol. 1 (1990), pp. 107-119
- 2-29 Wetzels, Serge: Laser based displacement calibration with nanometre accuracy, Dissertation, TU Eindhoven, 1998.
- 2-30 Dutschke, W.: Prüfmittelüberwachung in Kalibrierketten, VDI-Z 132, Nr.5, Mai 1990, S. 107-112
- 3-1 Feinmess-Jena Firmenschrift: Universallängenmessgerät Abbe 250 und Abbe manuell
- 3-2 Abbe, E.: Messapparate für Physiker, Zeitschrift für Instrumentenkunde, Zehnter Jahrgang. Dez. 1890, S. 446-448
- 3-3 Bryan, J.B.: The Abbe Principle Revisited, an Updated Interpretation. Precision Eng., 1 (3) (1979) , S.129-132
- 3-4 Zhang, G.X.: A Study on the Abbe Principle and Abbe Error. Annals of the CIRP. Vol. 38/1/1989, S. 525-528
- 3-5 Zanoni, C.: Differential Interferometer Arrangements for Distance and angle measurements : Principles, Advantages and Applications, VDI Bericht Nr. 749, (1989) , S 93-106
- 3-6 Flügge, Jens: Vergleichende Untersuchung zur messtechnischen Leistungsfähigkeit von Laserinterferometern und inkrementellen Maßstabmeßsystemen. Dissertation TH Aachen (D82) , 1996, Braunschweig
- 3-7 Kunzmann, H., etc.: Scales vs. Laser Interferometers, Performance and Comparison of two measuring systems, Annals of the CIRP Vol. 42/2/1993, pp. 753-767
- 3-8 Zygo: informative literature of serie ZMI, products & solutions, <http://www.zygo.com/>

-
- 3-9 Sparrer, G.: Messanordnung zur Kalibrierung kompletter Laserinterferometer. Microtechnic, 2/1994, S. 27-32
- 3-10 Agilent Technologies: Agilent 10766A Linear Interferometer, <http://www.agilent.com/>
- 3-11 Zygo: ZMI 510, <http://www.zygo.com/>
- 3-12 Büchner, H.-J., Jäger, G.: Contactless interferometric incremental measurement technique, measurement, Vol.6 No. 4, Oct-Dec. 1988
- 3-13 Jäger, G.: Lichtellenleitergekoppeltes interferenzoptisches Wegmesssystem Technisches Messen, 57 (1990) S. 204-206
- 3-14 Rowley, W.R.C.: Signal in two-beam interferometers with laser illumination, Optica Acta, Vol 16, No. 2, S. 159-168, (1969)
- 3-15 Jäger, G.: Anwendung lichtellenleitergekoppelter Miniaturinterferometer für Präzisionslängenmessungen, Opto 94, 17-19 Mai (1994) , Leipzig
- 3-16 Hock, F.: Photoelektrisches Laser-Interferometer, Laser und angewandte Strahlentechnik, Nr. 3/1969, S. 39-43
- 3-17 Gerhardt, Uwe: Signalverarbeitung in der interferenzoptischen Mess- und Sensortechnik, Dissertation, TU Ilmenau, (1996)
- 4-1 Feinprüf Firmenschrift: Kugelführungen für spielfreie Hub-, Hub/Dreh- und Drehbewegungen
- 4-2 Jendritza, D.: Piezo-Aktoren : schnell und präzise, Elektronik, 7/1992, S. 140-143, 9/1992, S., 60-65, und 11/1992, S. 102-108
- 4-3 Schröer, B.: Aktoren in der Mikrosystemtechnik, Sensor Magazin, 1/92, S.23-25 und 2/92, S. 10-13
- 4-4 Spanner, K. und Dietrich, L.: Piezo-Translator, Elektronik, 6/26.3.1982, S. 91-94
- 4-5 Diekstatt, K.: Anwendungen piezoelektronischer Keramiken, Elektronik, 6/26.3.1982. S. 79-83
- 4-6 Okazaki, Y., etc.: Dual-Servo Mechanical Stage for Continuous Positioning, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 27, No. 2, (June 1993), pp. 172-173
- 4-7 Sakuta, S., etc.: Experimental Studies on Ultra-precision Positioning, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 27, No. 3, (Sept. 1993), pp. 235-240
- 4-8 Jendritza, J., etc.: Keramikaktoren für die Mikrosystemtechnik, Design & Elektronik, 14 vom 02.07.1991, S. 55-60
- 4-9 Schneißer, F.: piezoelektrische Aktuatoren : kräftig und schnell, Elektronik, 8/19.04.1984
- 4-10 Firmenschrift: Piezoelectric Technology, Melles Griot, <http://www.mellesgriot.com>
- 4-11 Spanner, K. und Dietrich, L.: Feinste Positionierungen mit Piezo-Antrieb, Feinwerktechnik und Messtechnik (F+M), 87, (1979), 4, S. 181-183
- 4-12 Physik Instrument (PI) GmbH: Piezo-Translator
- 4-13 Piezosystem Jena Firmenschrift: Bedingungsanleitung für NV 40/3S, (1997)
- 4-14 Weintritt, J.: Hochpräzisions- Winkelregelungseinheit für abbefehlerfreie Messanordnung, Diplomarbeit, TU Ilmenau, (1996)
- 4-15 Armstrong, T. R.; Fitzgerald, M. P.: An autocollimator based on the laser head of a compact disc player, Meas. Sci. Tech. (1992), pp. 1072-1076
- 4-16 Das-1702ST-DA: Keithley Metrabyte, Taunton, USA
- 4-17 Keithley Instruments GmbH: Testpoint Benutzerhandbuch
- 4-18 Leonhard, W.: Digitale Signalverarbeitung in der Mess- und Regelungstechnik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1989
- 4-19 Birch, K.P.: optical fringe subdivision with nanometric accuracy, Precision Eng. Vol. 12 No.4, 1990, pp. 195-198
- 4-20 Wu, Chien-Ming ; Su, Ching-Shen: Nonlinearity in measurement of length by optical interferometry. Mess. Sci. Technol. 7 (1996), pp. 62-68

-
- 4-21 Wu, Chien-Ming, etc.: Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry. *Mess. Sci. Technol.* 7 (1996), pp. 520-524
- 4-22 Heydemann, Peter L.M.: Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers, *Applied Optics* Vol. 20 No.19 / 1 Oct. 1981, pp. 3382-3384
- 4-23 Augustyn, W.: An analysis of polarization mixing errors in distance measuring interferometers, *J. Vac. Sci. Technol. B* 8(6) Nov/Dec 1990, pp. 2032-2036
- 4-24 Wilkening, G.: Nanopositionierung – die Basis der Nanometrologie, *tm* 67, 7-8/2000, S. 298-305
- 4-25 SIOS Firmenschrift: Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor, Ilmenau, (1998)
- 4-26 Gerhardt, U.: Persönliche Mitteilung, IPMS, TU Ilmenau
- 4-27 VDI/VDE 2617: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten, Kenngrößen und deren Prüfung, 1986
- 4-28 DIN 1319: Grundbegriff der Messtechnik
- 4-29 VDI/DGQ 3441: Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen, 1977
- 5-1 Lichtensteiner, K.: Längenprüftechnik, R. Oldenbourg Verlag, Wien 1984
- 5-2 ISO/IEC/OIML/BIPM: Guide to the Expression of uncertainty in measurement, 2nd ISO corrected and reprinted, 1995
- 5-3 Kosuda, T., etc.: Estimation of Uncertainty on calibrations of dial gauges, IMEKO-XV World Congress, pp. 77-84, 1999
- 5-4 Jäger, G.: Lasernanomesstechnik – Möglichkeit, Grenzen und Anwendungen in der modernen Gerätetechnik, 44th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU Ilmenau, Sept. 1999
- 5-5 Jäger, G., Gründwald, R., Manske, E.: Lichtwellenleitergekoppelte interferenzoptische Sensoren, *Technisches Messen*, 57 (1990), 319-322
- 5-6 Donges, A. und Noll, R.: Lasermesstechnik, Hüthig Buch Verlag GmbH, Heidelberg (1993)
- 5-7 Edlen, B.: The refractive index of air, *Metrologia*, Vol.2, No.2 (1966), pp. 71-80
- 5-8 Manske, E.: Ein Beitrag zur Entwicklung hochauflösender Interferenzoptischer Wegsensoren, Dissertation, TU Ilmenau, (1985)
- 5-9 Eichler, J.: Laser, Springer-Verlag, Berlin, (1998)
- 5-10 Tschirnich, J.: Fehlereinflüsse bei interferentiellen Längenmessungen mit Lasern, *Feingerätetechnik*, 25 (1976) Nr. 7, S. 304-306
- 5-11 Birr, H.: Konstruktion eines Feinzeigerprüfgerätes mit minimierten Abbe-Komparatorfehler, Diplomarbeit, TU Ilmenau (1996)
- 5-12 Stone, J., Philips, S.D.: Corrections for wavelength variations in precision interferometric displacement measurement, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 101, pp. 671-674 (1996)
- 5-13 Rowley, W.R.C.: Some aspects of fringe counting in laser interferometer, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol IM-15, No. 4, 146-149, (1966)
- 5-14 Cip, O., Petru, F.: A scale-linearization method for precise laser interferometry. *Mess. Sci. Technol.* 11 (2000), pp. 134-141
- 5-15 Dontsov, D.: Persönliche Mitteilung, IPMS, TU Ilmenau
- 5-16 Petru, F., Cip, O.: Problems regarding linearity of data of a laser ineterferometer with a single-frequency laser, *Precision Eng.* 23, pp. 39-50, (1999)
- 5-17 Gerhardt, U.: Digitale Signalregelung im modularen Auswertesystem, interne Dokument, IPMS, TU Ilmenau
- 5-18 Bobroff, N.: Critical alignments in plane mirror interferometry, *Precision Eng.*, 15(1), pp. 33-38, (1993)
- 5-19 Domhardt, M.: Persönliche Mitteilung, IPMS, TU Ilmenau

-
- 5-20 Lehmann, R. und Wiemer, A.: Die dynamische Messkraft, Feingerätetechnik, 8 Jg. Heft 1/1959, S. 37-40
- 5-21 Wächter, K., Fleischer G.: Konstruktionslehre für Maschineningenieure, 1. Auflage, Verlag der Technik, Berlin 1989
- 5-22 Schaller, M.: Bedeutung des Leitfadens zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) für die industrielle Messpraxis- Umsetzung des GUM an Beispielen aus der Längenmesstechnik, DIN-Mitt. 78, 1999, Nr. 11, S. 795-801
- 5-23 DAR: Leitfaden zur Beurteilung von Mess- und Prüfeinrichtungen in Prüflaboratorien im Hinblick auf Kalibrierung und messtechnische Rückführung auf SI-Einheiten, DAR-EM 10, Version 2.2, 15.09.1999, 6 Seiten
- 6-1 Büchner, H. und Jäger, G.: Interferometrisches Messverfahren zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Messoberflächen. Technisches Messen, 59 (1992) 2, S.43-47
- 6-2 Stroke, G.W.: Photoelectric fringe signal information and range in interferometers with moving mirrors, J. of the optical society of America, Vol. 47 No. 12, 1957, pp. 1097-1103
- 6-3 Riis, E., etc.: Calibration of the electrical response of piezoelectric elements at low voltage using laser interferometry, Appl. Phys. Lett. 54 (25), 19 June 1989, pp. 2530-2531
- 6-4 Tipton, H.: Use of the laser interferometer in the calibration of numerically controlled machine tools, Proc. SPIE, Vol. 376, Dec. 7-8 1982, Teddington England, pp. 15-19
- 6-5 DIN 879 T1
- 8-1 Bartelt; R. und Gödecke, J.: Absolute Messgenauigkeit auf dem Stand des technisch Machbaren, Sonderdruck aus der Zeitschrift F&M, 1993/9/

Danksagung

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger, Leiter des Institutes Prozessmess- und Sensortechnik, und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Gründwald gilt mein besonderer Dank für die Betreuung und Unterstützung, die diese Arbeit ermöglicht haben.

Für die wertvolle Beratung bei der Lösung vieler Probleme und die ständige Unterstützung möchte ich Herrn Dr.-Ing. Eberhard Manske meinen herzlichen Dank sagen.

Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Büchner für die nützlichen Anregungen und Diskussionen. Ebenfalls möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Matthias Welter meinen Dank für die Unterstützung bei der Korrektur des Manuskriptes zu dieser Arbeit aussprechen.

Herrn Dr.-Ing. Detlef Heydenbluth, Dr.-Ing. Uwe Gerhardt, Dr.-Ing. Tino Hausotte, Dipl.-Ing. Jens Wurmus, Frau Cordula Höring und weiteren Mitarbeitern des Institutes PMS sowie Herrn Dr. Walter Schott und Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Pöschel von der SIOS Messtechnik GmbH danke ich ebenfalls für umfangreiche technische Unterstützungen.

Herrn Dr.-Ing. Michael Domhart danke ich für die Durchführung von FEM-Rechnungen und Herrn Mathias Röser für seine Arbeiten am optischen Messtaster.

Ferner danke ich der Stiftung, Cultural Foundation of National Cheng-Kung University Taiwan, für das zweijährige Stipendium.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern sowie meiner Frau für ihre Unterstützung.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials haben mir keine Personen entgeltlich/unentgeltlich geholfen.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Precision Test Equipment for Nano Gauging Probes

Abstract

Due to the increasing demands on the processing tolerance in manufacturing technology and on the miniaturization of industrial components, nanometrology is increasingly more important in manufacturing processes. Therefore, precise measuring instruments and sensors play a decisive role for the accurate characterization and inspection of products.

For linear length inspection, highly accurate gauging probes, i.e. nano gauging probes, are of great importance. They possess a resolution within the nanometer range and have an accuracy of less than 100 nm. This group of precision gauging probes includes probes based on electronic as well as optical principles, e.g. inductive, incremental-optical or interference optical. To guarantee the accuracy and the traceability to the definition of the meter, calibration and test of nano gauging probes are necessary. Existing test methods and machines suffer from various disadvantages. Some permit only manual test procedures which are time-consuming, e.g. with high accurate gauge blocks as material measures. Other tests exhibit higher accuracy but are capable of measuring only in the micrometer range or result in uncertainties of more than 100 nm in the large measuring ranges.

In order to make the test possible with a high resolution as well as a large measuring range, a precision test equipment for nano gauging probes was constructed, that with a resolution of 1.24 nm, a measuring range up to 20 mm (60 mm) and a measuring uncertainty of approx. ± 10 nm can fulfill the requirements of high resolution within the nanometer range while simultaneously covering a large measuring range in the order of millimeters. This work is based on a calibration equipment for length sensors developed at the Institute of Process Measurement and Sensor Technology at the Ilmenau Technical University.

The precision test equipment is equipped with a plane mirror interferometer. As a new approach for the avoidance of the Abbe error, a continuous angular control of the measuring body is realized with the help of piezo translators. Thus, during the test procedure, the measuring body reaches a tilt of less than 0.2" is reached and the Abbe error is minimized.

A drive system consisting of ball guides, a fine thread spindle and a DC motor positions the measuring body. For the automation of the test procedure a measuring program adhering to the measurement principle outlined in VDI/VDE 2617 guideline was designed. With this program a gauging probe can be tested in less than thirty minutes with eleven measuring points and five repetitions.

Theoretical and experimental investigations show that the precision test equipment has a test uncertainty of approx. ± 10 nm at the measuring range of 18 mm, that corresponds to a relative uncertainty of approx. $\pm 5 \cdot 10^{-7}$. With small uncertainty, the minimization of the Abbe error and short test times this device can be regarded as an universal and efficient precision test equipment, which is available for the accurate test of arbitrary precision gauging probes and other linear length sensors.

Zusammenfassung

Aufgrund der steigenden Anforderungen an die Bearbeitungstoleranzen in der Fertigungstechnik und an die Miniaturisierung von industriellen Bauteilen gewinnt die Nanometrologie in der Fertigungsmesstechnik zunehmend an Bedeutung. Daher spielen präzise Messgeräte und –sensoren zur genauen Charakterisierung und Überprüfung der Produkte eine entscheidende Rolle.

Für die eindimensionale Längenprüfung haben hochgenaue Messtaster, bzw. Nanomesstaster, die eine Auflösung im Nanometerbereich besitzen und eine Genauigkeit von weniger als 100 nm erreichen, große Bedeutung. Dazu gehören sowohl nach dem elektronischen als auch nach dem optischen Messprinzip arbeitende Messtaster, wie induktive, inkremental-optische oder interferenzoptische. Zur Gewährleistung der Genauigkeit und der Rückführbarkeit auf die Definition des Meters sind die Kalibrierung und Überprüfung der Nanomesstaster unentbehrlich. Bereits existierende Prüfverfahren oder –maschinen haben diverse Nachteile. Einige erlauben nur einen manuellen Prüfvorgang, der sehr zeitaufwendig ist, wie z.B. mit hochgenauen Parallelendmaßen als Maßverkörperung. Andere weisen trotz hoher Genauigkeit nur Prüfbereiche im Mikrometerbereich auf oder besitzen in großen Prüfbereichen von einigen Millimetern nur eine Prüfunsicherheit von mehr als 100 nm.

Um die Prüfung mit hoher Auflösung und gleichzeitig großem Messbereich zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf der Grundlage eines am Institut PMS entwickelten Kalibriergerätes für Wegsensoren ein Präzisionsprüfgerät für Nanomesstaster aufgebaut, das mit 1,24 nm Auflösung, einem Prüfbereich bis 20 mm (60 mm) und einer Messunsicherheit von ca. ± 10 nm die Anforderungen an hohe Auflösung im Nanometerbereich und den gleichzeitig großen Messbereich im Millimeterbereich erfüllen kann.

Das Präzisionsprüfgerät ist mit einem Planspiegelinterferometer ausgerüstet. Als neuer Ansatz zur Vermeidung des Abbe-Fehlers wird mit Hilfe von Piezotranslatoren eine kontinuierliche Winkelregelung des Messkörpers verwirklicht. Damit wird während des Prüfvorganges eine Verkippung des Messkörpers von $< 0,2''$ erreicht und der mögliche Abbe-Fehler minimiert. Die Positionierung des Messkörpers erfolgt durch ein Antriebsystem, das sich aus Kugelführungen, einer Feingewindespindel und einem DC-Motor zusammensetzt. Zur Automatisierung des Prüfvorganges ist ein nach dem Messprinzip der Richtlinie VDI/VDE 2617 arbeitendes Messprogramm entworfen worden, mit dem ein Messtaster in elf Messpunkten und fünf Wiederholungen in weniger als 30 Minuten geprüft werden kann.

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zeigen, dass das Präzisionsprüfgerät eine Prüfunsicherheit von ca. ± 10 nm im Messbereich von 18 mm aufweist, was einer relativen Messunsicherheit von ca. $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ entspricht.

Mit der geringen Prüfunsicherheit, der Minimierung des Abbe-Fehlers und der kurzen Prüfzeit kann das Gerät als ein universelles und leistungsfähiges Präzisionsprüfgerät bezeichnet werden, das für die genauen Prüfungen von beliebigen Präzisionsmesstastern und anderen eindimensionalen Wegsensoren einsetzbar ist.