

FAU Studien aus dem Maschinenbau 390

Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit
einem Weißlichtinterferenzmikroskop und
einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem
Weißlichtinterferenzmikroskop und einem
metrologischen Rasterkraftmikroskop

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 390

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Yiting Wu

**Großflächige Topographiemessungen
mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop
und einem metrologischen
Rasterkraftmikroskop**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
(FMT) Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Erlangen
FAU University Press
2022

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

Bitte zitieren als

Wu, Yiting. 2022. *Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 390. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-514-8

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-513-1 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-514-8 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-514-8

Großflächige Topografiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Yiting Wu, M.Sc.

aus Shandong

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 16.12.2021

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske, TU
Ilmenau

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Additive Fertigung - Inkrementelle In-Line Prüftechnik für die additive Fertigung (SFB 814, TP C4)“ sowie des *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) Projekts „Traceable three-dimensional nanometrology (3DNano)“.

Mein Dank gilt an erster Stelle dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte. Durch die konstruktiven Gespräche, zahlreichen Hinweise und Denkanstöße und den Freiraum, den er mir gewährte, trug er maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Mein herzlicher Dank gilt allen meinen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für die bewundernswerte und erfolgreiche Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Spezieller Dank gilt Herrn Andrej Torba, der mich besonders bei der Anfertigung der technischen Zeichnungen und dem Zusammenbau des interferometrischen Rasterkraftmikroskops unterstützt hat. Frau Wirthmann Elisa half mir nicht nur auf der Seite des Lebens, auch auf der Seite der Arbeit sowie bei der orthographischen Korrektur des Manuskripts und gab mir viele Anregungen. Mein Dank gilt auch Frau Ute Klöpzig für die wissenschaftlichen Gespräche und Diskussionen, besonders bezüglich der Elektronik. Herrn Müller Andreas danke ich für die Durchsicht des Manuskripts.

Mein Dank gilt meiner Familie, die mich während der Erstellung dieser Dissertation moralisch unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1 Messaufgaben	5
2.2 Messgeräte	7
2.2.1 Tastschnittgeräte	8
2.2.2 Optische Messgeräte	8
2.2.3 Rastersondenmikroskope	9
2.2.4 Rasterelektronenmikroskope	10
2.2.5 Mikrokoordinatenmessgeräte	10
2.3 Großflächige Topografiemessung	11
2.3.1 <i>Stitching</i>	11
2.3.2 Registrierung und Datenfusion	14
2.4 Großflächige Topografiemessung mittels Weißlichtinterferometrie	16
2.5 Großflächige Topografiemessung mittels Rasterkraftmikroskopie	18
2.6 Defizite	21
3 Physikalisch-technische Grundlagen	23
3.1 Theoretische Grundlagen der Interferometrie	23
3.2 Grundlagen der Interferenzmikroskopie	26
3.2.1 Phasenschiebeinterferometrie	27
3.2.2 Weißlichtinterferometrie	28
3.3 Grundlagen der AFMs	34
3.3.1 Funktionsprinzip	35
3.3.2 Betriebsarten	36
4 Integration eines WLI in die NMM-1	41
4.1 Systemaufbau	41
4.2 Einmessstrategie des WLI-Systems	45
4.2.1 Charakterisierung der metrologischen Eigenschaften	45
4.2.2 Kalibrierung und Korrektur der Sensorverkipfung	56

4.3	Großflächige Messungen ohne Überlappungsfelder	61
5	Das metrologische AFM.....	63
5.1	Das optische Messsystem.....	63
5.1.1	Schwachstelle des vorherigen optischen Messkopfes.....	65
5.1.2	Anpassung des Messkopfes	66
5.1.3	Signalentstehung.....	72
5.2	Vorsatz zur <i>Cantilever</i> -Halterung, -Justage und -Modulation .	77
5.3	Montage der optischen Elemente und Ausrichtung des Messkopfes	81
5.4	Auswertung der Messsignale	87
5.5	Korrektur von Interferometersignalen	91
6	Integration des MAFM in die NMM-1.....	93
6.1	Systemaufbau	93
6.2	Einmessstrategie des MAFM-Systems.....	94
6.2.1	Einbindung des MAFM in die NMM-1.....	94
6.2.2	Kalibrierung des MAFM.....	97
6.3	Analyse der Unsicherheit des MAFM.....	101
6.4	Applikationsmessungen.....	107
6.4.1	Messungen von Stufenhöhennormalen.....	108
6.4.2	Gitterabstandsbestimmungen	111
6.4.3	Großflächige Messungen.....	112
7	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	119

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen (gemäß DIN 1304-1:1994-03)

A_N	Numerische Apertur
B	Magnetische Flussdichte in T
c	Lichtgeschwindigkeit in m/s
c_1, c_2	Gemessene Länge in den beiden Bilddiagonalen
c_j	Empfindlichkeitskoeffizient bzw. partielle Ableitung $\partial f / \partial x_j$
C_j	Kalibrierwerte der Kalibriergitter
d	Stufenhöhe (vgl. Abschnitt 4.2.1), Abstand zwischen dem einfallenden Strahl und dem ausfallenden Strahl (vgl. Abschnitt 5.1.2)
d_x, d_y, d_z	Auslenkung des Tastsystems entlang der x-, y- und z-Achse der NMM-1
Δd	Drift
E	Elektrische Feldstärke in V/m
F	Wirkende Kraft zwischen der Antastspitze des <i>Cantilevers</i> und der Messobjektoberfläche
f	Brennweite
$F(x)$	Ziel-Funktion der Gauß-Newton-Iteration Methode
f_0	Resonanzfrequenz des <i>Cantilevers</i>
j	Imaginärteil einer komplexen Zahl (Abschnitt 3.1 und Abschnitt 5.1.3), Laufindex (Abschnitt 2.3, Abschnitt 3.1, Abschnitt 4.2, Abschnitt 5.4 und Abschnitt 6.3)
I, I_{obj}, I_{ref}	Intensität der Weißlichtinterferenz, Intensität des Messstrahls und Intensität des Referenzstrahls
k_c	Federkonstante des <i>Cantilevers</i>
k_{dx}, k_{dy}, k_{dz}	Polynomkoeffizienten der Kennlinie des Sensors
k_x, k_y	Koeffizienten der Quadrantenfotodiode

l	Messlänge
l_a	Mit NMM-1 interferometrisch erfasster Weg des Sensors (Interferometer MAFM)
$\Delta l_1, \Delta l_2$	Abweichung erster Ordnung und Abweichung zweiter Ordnung
$L_{\text{mess}}, L_{\text{ref}}$	Geometrische Länge des Mess- und Referenzarms
m	Bitwert des A/D-Wandlers
\mathbf{M}	Jonesmatrix
n	Iterationsschritt (Abschnitt 4.2.2), Brechzahl (Kapitel 5 und Kapitel 6)
N	Vorgegebener maximaler Iterationsschritt (Abschnitt 4.2.2), Anzahl der ganzen Perioden der Interferenzordnung (Abschnitt 5.4)
P	Aufgenommene Messpunktwolken
Q	Gütefaktor
\mathbf{R}	Rotationsmatrix (Abschnitt 2.3.1)
$\mathbf{R}(\varphi)$	Rotationsmatrix
$\mathbf{R}(\varphi_x), \mathbf{R}(\varphi_y), \mathbf{R}(\varphi_z)$	Rotationsmatrix jeweils um die x -, y - und z -Achse
S_q	Mittlere quadratische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
S_{qnoise}	Messrauschen
S_z	Maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
s_x, s_y	Laterale Positionen des Laserstrahls auf der PSD
s	Entfernung der Strahltaile (Abschnitt 5.2), Versatz zwischen der Messstrahlrichtung und der Messrichtung (Abschnitt 5.3), Standardabweichung (Kapitel 6)
S	Betrag des Poynting-Vektors
$t_{\text{AM}}, t_{\text{FM}}$	Zeitabstand bei Amplitudenmodulation, Zeitabstand bei Frequenzmodulation
\vec{t}	Translationsvektor

U	Spannung, erweiterte Messunsicherheit
u	Standardmessunsicherheit
v	Geschwindigkeit des Messobjekts
w	Breite eines <i>Cantilevers</i>
w_0	Radius der Strahltaille eines Gauß-Strahls
$X_{S,1}, X_{S,2}, X'_{S,2}$	Datensatz der Schwerpunkte im überlappten Bereich des gemessenen Bereichs 1, Datensatz der Schwerpunkte und transformierter Datensatz der Schwerpunkte im überlappten Bereich des gemessenen Bereichs 2
\bar{x}	Mittelwert
$z(x, y)$	Datensatz von einer gemessenen Topografie
z_R	Rayleighlänge
θ_D	Auslenkungswinkel der Keilplatte
θ_1, θ_2	Neigungswinkel der zwei Spiegel (Abschnitt 5.1.2), Winkel zwischen Versuchsscanlinie 1 und Scanrichtung sowie Drehwinkel zwischen Versuchsscanlinie 1 und Versuchsscanlinie 2 (Abschnitt 6.4.2)
θ_{PTW}	Eingestellter Winkel der aktiven Ebene eines polarisierenden Strahlteilers zu der H -Stellung bzw. x -Achse
μ_0, μ_r	Magnetische Feldkonstante, relative Permeabilität
$\varepsilon, \varepsilon_0, \varepsilon_r$	Summe der quadrierten Residuen, elektrische Feldkonstante, relative Permittivität
Δz	Optische Wegdifferenz (Abschnitt 3.1 und Abschnitt 3.2), Auslenkung des <i>Cantilevers</i> (Abschnitt 3.3.2)
$\Delta\varphi$	Phasenverschiebung
α	Verstärkungskoeffizient und Variable der Norm 5436-1 (Abschnitt 4.2.1), Tiltwinkel des <i>Cantilevers</i> (Abschnitt 5.1.2),

	Winkel zwischen Versuchsscanlinie 2 und Scanrichtung (Abschnitt 6.4.2)
α_r	Winkel zwischen der Messstrahlrichtung und der Messrichtung
γ	Rechtwinkligkeitsabweichung
x_c, y_c, z_c	Koordinaten des Schwerpunktes
λ	Wellenlänge
$\delta_{\text{wiederh}}, \delta_{\text{reprod}}$	Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit
φ_0	Anfangsphase mit einem Faktor $\lambda/2\pi$
φ_x, φ_y	Kippung um x-Achse und y-Achse
$\varphi_{\text{mess}}, \varphi_{\text{ref}}$	Phase des Messstrahls, Phase des Referenzstrahls
\emptyset_0	Anfangsphase

Abkürzungsverzeichnis

ACG	flächige Kalibriergitter, von engl. <i>Areal Cross Grating</i>
A/D	Analog/Digital
AFM	Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Atomic Force Microscope</i>
AM	Amplitudenmodulation
B	rückwärts, von engl. <i>backwards</i>
CCD	engl. <i>Charge Coupled Device</i>
CD	engl. <i>Compact Disc</i>
CM	Kontakt-Modus, von engl. <i>Contact-Mode</i>
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DMD	engl. <i>Digital Mirror Device</i>
DSP	Digitaler Signalprozessor
EMPIR	engl. <i>European Metrology Programme for Innovation and Research</i>
F	vorwärts, von engl. <i>forwards</i>
fps	engl. <i>frames per second</i> (Einheit)
FM	Frequenzmodulation
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
GUM	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, von engl. <i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
ICP	engl. <i>Iterative Closest Point</i>
IM	<i>Intermittent</i> -Modus
LIGA	Lithographie, Galvanik und Abformung
LR-AFM	<i>Long-Range Atomic Force Microscope</i>
LWL	Lichtwellenleiter
M ³	engl. <i>Molecular Measuring Machine</i>
MAFM	metrologisches Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Metrological Atomic Force Microscope</i>
METAS	Eidgenössisches Institut für Metrologie Schweiz
NCM	Nicht-Kontakt-Modus, von engl. <i>Non-Contact-Mode</i>
NIST	engl. <i>National Institute of Standards and Technology</i>
NMM-1	Nanopositionier- und Nanomessmaschine
NMI	Nationales Metrologieinstitut

NPL	engl. <i>National Physical Laboratory</i>
PSD	Positionsempfindlicher Detektor, von engl. <i>Position Sensitive Detector</i>
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SEM	Rasterelektronenmikroskop, engl. <i>Scanning Electron Microscope</i>
SPM	Rastersondenmikroskop, von engl. <i>Scanning Probe Microscope</i>
STM	Rastertunnelmikroskop, von engl. <i>Scanning Tunneling Microscope</i>
R	Reflexion (Kapitel 5)
T	Transmission
TEM	Transversalelektromagnetisch
TSI	engl. <i>tilted white light scanning interferometry</i>
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
WLI	Weißlichtinterferenzmikroskop

1 Einleitung

Im Jahr 1959 stellte der amerikanische Physiker Richard Feynman in seinem Vortrag „Unten ist eine Menge Platz“ („*There is Plenty of Room at the Bottom*“) zahlreiche Ideen über Technologie auf mikroskopischer Ebene wie beispielsweise die physikalische Manipulation von Atomen und Molekülen und die Konstruktion der mikroskopischen Maschinen vor [1]. Dies wurde später die Grundlage der Technologie im Nanometerbereich. Mittlerweile stößt allerdings eine weitere Miniaturisierung zunehmend an physikalische Grenzen. Mikroelektronische, mikromechanische, mikrofluidische und mikrooptische Baugruppen verschmelzen zu einem Gesamtsystem. Im Jahr 1974 wurde der Begriff „Nanotechnologie“ zum ersten Mal von Taniguchi im Rahmen der Ultrafeinbearbeitung von Material mit Präzision im Nanometerbereich verwendet [2].

Dieser Begriff umfasst Technologien, die Strukturen im atomaren, molekularen, meso- und mikroskopischen Bereich erforschen und entwickeln, bei denen mindestens eine Dimension kleiner als 100 nm ist [3]. Die Nanotechnologie hat sich in den letzten Jahren zunehmend entwickelt und kommt in unterschiedlichen Gebieten wie der Halbleitertechnik, der Mikromechanik, der Chemie, der Optik sowie der Bio- und Gentechnik zur Anwendung.

Ein wichtiges Forschungsgebiet der Nanotechnologie ist die Nanomechanik, bei der der Aufbau von miniaturisierten elektromechanischen Komponenten im Vordergrund steht. Für die Erstellung solcher miniaturisierten Strukturen gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Der Erste ist der *Top-Down*-Ansatz. Beispiele dafür sind Fertigungen mit zunehmend miniaturisierten Werkzeugen wie Bohrer, Fräser, Spritzgusswerkzeug. Der Zweite ist der sogenannte *Bottom-up*-Ansatz, bei dem die Strukturen durch das Zusammenfügen einzelner Atome hergestellt werden. Beispiel dafür ist die Polymerisation der Chemie zur Herstellung der Nanostrukturen aus Molekülen.

Die Anwendung der Messtechnik ist der einzige Weg, quantitative Informationen über physikalische Größen zu bekommen. Nach der Goldenen Regel der Messtechnik von Professor Georg Berndt wird zur Prüfung eines geometrischen Merkmals mit einer vorgegebenen Toleranz eine um den Faktor 5 bis 10 geringere Messunsicherheit benötigt, um den Konformitätsbereich nicht durch die Messunsicherheit im Vergleich zum Toleranzbereich stark zu verkleinern [4]. Die Entwicklung in der Fertigungstechnik stellt zur Prüfung der hergestellten Bauteile immer neue Anforderungen an

die Fertigungsmesstechnik. Hochauflösende Messinstrumente und Techniken zur Qualitätssicherung im Mikro- und Nanometerbereich werden benötigt, um die Nanotechnologie zu einer industriellen Nutzung zu führen.

Neben der industriell etablierten taktilen (berührenden) Messtechnik, halten zunehmend die optischen Messverfahren Einzug in den Markt. Die Auswahl eines Antastsystems ist stark von den Messaufgaben bzw. den Oberflächeneigenschaften, der Werkstückgröße, der geforderten Genauigkeit sowie der Komplexität der Strukturen abhängig. Als eines der wichtigen optischen Messverfahren wird die Weißlichtinterferometrie insbesondere für empfindliche und leicht verformbare, spiegelnde Oberflächen bevorzugt. Daneben wird die Rasterkraftmikroskopie sehr oft zur Topografiemessung mit atomarer Auflösung verwendet. Die zunehmend sinkenden Strukturgrößen und Miniaturisierung der Merkmale bei zugleich zunehmender Dimensionalität erfordern sowohl quantitative, dimensionale Messungen mit Nanometergenauigkeit als auch Messungen über große Messbereiche. Eine Registrierung oder *Stitching* von einzelnen Messungen ist notwendig, um die gesamte Oberfläche zu messen.

Ziel dieser Arbeit ist die großflächige Topografiemessung mit hoher Strukturauflösung mittels unterschiedlicher Messverfahren bzw. Weißlichtinterferometrie und Rasterkraftmikroskopie. Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Im Kapitel 2 wird der gegenwärtige Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Messaufgaben für die Mikro- und Nanomesstechnik, Methoden zum *Stitching* und zur Registrierung sowie Messungen von großflächigen Werkstücken mittels Weißlichtinterferometrie und metrologischer Rasterkraftmikroskopie betrachtet. Eine detaillierte Zusammenfassung darüber wird vermittelt und die Besonderheiten jedes Messverfahrens werden im Einzelnen beschrieben.

Im Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen zur Interferometrie, die Funktionsprinzipien und die Messaufbauten des Weißlichtinterferenzmikroskops und des Rasterkraftmikroskops dargestellt.

Kapitel 4 beschreibt das eingesetzte Weißlichtinterferenzmikroskop zur großflächigen Topografiemessung ohne Überlappungsfelder. Dabei wird zuerst die Integration des Weißlichtinterferenzmikroskops in die Nanopositionier- und Nanomesmaschine (NMM-1) sowie das Funktionsprinzip des integrierten Messsystems beschrieben. Danach folgt eine Darstellung der Charakterisierung der metrologischen Eigenschaften sowie der Korrek-

tur von Kippungen bzw. Drehung des Sensors um die lateralen und vertikalen Koordinatenachsen. Anschließend wird eine experimentelle Untersuchung vorgestellt, um die Messstrategie zu verifizieren.

Kapitel 5 befasst sich mit dem metrologischen Rasterkraftmikroskop (MAFM). Zunächst wird die wesentliche Schwachstelle des bisherigen optischen Messkopfes erörtert. Nachfolgend wird die Anpassung des Messkopfes für die Rasterkraftmikroskopie und zur Verringerung der Störinterferenz erläutert. Danach folgt die Darstellung des Antastsystems. Die Montage der optischen Elemente, die Ausrichtung des Messsystems, die Entstehung der Messsignale sowie deren Auswertung werden ebenfalls in diesem Kapitel erläutert.

Das nachfolgende Kapitel 6 beschreibt die Integration des MAFM in die NMM-1. Dabei wird der Messaufbau und die Einmessstrategie erläutert. Das MAFM, welches in die NMM-1 integriert wurde, wird charakterisiert und dessen Messunsicherheit wird analysiert. Applikationsmessungen wie Stufenhöhenmessung, Gitterabstandsbestimmung und großflächige Messungen werden gezeigt.

Abschließend wird im Kapitel 7 eine Zusammenfassung und Ausblick gegeben.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Bedarf an Fortschritt in der Fertigungsmesstechnik wird durch die Entwicklung der Fertigungstechnik und die damit ermöglichten Produkte vorangetrieben. Im Folgenden werden die Bauteile und die verbundenen Messaufgaben, die zur Messung verwendeten Messgeräte sowie Messstrategien betrachtet.

2.1 Messaufgaben

Vorangetrieben durch die stetigen Fortschritte der Fertigungstechnik entstehen umfassende Aufgaben für die Mikro- und Nanomesstechnik. Die häufigen betroffenen Messgrößen der Messaufgaben im Bereich der Mikro- und Nanometrologie sind [3, 5, 6]:

- Der Abstand als Höhe in vertikaler Richtung zwischen zwei Oberflächen gleicher Orientierung, z. B. Tiefe von Mikrokanälen der Mikrofluidik.
- Der Abstand als Breite zwischen zwei gegenüberliegenden Oberflächen, z. B. Breite von Leiterbahnen und Mikrorillen.
- Der Abstand als Entfernung zweier Oberflächen oder Strukturen gleicher Orientierung, z. B. Gitterperiode.
- Die Form und Lage von Oberflächen eines Objekts, z. B. Ebenheit von Wafern.
- Die Textur und Rauheit als Geometrien der Oberflächenstruktur, deren Abmessungen klein im Vergleich zu deren Messobjekt sind.
- Das Aspektverhältnis als Tiefe einer Struktur geteilt durch seine Breite.
- Die Schichtdicke, z. B. Schichtdicke der Magnetschicht eines Festplattenlaufwerks.
- Der Partikeldurchmesser, z. B. Durchmesser von Silbernanopartikeln, Polymernanopartikeln und SiO_2 -Partikeln.

Im Folgenden wird auf die Bauteile und die damit verbundenen Messaufgaben eingegangen.

Ein Beispiel aus dem Bereich Mikrooptik sind Mikrolinsenarrays, die meistens mit lithographischen Methoden aus Quarzglas oder Silizium hergestellt werden. Typischerweise bestehen Mikrolinsenarrays aus hunderten bis tausenden optischen Linsen, die mit Durchmessern im Mikrometerbereich, jedoch Abweichungen (z. B. Oberflächenprofilabweichung) typischerweise im Nanometerbereich, nebeneinander angeordnet sind. Mikro-

linsenarrays erreichen derzeit nicht selten Größen von bis zu mehreren zehn Millimetern z. B. 50 mm × 50 mm. [7, 8] Sie finden beispielsweise Anwendung in Faserkopplern, Endoskopen und beim Lesen von CDs/DVDs. Charakteristische Messgrößen an diesen sind beispielsweise die Oberflächenrauheit, der Gitterabstand und die Form der Linsen.

Durch die Fortschritte der Fertigungstechnik entstehen immer stärker miniaturisierte Mikrobauteile wie **Mikrogetriebe**, bei denen eine hohe Anforderung an die geometrische Genauigkeit existiert. Die absolute Dimension der Verzahnungen bewegen sich im Bereich von Submillimetern (durch Mikrofräsen oder LIGA (Lithographie, Galvanik und Abformung) Verfahren hergestellt) bis einigen Mikrometern (durch Verfahren der Halbleitertechnik hergestellt) [9]. Die linienorientierte Messung und Auswertung von Merkmalen entlang von Geraden, Kreisen und Helices sind in aktuellen Standards für die Tolerierung und Bewertung von Zahnrädern gut etabliert [10].

Heutzutage werden komplexe Oberflächenstrukturen an Zahnradflanken bei der Zahnradherstellung mit dem Ziel der Verbesserung der funktionalen Leistung erzeugt. Dabei wird die Geometrie von „rein evolventenförmigen“ Zahnradflanken modifiziert. Es ist notwendig, topografische Informationen über die gesamten Zahnradflanken zu erhalten, um Abweichungen im Herstellungsprozess zu diagnostizieren und die Zahnradqualität zu beurteilen. Zur Bestimmung der Parameter z. B. mittels Multi-Sensor-System ist eine Datenfusion nicht vermeidbar. [11]

Ein anderes Beispiel eines Produkts der Alltagswelt ist das **Mikrospiegelarray** (engl. *Digital Mirror Device/DMD*), welches zur Bilderzeugung in Videoprojektoren oder gar für Maskenbelichter bei der Halbleitertechnik dienen. Auf einem Chip mit einer diagonalen Länge von 7,93 mm befinden sich beispielsweise mehr als 0,9 Millionen einzeln angesteuerte Spiegel [12]. Beispielspezifische Messaufgaben sind die Messung der Spiegelebenheit, der Spiegeloberflächenrauheit und des Spiegelgitterabstandes [13].

Mikrowerkzeuge stellen die Metrologie vor große Herausforderungen. Typischerweise besitzen Mikrofräser und -bohrer einen Durchmesser von 200 µm und weniger, während die Abmessung der Schneidkanten im einstelligen Mikrometerbereich liegen. Die effektiven Werkzeugdurchmesser, der Radius der Schneide, die Rauheit der Spanfläche und der Helixwinkel spielen eine ganz wichtige Rolle für die Performance im Fräs- und Bohrprozess. [5]

Oberflächen sind in den Bereichen der Mikro- und Nanotechnologie ebenfalls von großer Bedeutung. Zunehmende Relevanz erhält die Klasse der funktionalen Oberflächen, die mit einem determinierten Muster mit geometrischen Merkmalen erzeugt werden, um eine bestimmte Funktion zu generieren. Dabei wird einer Makrogestalt eine Mikrogestalt überlagert. Ein Beispiel ist die superhydrophobe Oberfläche bzw. eine durch nanostrukturierte Oberflächen erzeugte Superhydrophobizität, der sogenannte Lotus-Effekt, welcher bei der Lotuspflanze beobachtet werden kann [14]. Die durch diesen Effekt hervorgerufene Selbstreinigungsfähigkeit kann auf technische Oberflächen übertragen werden [15]. Hierbei spielt die Oberflächenrauheit eine große Rolle.

2.2 Messgeräte

Die Fertigungsmesstechnik umfasst eine Vielzahl verschiedener Verfahren, die sich nach verschiedenen Kriterien unterteilen lassen. Häufig werden sie nach der Art der Antastung und Erfassung der Messobjekte z. B. taktil oder optisch, nach dem Messprinzip wie beispielsweise interferometrisch, induktiv oder konfokal, nach den Messaufgaben sowie den Bauformen unterschieden. Bild 1 zeigt einen Überblick über die am häufigsten benutzten Messgeräte unterschiedlicher Messverfahren der Mikro- und Nanotechnologie hinsichtlich des Messbereiches und der Auflösung.

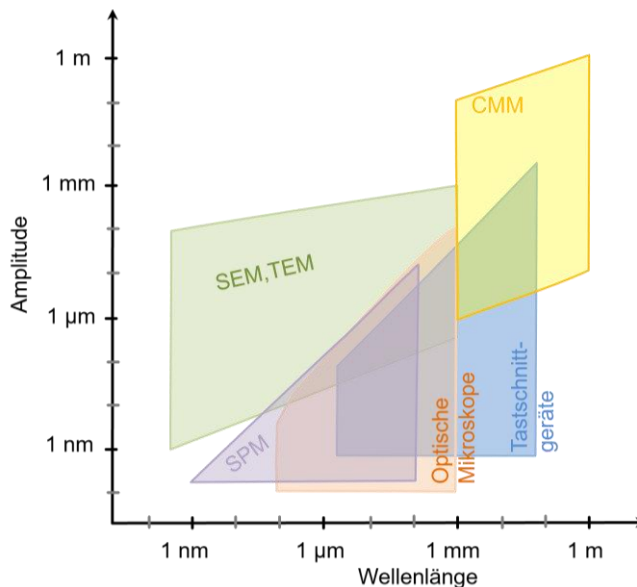


Bild 1: Stedman Diagramm unterschiedlicher Messgeräte [16, 17, 18]

Der messbare Bereich der unterschiedlichen Messverfahren wird durch die maximal messbare Amplitude (halber vertikaler Messbereich), die minimal messbare Amplitude (halbe minimal messbare Höhendifferenz), die kürzeste Wellenlänge (Strukturauflösung) und die längste Wellenlänge (lateral Messbereich) definiert und im logarithmischen Raum gezeichnet. Der Bereich wird weiterhin durch die maximal messbare örtliche Profilsteigung und die maximal messbare Krümmung begrenzt. [16, 17]

2.2.1 Tastschnittgeräte

Bei der Messung mit Tastschnittgeräten bzw. Profilometern wird eine Tastschneidspitze mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig über die Oberfläche eines Messobjekts verfahren. Das Messprofil ergibt sich aus der Auslenkung der Tastschneidspitze, die in der Regel durch ein induktives Wegmesssystem mit kleinem Messbereich oder ein optisches Inkrementalmesssystem wie ein Glasmaßstab oder ein Interferometer mit relativ großem Messbereich erfasst wird [19, 20]. Tastschnittgeräte finden ihre Anwendung in der Ermittlung von Oberflächenkenngrößen wie Rauheit und Welligkeit. Die Messbereiche der heute üblichen Tastschnittgeräte liegen im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu mehreren Millimetern mit Auflösungen von wenigen Nanometern. Letztere werden auch für Konturmessungen eingesetzt. Tastschnittgeräte sind aufgrund von ihren Tastelementgrößen für heutige Messaufgaben an Mikrobauanteilen eingeschränkt geeignet. Im Gegensatz zu optischen Systemen sind physikalische Grenzen wie die Zugänglichkeit wegen der Tastelementgröße, der Einfluss von der Formabweichung der Tastschneidspitze und insbesondere die Gefahr der Oberflächenbeschädigung nicht vermeidbar.

2.2.2 Optische Messgeräte

In der Mikro- und Nanomesstechnik kommen neben taktilen Messverfahren sehr oft optische Messverfahren wie z. B. Konfokalmikroskopie und Interferenzmikroskopie zum Einsatz [21, 22]. Bei Letzterer ist es durch den verwendeten Kamerasensor möglich, eine flächenhafte Erfassung anstelle einer punktförmigen sequentiellen Erfassung der Messoberfläche durchzuführen. Optische Messverfahren besitzen eine Vielzahl von Vorteilen im Vergleich zu taktilen Verfahren. Optische Messverfahren sind prinzipbedingt berührungslos, deshalb können sensible und leicht verformbare Werkstücke zerstörungsfrei gemessen werden. Ihre lateralen Auflösungen sind durch die Beugungsgrenzen eingeschränkt und liegen im Bereich von hundert Nanometern bis zu Mikrometern. Die laterale Auflösung ergibt

sich nach dem Rayleigh-Kriterium zu $0,61 \cdot \lambda / A_N$, wobei λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts und A_N die numerische Apertur des eingesetzten Objektivs ist. Je nach Messprinzip weisen optische Sensoren prinzipbedingte Einschränkung auf, wie beispielsweise den Grenzwinkel zur optischen Achse, unter dem das von der Messoberfläche reflektierte Licht noch in das Objektiv zurück reflektiert werden kann. Zum Beispiel liegt beim Fokusverfahren praktisch der Grenzwinkel im Bereich von $\pm 15^\circ$ [5]. Der Grenzwinkel bei Weißlichtinterferenzmikroskopen (WLI) wird mit $\pm 30^\circ$ angegeben [23]. Größere Oberflächenwinkel bis zu 75° , wenn bei Messung von rauen Oberflächen noch genügend Licht reflektiert wird, können mittels Konfokalmikroskope oder Fokusvariation bei entsprechend erforderlicher großer Rauheit der Oberfläche erfasst werden [5]. Dennoch sind die optischen Messverfahren durch ihre sehr hohe Auflösung in Strahlausbreitungsrichtung bis in den Subnanometerbereich, die vom Funktionsprinzip abhängt, gut etablierte Messgeräte der Mikro- und Nanometrologie.

2.2.3 Rastersondenmikroskope

Zusätzlich ist die Klasse der Rastersondenmikroskope (SPM von engl. *scanning probe microscope*) zu nennen. Das Rastersondenmikroskop hat seinen Ursprung im Rastertunnelmikroskop [24], das es erstmals ermöglichte, Oberflächen leitfähiger Proben dreidimensional in atomarer Auflösung darzustellen [25]. Seit der Erfindung des Rastertunnelmikroskops (STM von engl. *scanning tunneling microscope*) [26] im Jahr 1982 und des Rasterkraftmikroskops (AFM von engl. *atomic force microscope*) [25] im Jahr 1986 haben Forschungsaktivitäten im Bereich der Rastersondenmikroskope geboomt. Die Auflösung beträgt hier bis zu einigen 10 pm und sie zählen damit zu den hochauflösendsten Messverfahren. Bei den Rastersondenmikroskopen wird die zu untersuchende Probenoberfläche mittels der Sonde in einem Rasterprozess Punkt für Punkt abgetastet. Die sich für jeden einzelnen Punkt ergebenden Messwerte z. B. Höhe werden dann zu einem digitalen Bild zusammengesetzt. Nach Art der Wechselwirkung zwischen der Sonde und der Probe unterscheidet man beispielsweise folgende SPM-Typen: das Rastertunnelmikroskop, das Rasterkraftmikroskop, das optische Nahfeldmikroskop und das magnetische Rasterkraftmikroskop. Mit einem Marktanteil von ca. 90 % sind die AFMs die bedeutendste Gruppe unter den SPMs [3]. Zum Betrieb werden üblicherweise Piezoaktoren als Positioniersystem verwendet, deren Arbeitsbereich meist im Mikrometerbereich liegt.

2.2.4 Rasterelektronenmikroskope

Bei der Messung mittels eines Rasterelektronenmikroskops (SEM von engl. *scanning electron microscope*) wird ein feingebündelter Elektronenstrahl erzeugt, der in einem bestimmten Muster zeilenweise über die abzubildende Objektoberfläche gerastert wird. Die Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Objekt bzw. die dabei freigesetzten Elektronen des Objekts (sogenannte sekundäre Elektronen) werden von einem Detektor aufgefangen und zur Erzeugung eines Bildes des Objekts genutzt. Da die Wellenlänge von Elektronenstrahlung sehr viel kürzer als sichtbares Licht ist, kann man mit einem SEM Strukturen bis zu einer minimalen Länge von 0,1 nm betrachten. Bei Elektronenmikroskopen verschlechtern die Aberrationen der elektronenoptischen Bauteile die nutzbare Auflösung um etwa zwei Größenordnungen gegenüber der Elektronenwellenlänge. Trotzdem finden sie weite Anwendung wegen der großen Schärfentiefe (typischerweise 100-fach größer als bei einem vergleichbaren optischen Mikroskop). [27]

Im Gegensatz zum AFM ist beim SEM eine Probenpräparation erforderlich. Für die Untersuchung mit einem SEM sollte die Probe nach Möglichkeit leitfähig oder leitfähig beschichtet sein, um einen hohen Sekundärelektronenstrom bzw. guten Kontrast zu erhalten. Aufgrund der Erwärmung oder des Wegstoßens ganzer Atome nach Kollision der schnellen Elektronen können Schädigungen der Objekte durch den Elektronenstrahl verursacht werden. Die Messungen finden in einem Vakuum statt. [28, 29]

2.2.5 Mikrokoordinatenmessgeräte

Nach DIN EN ISO 10360-1:2003-07 sind Koordinatenmessgeräte Messsysteme, die mit einem Messkopfsystem zur Erfassung der räumlichen Koordinaten von Punkten auf Werkstückoberflächen ausgestattet sind [30]. Bei der Messung werden Werkstück und Messkopfsystem zueinander bewegt und in Kontakt gebracht. Die Messpunkte werden von dem Tastelement an verschiedenen Punkten bezüglich des Gerätekoordinatensystems erfasst. Mikrokoordinatenmessgeräte, welche ursprünglich von den konventionellen Koordinatenmessgeräten abgeleitet wurden, können mit Messauflösungen von bis zu wenigen Nanometern angewandt werden [31]. Beispiele dafür sind die IBS Isara mit einer Skalen- bzw. Ortsauflösung von 1,3 nm und einer volumetrischen Positionierungsunsicherheit von 30 nm und einem Messvolumen von 100 mm × 100 mm × 40 mm [32] sowie ihr Nachfolgemodell die ISARA 400 mit einer Skalen- bzw. Ortsauflösung von 1,6 nm und einem vergrößerten Messvolumen von 400 mm × 400 mm × 100 mm [33]. Ein weiteres Gerät ist die NMM-1 [34], mit einer Skalen- bzw. Ortsauflösung

von kleiner 0,1 nm und einem Messvolumen von 25 mm × 25 mm × 5 mm [35].

2.3 Großflächige Topografiemessung

Aus denen im Abschnitt 2.1 erwähnten Beispielen aktueller Messaufgaben lassen sich die Anforderungen an die Messtechnik ableiten. Die Messaufgaben heutiger dimensionaler Mikro- und Nanomesstechnik sind geprägt von zunehmend sinkenden Strukturgrößen und zunehmender Miniaturisierung der Merkmale bei gleichzeitiger zunehmender Dimensionalität. Neben den Erfordernissen der Nanometrologie wird zugleich ein mesoskaliger Messbereich gefordert. Um die gesamte Oberfläche zu messen, bei der die Messdatenaufnahme nicht in einer Ansicht erfolgen kann, ist eine Registrierung oder ein *Stitching* von Teilmessbereichen oder Teilansichten des zu messenden Objekts nötig. Zum *Stitching* von Teilmessbereichen gibt es mehrere Vorgehensweisen, die auf numerischen Verfahren bzw. mathematischen Algorithmen ohne Verwendung der Positionsinformation zur Minimierung der Abweichungen der überlappenden Teilansichten im Überlappungsbereich basieren. Bei der Registrierung werden die gemessenen Koordinaten jeweiliger Teilansichten durch homogene lineare Transformation in ein Koordinatensystem überführt. [36]

2.3.1 *Stitching*

Bei dem numerischen Verfahren des *Stitching* handelt es sich um mathematische Algorithmen, die zwei oder mehrere Teilmessfelder bestmöglich aneinander ausrichten [37]. Für das *Stitching* stehen viele aus unterschiedlichen Posen aufgenommene Punktwolken $\{P_1, \dots, P_n\}$ einer Objektoberfläche zur Verfügung, die jeweils in Bezug auf ein lokales Koordinatensystem definiert sind. Um die Punktwolken aus jedem Teilmessfeld in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen, müssen transformierten Punktwolken $\{P'_1, \dots, P'_n\}$ berechnet werden, damit die Teilmessfelder eindeutig zugeordnet werden können [38]:

$$P'_j = \mathbf{R}_j \cdot P_j + \vec{t}_j \quad P \in \{P_1, \dots, P_n\} \quad (1)$$

Hierbei ist P_j der Oberflächendatensatz der Punktwolke einer einzelnen gemessenen Ansicht, P'_j der transformierte Oberflächendatensatz, $\mathbf{R}_j(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ die zugehörige Rotationsmatrix und $\vec{t}_j(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ der zugehörige Translationsvektor. Der Ablauf der meisten *Stitching*-Prozesse kann in vier Schritte (siehe Bild 2) unterteilt werden: Merkmalsdetektion, Merkmalsab-

gleich, Bestimmung des Transformationsmodells, Resampling und Transformation der Teilmessfelder [39].

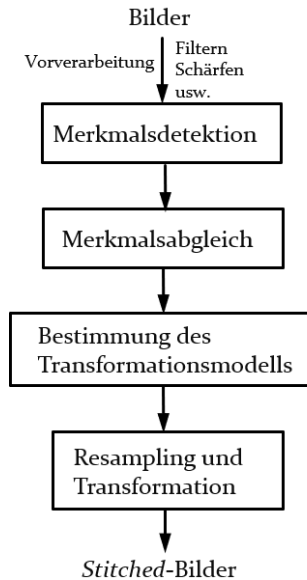


Bild 2: Ablauf des *Stitching*-Prozesses

Im ersten Schritt „Merkmalsdetektion“ werden die hervorstechenden Merkmale wie Kanten, Ecken, Konturen usw. manuell oder automatisch detektiert. Dabei werden diese Merkmale durch eine punktförmige Repräsentation wie Schwerpunkt, Zeilenenden oder markante Punkte dargestellt, die als Kontrollpunkte bezeichnet werden. Bei kommerziellen Systemen wird das durch den Bediener durchgeführt. Hierbei müssen Punkte, Linien oder Regionen in den verschiedenen Teilmessfeldern vom Bediener ausgewählt werden. Durch dieses manuelle interaktive *Grob-Stitching* der korrespondierenden Merkmale wird die Transformation berechnet und damit kann das Zusammenfügen der Messdaten umgesetzt werden. [38]

Weiterhin gibt es automatisiertere Prozesse, die Algorithmen statt des interaktiven Eingriffes des Bedieners nutzen, um die korrespondierenden Punkte, Linien oder Regionen in verschiedenen Teilmessbereichen zu finden. Diese Algorithmen zur Detektion der Merkmale können in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: flächenbasierte Algorithmen und merkmalsbasierte Algorithmen.

Bei den flächenbasierten Algorithmen verschmilzt der erste Schritt des *Stitching*-Prozesses, die Merkmalsdetektion, mit dem zweiten Schritt, dem Merkmalsabgleich. Die Implementierung dieser Algorithmen ist einfach.

Nachteilig ist die hohe rechentechnische Komplexität, weil für den Merkmalsabgleich die gesamte Information eines ausgewählten Bildausschnittes oder eines Bildes verwendet wird. Ebenso sind durch die Wahl der Form des Bildausschnittes (rund, rechteckig usw.) die Algorithmen beschränkt auf bestimmte Transformationstypen. Außerdem sind die Algorithmen wenig robust gegenüber Intensitätsänderungen durch Rauschen oder die Verwendung unterschiedlicher Sensortypen. [39]

Im Gegensatz zu flächenbasierten Algorithmen sind die merkmalsbasierten Methoden besonders zu empfehlen, wenn die Bilder genug signifikante und leicht zu detektierende Merkmale enthalten. Merkmalsbasierte Methoden sind besonders für Mehrsensordaten und für Messaufgaben mit Helligkeitsschwankungen geeignet, weil sie anstatt der direkten Nutzung der Bilddaten die Bildinformationen auf einem abstrakteren Niveau verwenden. Die punktförmigen Merkmale, beispielsweise die Ecken, können mit Hilfe des oft verwendeten Harris-Eckendetektors [40] identifiziert werden. [39] In [41] wurde ein Laplacian-Algorithmus vorgestellt, der den Eckendetektor-Algorithmus von Harris erweitert und skaleninvariant ist. Darauf basierend folgte die Entwicklung robusterer und skaleninvarianter Merkmalsdetektoren z. B. Harris-Laplace und Hesse-Laplace [42, 43]. Canny- oder auch Sobel-Kantendetektoren [44] werden oft zur Extraktion linienförmiger Merkmale, vor allem Kanten und Konturen, verwendet. Zur Detektion flächenhafter Merkmale wird die Segmentierung benutzt. Diese Methode basiert auf der Tatsache, dass die Zeichen von gaußschen und mittleren Krümmungen einen Satz von acht Oberflächenprimitive ergeben: die Spitze, die Grube, der Rücken, der Höhenrücken, das Tal, das Satteltal, die Ebene und das Minimum. [45]

Anschließend folgt im zweiten Schritt der „Merkmalsabgleich“. Dabei wird eine eindeutige Zuordnung zwischen den Merkmalen in unterschiedlichen Teilmessfeldern erstellt. Die Merkmalskorrespondenz zwischen den Teilmessfeldern wird etabliert. Das Ziel dieser zwei Prozesse ist die Näherungsberechnung der Transformationen (Rotation und Translation) für die Punktwolken. Zu den Algorithmen des Merkmalsabgleichs zählen Methoden, die räumliche Relationen nutzen [46, 47], und Methoden, die invariante Deskriptoren nutzen [48, 49], sowie Methoden, die auf Relaxationsverfahren [50], Pyramiden und Wavelets [51, 52] basieren.

Um die grobregistrierten Teilmessfelder bzw. Punktwolken fehlerminimiert aneinander ausrichten zu können, schließt sich der dritte Schritt „Bestimmung des Transformationsmodells“ an, der mittels verschiedener mathematischer Methoden erfolgen kann. Dabei werden der Typ und die Pa-

parameter der Projektionsfunktion bestimmt, welche die Transformation zwischen den Teilmessfeldern realisiert. Meist wird der Typ des Transformationsmodells durch Vorwissen z. B. die angenommene geometrische Verformung des Bildes, die erforderliche Genauigkeit der Registrierung und die Methode der Bildaufnahme definiert. Die Parameter der Projektionsfunktionen werden mittels der etablierten Merkmalskorrespondenz berechnet. Es haben sich Verfahren etabliert, welche auf dem *Iterative Closest Point* (ICP) Algorithmus beruhen [53, 54, 55]. Ziel des ICP Algorithmus ist die Bestimmung der Transformation zwischen den Teilmessfeldern. Auf Basis der Methode der kleinsten Quadrate werden durch sukzessive Iteration die Abstände über alle entsprechenden Punktpaare in Überlappungsbereich der Teilmessfelder berechnet. Die sechs Transformationsparameter (Δx , Δy , Δz , φ_x , φ_y , φ_z) müssen unter der Bedingung gefunden werden, dass die Summe aller Abstandsquadrate zwischen den entsprechenden Punktpaaren minimiert wird.

Im vierten Schritt „Resampling und Transformation“ können die Teilmessfelder unter Verwendung der Projektionsfunktion transformiert bzw. zusammengefügt und in diesem neuen Referenzkoordinatensystem interpoliert werden.

Es gibt auch Verfahren basierend auf der Frequenzdomain-Methode. Diese Methoden verwenden die Eigenschaften der Fourier-Transformation, um Rotation und Translation separat zu schätzen. Dies vereinfacht ein Problem mit sechs Freiheitsgraden in zwei Probleme mit drei Freiheitsgraden. [56].

2.3.2 Registrierung und Datenfusion

Zur Nutzung der Sensoren zur großflächigen Digitalisierung einer Oberfläche ist in der Regel noch ein Positioniersystem notwendig. Für klassische Tastschnittgeräte und optische Punktsensoren werden meist laterale Achsen zur Durchführung der axialen Scanbewegung eingesetzt. Bei den optisch flächig arbeitenden Sensoren wie Weißlichtinterferometern sind vertikale Achsen zur Durchführung der Scanbewegung gefordert sowie zusätzliche lateral bewegte Achsen für großflächigere Messungen vorgesehen.

Bei der Digitalisierung komplexer oder großflächiger Objekte kann die Messdatenaufnahme im Regelfall nicht in einer Ansicht erfolgen. Für Messgeräte mit kleinem Messvolumen oder eingeschränkter Messrichtung sind zusätzliche Koordinatenachsen oder Drehachsen nötig, um Messdaten aus

unterschiedlicher Ansicht zu erfassen und somit zu einem gesamten Datensatz komplexer oder großflächiger Objekte registrieren zu können [36].

Bei den meisten AFMs wird der Messbereich durch den Stellweg der Piezoaktoren, die zur Längenmessung verwendeten Sensoren sowie die mechanische Struktur beschränkt. Für großflächige Messungen mittels AFM bietet die Integration der AFMs in ein Positioniersystem eine Möglichkeit der Messbereichserweiterung. Optische Abstandssensoren für dreidimensionale Messungen in Koordinatenmessgeräten lassen sich in 1D-, 2D- und 3D-Sensoren einteilen. Für die optischen 1D-Sensoren wie Punktriangulation und die optischen 2D-Sensoren wie Lichtschnittverfahren werden Messergebnisse eingeschränkt jeweils eindimensional und zweidimensional geliefert. Durch den zusätzlichen Einsatz der Koordinatenmessgerätechsen oder Dreh-Schwenk-Einrichtungen können sie für dreidimensionale Messung geeignet sein. Für die Digitalisierung komplexer oder großer Oberflächen können die optischen 3D-Sensoren wie Streifenprojektion aufgrund der eingeschränkten Messrichtungen oder Messbereiche zusätzliche Linear- oder Drehachsen benötigen. [57] Normalerweise wird nach der Integration der verwendeten Sensoren in ein Positioniersystem abhängig von der Bauart entweder das Werkstück, der Sensor oder beide Elemente bewegt. Dabei ist die Position des verwendeten Sensors, beispielsweise eines taktilen Tastsystems oder einer CCD Kamera bei z. B. Weißlichtinterferometern im Maschinenkoordinatensystem durch Einmessen bekannt, was bei der Registrierung helfen kann.

Beispiele für Sensoren in Positioniersystemen für großflächige Messungen sind optische Abstandssensoren wie Fokussensoren, Punktriangulationstaster und Laserlichtschnittsysteme [58, 59] sowie taktile Sensoren wie AFM [60] und Fasertaster [61]. Daneben wird in [62] ein Streifenprojektionssystem vorgestellt, bei welchem das zu messende Objekt in einer rotatorischen Achse bewegt werden kann.

Kommerziell erhältliche Koordinatenmessgeräte mit Multisensorik, beispielsweise der Firma Werth, verbinden die Flexibilität mit hoher Genauigkeit und finden breite Anwendung für dimensionale Messungen, sowohl im Bereich der Fertigungskontrolle als auch bei der Erstbemusterung im Messraum. Der maximale Messbereich der Werth VideoCheck Gerätereihe liegt beispielsweise bei 1000 mm × 1000 mm × 600 mm. [61] Bei speziellen Ausführungen von Tastschnittgeräten zur Messung von Optiken werden laterale Achsen mit einer Drehachse zur Realisierung eines zylindrischen Koordinatensystems kombiniert [20].

Durch die Integration eines Sensorsystems in ein genaues Positioniersystem kann das Sensorkoordinatensystem auf die vorhandenen Achsen eingemessen werden. Dadurch kann eine Transformationsmatrix aus der Kenntnis der relativen Achsenbewegungen berechnet werden. Mit Hilfe der berechneten Transformationsmatrizen können die Teilmessbereiche in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden, auch ohne sich überlappende Teilmessbereiche.

2.4 Großflächige Topografiemessung mittels Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Forschung und Entwicklung. Sie ermöglicht eine flächenhafte Erfassung der Mikrotopografie von Bauteilen mit einer vertikalen Auflösung im Subnanometerbereich und einer lateralen Auflösung im Submikrometerbereich. Aufgrund des Messprinzips eignet sich das Verfahren besonders für die Messung glatter Oberflächen. Bei optisch rauen Oberflächen können Messabweichung in der Größenordnung der verwendeten Kohärenzlänge auftreten. [63]

Bei den Messungen mit einem WLI ist eine axiale Scanbewegung notwendig, z. B. angetrieben durch einen piezoelektrischen Aktuator, um die Objektoberfläche, das Objektiv oder das gesamte Mikroskop in axialer Richtung zu bewegen und einen Bildstapel zu erhalten. In diesem Fall wird der messbare Höhenbereich durch den Stellbereich des piezoelektrischen Aktuators begrenzt. Bei den meisten WLIs deckt der Piezoaktor zur Durchführung der Scanbewegung in axialer Richtung einen Arbeitsbereich im Submillimeterbereich bis Millimeterbereich ab. Der laterale Arbeitsbereich wird durch die Vergrößerung des Objektivs und die Größe des eingesetzten Kamerasensors vorgegeben. Die messbare Fläche kann durch die Verwendung eines Objektivs mit einer geringeren Vergrößerung vergrößert werden, aber dadurch wird die optische laterale Auflösung beeinträchtigt. Wenn die Abmessung der Messfläche das Sichtfeld des WLI überschreitet, muss eine Registrierung oder *Stitching* mehrerer, an benachbarten Positionen gemessener Flächen durchgeführt werden. Die meisten WLI-Systeme sind mit einem ungenauen Positioniersystem ausgestattet, um das Messobjekt in x - und y -Richtung zu bewegen und mehrere Flächen nebeneinander zu messen. Die exakte Verschiebung und Neigung zwischen den benachbarten Messfeldern kann dann nur mit Hilfe der Überlappungsbereiche der benachbarten Flächen ermittelt werden. Der Bezug zwischen den gemessenen Flächen kann also nur durch das in Abschnitt 2.3.1 bereits

beschriebene *Stitching* basierend auf Korrelationen in den überlappenden Bereichen hergestellt werden.

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Algorithmen für das *Stitching* erforscht, um große und komplex geformte Oberflächen, bei denen die Messdatenaufnahme nicht in einer Ansicht erfolgen kann, zu messen [64, 65, 66, 67]. Beispielsweise wird in [65] ein Algorithmus vorgestellt, welcher auf der Methode der kleinsten absoluten Werte basiert, um mehrere zylindrische Punktwolken, die mit dem WLI gemessen wurden, auszurichten und das *Stitching* durchzuführen. Die Bewertung des *Stitching*-Algorithmus erfolgte anhand mehrerer echter gemessener Punktwolken und numerisch simulierter Punkte. Dabei wurden die benachbarten Punktwolken verarbeitet bzw. zusammengefügt. Nachfolgend wurden die verarbeiteten Punktwolken mit den ursprünglichen Punktwolken verglichen. Auf diese Weise wurde die Leistung des vorgestellten Algorithmus für mehrere überlappende Bereiche bewertet und analysiert. Die Standardabweichung der Punktwolken mittels des *Stitching*-Algorithmus wird mit besser als 100 nm angegeben. [65] Bei einem weiteren Beispiel für eine optische Messung der Form mit dem WLI wird eine *Stitching*-Methode mittels Nutzung der Krümmung als lokale Eigenschaft des Profils angewendet. Die Krümmung einer sphärischen Linse mit einem Durchmesser von 130 mm und 91 Messpunkte mit einem Messpunktintervall von 1 mm wurde gemessen. Eine Messgenauigkeit von 0,16 μm wurde angegeben. [67]

Daneben gibt es Methoden, die auf einer geneigten Scantechnik (TSI engl. *tilted white light scanning interferometry*) basieren [68, 69, 70, 71]. Beispielsweise wird von *Olszak* eine Methode vorgestellt, bei der das Messobjekt von einem Messkopf mit einer geneigten Kohärenzebene und unter Verwendung einer lateralen Scanbewegung abgetastet wird. Dies ermöglicht Messungen mit höherer Geschwindigkeit, während die Messgenauigkeit beibehalten wird. Dabei ist es lediglich notwendig, in eine Richtung das *Stitching* durchzuführen. Weiterhin wird gezeigt, dass in der Neigungskonfiguration der Neigungswinkel einen entscheidenden Einfluss auf die Messgenauigkeit hat. Deshalb muss die Kalibrierung des Neigungswinkels aufwändig und exakt durchgeführt werden. [69] Ein seitlich abtastendes WLI mit „Selbstjustierung“ wurde von *Munteanu* vorgestellt, wobei aufgrund der Neigungskalibrierung die Messabweichung in der Signalverarbeitung gelöst werden konnte. Jedoch wird hier grundsätzlich die gleiche Methode verwendet wie in [69], um den Neigungswinkel des Positioniertisches zu kalibrieren. [72]

Von *Machleidt et al.* wurde ein Mirau-Weißlichtinterferometer in eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine integriert. Die Kombination des Weißlichtinterferometers mit dieser Maschine ermöglicht die Messung einer großflächigen Oberfläche ohne konventionelle *Stitching*-Methoden, die auf Algorithmen mittels Korrelation der Überlappungsfelder basieren. Durch die hochpräzise Positionierung der Maschine ist die Registrierung der Teilansichten realisiert. [73]

2.5 Großflächige Topografiemessung mittels Rasterkraftmikroskopie

Optische Verfahren sind in ihrer lateralen Auflösung durch die Beugungsgrenze eingeschränkt. SPMs konkurrieren bzw. ergänzen im Bereich der Nanometrologie mit einer lateralen und vertikalen Auflösung im Nanometer- oder Subnanometerbereich. Wie im Abschnitt 2.2.3 erwähnt, sind die AFMs eine Hauptgruppe der SPMs [3]. AFMs werden zunehmend für industrielle Zwecke eingesetzt und sind besonders wichtig für die Halbleiterindustrie und die Präzisionstechnik. Die Systemanforderungen sind oft eine hohe Auflösung bei gleichzeitig hoher Genauigkeit. Fortschritte in dieser Schlüsseltechnologie erfordern sowohl quantitative, dimensionelle Messungen mit Nanometergenauigkeit als auch Messungen über große Messbereiche. Zum Betrieb der AFMs werden typischerweise Piezoaktoren verwendet, die jedoch nur einen geringen Arbeitsbereich im Mikrometerbereich von beispielsweise $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m}$ bei einem Modell der Firma Nanosurf erreichen [74].

Außerdem erfordern die Entwicklungen der kommerziellen AFMs Kalibrierungen mittels zertifizierten Normalen, die wiederum mittels direkt rückführbarer Diffraktometrie, Interferenzmikroskopie oder metrologischen AFMs kalibriert werden [75]. Einige nationale Metrologieinstitute (NMI) besitzen metrologische AFMs mit Interferometer, wobei die Interferometer entweder für die direkte Messung und eventuell Positionssteuerung oder nur für die Kalibrierung anderer Positionssensoren verwendet werden [6, 76, 77, 78, 79, 80]. Die Längenmessung mit AFMs mit integriertem Laserinterferometer kann über die Laserwellenlänge direkt auf die Meterdefinition zurückgeführt werden. Die meisten AFMs haben einen begrenzten Scanbereich von mehreren zehn Mikrometern. Es ist von großer Bedeutung, dass der Messbereich bis zu einigen Millimetern erweitert wird, um die metrologischen Herausforderungen in verschiedenen Anwendungsfeldern zu erfüllen.

Für das AFM ist es oft nicht möglich, den Arbeitsbereich durch einfaches Erhöhen der Maße des Messgeräts zu erweitern. Meistens besteht das Positioniersystem eines AFMs aus Festkörperführungen und einem Piezoaktor als Antrieb. Die elastische Verformung der mechanischen Teile sowie der Stellweg der Aktoren begrenzen den Bewegungsbereich auf einige hundert Mikrometer. Der größte Messbereich des in der Literatur dargestellten AFM-Systems nur mit Piezoaktoren als Antrieb, das vom Eidgenössischen Institut für Metrologie der Schweiz (METAS) entwickelt worden ist, beträgt $380\ \mu\text{m}$ [81, 6, 80, 79, 82]. Dieses metrologische AFM besteht aus einer Kombination aus einem kommerziellen AFM (Dimension 3500 von *Digital Instruments*) mit einer Linearführung mit großer Länge, die durch Festkörpergelenke in einer Doppelparallelogramm-Bauweise realisiert wird. Der nominelle Bewegungsbereich wird durch einen Hebel um den Faktor 6 auf $380\ \mu\text{m}$ vergrößert. [80]

Außerdem gibt es auch Beschränkungen der verwendeten Sensoren zur Längenmessung, deren Auflösungen in Nanometerbereich oder Subnanometerbereich liegen müssen. Normalerweise können Sensoren wie z. B. kapazitive Sensoren, Differentialtransformatoren und Dehnungstreifen mit einem Messbereich von mehreren zehn Mikrometern diese Anforderung erfüllen. Wenn der Messbereich der Sensoren jedoch auf $1\ \text{mm}$ bis $10\ \text{mm}$ erweitert wird, wird deren Auflösung aufgrund der festen relativen Auflösung einige zehn oder einige hundert Nanometer betragen. Dadurch werden die Anforderungen an die metrologischen AFMs für einen großen Messbereich nicht erfüllt [83].

Eine Möglichkeit, den Messbereich des AFMs zu erweitern, besteht darin, es in ein Positioniersystem oder Mikro-Koordinatenmessgerät mit inkrementellen Wegmesssystemen zu integrieren. Normalerweise liegt der Arbeitsbereich eines Mikro-Koordinatenmessgeräts im Bereich von Millimetern bis zu wenigen Zentimetern. Die rückführbaren Messungen mit den für Mikrokomponenten praxistauglichen Arbeitsbereichen sind erst durch die Kombination der AFM-Sensoren mit Nanokoordinatenmessgeräten möglich [84]. Dadurch werden neben den Forderungen der Nanometrologie auch der mesoskalige Messbereich bedient.

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) entwickelte ein *Long-Range Atomic Force Microscope* (LR-AFM) auf Grundlage der NMM-1. Ein zweistufiges Konzept wird für die Bewegung des Messobjekts in z -Richtung umgesetzt, um sowohl einen großen Messbereich als auch eine hohe Messgeschwindigkeit zu erreichen. Die Bewegung erfolgt in x -, y -, z -Richtung und die durch die an der TU Ilmenau entwickelte und mittlerweile von

SIOS vertriebene NMM-1 mit einem Bewegungsbereich von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. Zur Erhöhung der Dynamik in z-Richtung wird ein auf den Messtisch der NMM-1 aufgesetzter, piezoelektrisch angetriebener, kapazitiv messender Messtisch mit einem Stellbereich von $2\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Der piezoelektrische Messtisch dient als Träger des Messobjektes, folglich sind die Größe und Gewicht des zu messenden Messobjektes begrenzt. Der kapazitive Sensor muss kalibriert werden, um die Messungen rückführbar durchzuführen. [85, 83]

Das *National Institute of Standards and Technology* (NIST) integrierte ein AFM in die *Molecular Measuring Machine* (M^3). Dadurch wird ein Messbereich von $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ mit einer Auflösung im Subnanometerbereich erreicht [86]. Die Position des Messobjektes in Richtung der x-Achse und die Position der Sonde in Richtung der y-Achse werden mit Interferometern gemessen. Die piezoelektrisch angetriebene Grob- und Feinpositionierung erfolgt in allen drei Achsen. In diesem System wird das Abbe-Prinzip nicht erfüllt. [87]

Ein AFM wurde in die *Sub-Atomic Measuring Machine* (SAMM) integriert, die gemeinsam von der *University of North Carolina in Charlotte* (UNC-Charlotte) und dem *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) entwickelt wurde. Dieses AFM verwendet eine piezoelektrische Röhre, um die Sondenspitze über eine Probenoberfläche zu führen. Als Messbereich wird $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ angegeben. Die Position der Sonde wird durch kapazitive Sensoren gemessen. [88]

Der *National Research Council Canada* (NRC) entwickelte ein metrologisches AFM mit einem der NMM-1 sehr ähnlichen Konzept. Die Bewegung des Messobjektes erfolgt durch einen mehrstufigen Positioniertisch, der die groben und feinen Bewegungen ermöglicht. Die Grobpositionierung ermöglicht einen Bewegungsbereich von $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ mit einer Auflösung des Encoders von 100 nm . Zur vertikalen Grobpositionierung werden drei kommerzielle Aktoren verwendet (*Physik Instrumente* M111.1 DG) mit einem Bewegungsbereich von 15 mm bei einer minimalen Schrittweite von 50 nm mit einer Auflösung des Encoders von 7 nm . Die Feinpositionierung und Scans in der lateralen Richtung werden von einem Messtisch mit einem Bewegungsbereich von $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ (*Physik Instrumente* P-734) durchgeführt. Mit Hilfe von den kapazitiven Sensoren in einem geschlossenen Regelkreis wird eine Positionsauflösung von $0,3\text{ nm}$ erreicht. Die Feinbewegung in der vertikalen Richtung wird durch eine Festkörperführung (*Physik Instrumente* P-753.11) mit einem Bewegungsbereich von $12\text{ }\mu\text{m}$ und einer Auflösung von $0,05\text{ nm}$ im geschlossenen Regelkreis ausgeführt.

Zum Messen der Position und Orientierung des Messobjekts werden Interferometer und Autokollimatoren verwendet. Dabei wird die Position nicht durch Rückkopplung von den Interferometern gesteuert, wodurch die Verwendung von kommerziell verfügbaren Bewegungstages und Controllern möglich ist. Das erweiterte Messvolumen beträgt $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$. [89]

Ein laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop (LiAFM) wurde als Anstastsystem für die NMM-1 entwickelt. Der kombinierte Lagedetektor mit einem Lichtzeiger und einem Interferometer ermöglicht die gleichzeitige Messung der Torsion, Biegung und Position des *Cantilevers*. Die NMM-1 führt bei der Messung die Scanbewegung in x -, y -, z -Richtung durch. Zusätzlich wird ein Piezoaktor für schnelle Bewegungen des *Cantilevers* in z -Richtung integriert, um die Messdynamik und den Messbereich des LiAFM zu erhöhen. Das Interferometer kann die Rückführbarkeit der Positionsmessung auf das Längennormal ermöglichen. [90]

2.6 Defizite

Aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bzw. den heutigen Messaufgaben und der dargestellten Messtechnik ist es ersichtlich, dass es noch eine Diskrepanz zwischen den heutigen Eigenschaften der Messsysteme und den Anforderungen gibt.

Durch die Entwicklung der Fertigungstechnik weisen die Bauteile oft ein komplexe, skalenübergreifende Gestalt auf. Die Messaufgaben sind geprägt von zunehmend sinkenden Strukturgrößen und zunehmender Miniaturisierung der Merkmale bei gleichzeitiger zunehmender Dimensionalität. Die Messung der Oberfläche der zu messenden Bauteile lässt sich oft nicht in einer Ansicht durchführen. Die Messdatenaufnahmen aus unterschiedlichen Posen ist unvermeidlich, um einen gesamten Datensatz für komplexe oder großflächige Objekte messen zu können.

Wie im Abschnitt 2.3.1 erwähnt, ist für die meisten *Stitching*-Prozesse typischerweise ein angemessener Überlappungsbereich notwendig, der mindestens 15 % bis 30 % der einzelnen Messbereiche beträgt, um den Einfluss der Linsenverzerrungen zu überwinden und genügend detektierbare Merkmale bereitzustellen. Das *Stitching* ist folglich sehr zeitaufwendig und eine zusätzliche Abweichungsquelle. Alle Unsicherheiten aus jedem *Stitching*-Schritt gehen als kumulative Abweichungen in das gesamte *Stitching*-Ergebnis ein. Die Auflösung der Ergebnisse des überlappenden *Stitching* ist von den Algorithmen abhängig.

Einige bisher für großflächige Topografiemessung entwickelte Weißlichtinterferometer-Systeme sowie prägnante metrologische AFMs wurden als Beispiele angegeben bzw. dargestellt. Bei den meisten WLIs basieren die Messungen der großen und komplex geformten Oberflächen noch auf unterschiedliche Algorithmen für das *Stitching*. Die meisten metrologischen AFMs wurden aus kommerziellen AFMs mit Piezopositioniersystemen modifiziert. Nach der Integration werden abhängig von der Bauart entweder das Werkstück, der Sensor oder beide Elemente bewegt. Nur bei den Systemen, bei denen das Werkstück bewegt wird, ist es möglich, das Abbe-Prinzip in allen drei Achsen zu realisieren. Dies ist ein wichtiges Merkmal der metrologischen AFMs [91].

Auf der Grundlage des Standes der Wissenschaft und der Technik wurden jeweils ein WLI-System und ein MAFM-System für großflächige Messung entwickelt.

3 Physikalisch-technische Grundlagen

3.1 Theoretische Grundlagen der Interferometrie

Am Ende des 19. Jahrhunderts schuf der Deutsch-Amerikaner Albert A. Michelson mit der Erfindung des Interferometers die Grundlagen für die interferometrische Messtechnik [92]. Die sich schnell entwickelnde Halbleitertechnik und Bildverarbeitungstechnik ermöglichte die Entwicklung einer hochauflösenden Topografieerfassung. In Systemen mit höheren Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit kommen fast ausschließlich Interferometer bei der Messung der physikalischen Größen, wie z. B. Länge, Winkel, Brechzahl und Wellenlänge, zum Einsatz [93]. Im Folgenden wird auf die Begriffe eingegangen, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind.

Ebene harmonische Wellen, die auch als transversalelektromagnetische Wellen bzw. TEM-Wellen bezeichnet werden, werden durch ihre zeitliche und räumliche sinusförmige Änderung der magnetischen und elektrischen Feldstärke charakterisiert. Die Lichtwelle kann als eine harmonisch fortlaufende Welle in der Darstellungsform von komplexen Zahlen beschrieben werden. [93]

$$E(\vec{r}, t) = A \cdot e^{\frac{j2\pi}{\lambda}(\vec{e}_k \vec{r} - ct + \varphi_0)} \quad (2)$$

Dabei ist E die elektrische Feldstärke, A die Amplitude, λ die Wellenlänge im Medium, φ_0 die Anfangsphase mit einem Faktor $\lambda/2\pi$, t die Zeit, c die Lichtgeschwindigkeit im Medium. Die Richtung des Vektors \vec{e}_k beschreibt die Ausbreitungsrichtung und der Vektor \vec{r} die Ortsposition.

Da die maxwellschen Gleichungen linear sind, kann für einen im Raum gegebenen Punkt $p(x, y, z)$ das Superpositionsprinzip zur Bestimmung der Feldstärke angewandt werden. Unter Superposition wird die ungestörte Überlagerung der Wellen verstanden. Das heißt, dass mehrere Lichtwellen sich überlagern können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Der gesamte Feldstärkevektor ergibt sich aus der Addition der Feldstärkevektoren der einzelnen Lichtquellen [93]:

$$\vec{E}_p(x, y, z; t) = \vec{E}_1(x, y, z; t) + \vec{E}_2(x, y, z; t) + \dots + \vec{E}_j(x, y, z; t) \quad (3)$$

Wenn sich zwei in derselben Richtung laufende ebene Wellen gleicher Polarisationsrichtung an einer bestimmten Stelle des Raumes überlagern, hängt die Gesamtfeldstärke des Wellenfeldes sowohl von den Amplituden

als auch von den Phasen der Teilwellen ab. Wenn der Gangunterschied Δz ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt (Gleichung (4)), addieren sich die Amplituden der beiden Wellen. Man nennt diese Verstärkung konstruktive Interferenz [93] (siehe Bild 3):

$$\Delta z = k \cdot \lambda \tag{4}$$

mit der Ordnungszahl $|k|=0, 1, 2, \dots, n$.

Wenn der Gangunterschied eine halbe Wellenlänge beträgt (Gleichung (5)), so löschen sich die beiden Wellen aus. Man spricht von destruktiver Interferenz [93] (siehe Bild 3):

$$\Delta z = (k + 0,5) \cdot \lambda \tag{5}$$

mit der Ordnungszahl $|k|=0, 1, 2, \dots, n$.

Ein Gangunterschied Δz entspricht einer Phasenverschiebung:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta z}{\lambda} \cdot 2\pi \tag{6}$$

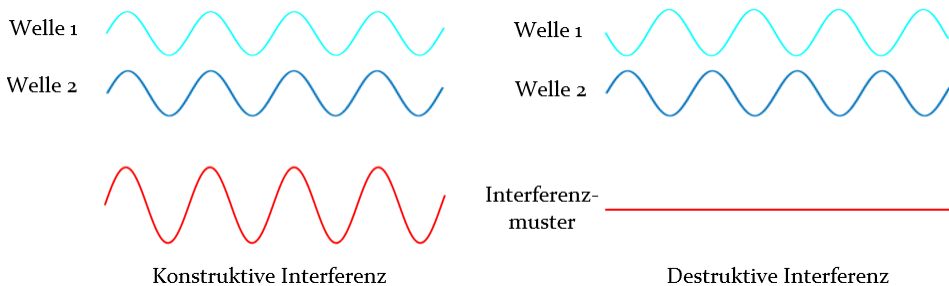


Bild 3: Konstruktive bzw. destruktive Interferenz [94]

Das Prinzip eines Interferometers besteht darin, einen Wellenzug mit sich selbst interferieren zu lassen. Dies kann durch Amplituden- oder Wellenfrontenaufspaltung geschehen. Interferenzmuster können nur entstehen, wenn die zeitliche sowie räumliche Kohärenzbedingung erfüllt ist, dass die elektromagnetischen Wellen der jeweiligen Lichtquellen also eine zeitlich und räumlich feste Phasenbeziehung zueinander aufweisen. [95]

Für TEM-Wellen bilden der elektrische Feldstärkevektor und der magnetische Feldstärkevektor und die Ausbreitungsrichtung ein orthogonales System [93, 96]. Betrachtet man nun ein kartesisches Koordinatensystem, in welchem der Wellenvektor entlang der z -Achse ausgerichtet ist, so ergibt sich für den elektrischen Feldstärkevektor durch die x und y Komponenten:

$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_x(z, t) \\ E_y(z, t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Substituiert durch Gleichung (2) ergibt sich [97]:

$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} A_x \cdot e^{\frac{j2\pi}{\lambda}(z-ct+\varphi_x)} \\ A_y \cdot e^{\frac{j2\pi}{\lambda}(z-ct+\varphi_y)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Die Zuordnung zu den einzelnen Arten polarisierten Lichts hängt dann von der relativen Phase $\varphi = \varphi_x - \varphi_y$ und dem Größenverhältnis von A_x und A_y ab. Die Polarisation ebener elektromagnetischer Wellen wird durch den Jones-Vektor repräsentiert. Der Jones-Vektor wurde nach R. Clark Jones benannt, der dieses Verfahren zur Polarisationsdarstellung im Jahr 1941 einführte [98]. Der Jones-Vektor kann dadurch gebildet werden, dass der zeitabhängige Vektor der Wellen durch einen zeitunabhängigen zweidimensionalen komplexwertigen Vektor ersetzt wird. Der Jones-Vektor lässt sich beschreiben mit [99]:

$$\vec{E}_z = \begin{bmatrix} A_x \cdot e^{j\varphi_x} \\ A_y \cdot e^{j\varphi_y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Die zeitunabhängige abstrakte Darstellung der Lichtwellen durch Jones-Vektoren ist sehr gut geeignet für die Berechnungen von polarisationsoptischen Zusammenhängen, und ist auch vorteilhaft insbesondere zur Analyse optischer Systeme, in denen ein Lichtstrahl eine Kaskade von optischen Bauelementen durchläuft [100, 101, 102, 103, 104]. Der Effekt eines optischen Bauelements auf die transmittierten Lichtwellen lässt sich durch eine komplexwertige 2×2 Matrix \mathbf{M} die als Jones-Matrix bezeichnet wird, beschreiben [103, 104]:

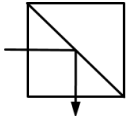
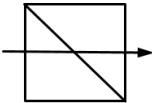
$$\vec{E}_{\text{aus}} = \mathbf{M} \cdot \vec{E}_{\text{ein}} \quad (10)$$

Die Wirkung der optischen Funktionselemente wird als eine lineare und homogene Operation angesehen. Durchlaufen die Lichtwellen ein System optischer Elemente mit Jones-Matrizen $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n$ so lässt sich der Gesamteffekt des optischen Systems durch eine Jones-Matrix beschrieben:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_n \quad (11)$$

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind einige typische Jones-Matrizen der idealen Funktionselemente zu sehen. [97]

Tabelle 1: Jones Matrizen idealer optischer Funktionselemente [97]

Optisches Funktionselement	Jones-Matrix
Polarisationsfilter für linear polarisiertes Licht	$\begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) & \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$
$\lambda/4$ Platte	$\sqrt{2} \begin{bmatrix} 0,5 + j \cdot (0,5 - \sin^2(\theta)) & j \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \\ j \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) & 0,5 - j \cdot (0,5 - \sin^2(\theta)) \end{bmatrix}$
Neutraler Strahlteiler	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Polarisierender Strahlteiler 	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
Polarisierender Strahlteiler 	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

Dabei ist θ (von der Matrix des Polarisationsfilters für linear polarisiertes Licht) der Winkel, um den die Polarisationsrichtung im mathematisch positiven Drehsinn aus der H -Stellung gedreht wird. Gemäß den Nomenklaturen in der Optik bezeichnen „ H “ und „ V “ jeweils Horizontal- und Vertikalorientierung in die x - und y -Richtung. Bei der Matrix einer $\lambda/4$ -Platte ist θ der Winkel zwischen der schnellen Achse der Platte und der x -Richtung. [105]

3.2 Grundlagen der Interferenzmikroskopie

Die Interferenzmikroskopie ist ein Messverfahren, das einen interferometrischen Strahlengang mit der mikroskopischen Abbildung kombiniert. Je nach Abbildungsmaßstab zwischen der Kamera und der zu messenden Oberfläche wird eine Einteilung in Interferenzmikroskop (Abbildungsmaßstab > 1) und Interferometer (Abbildungsmaßstab $= 1$) vorgenommen. [106] Dieser Abschnitt wird sich zunächst mit der grundlegenden Theorie

der optischen Interferenzmikroskopie beschäftigen und das Messprinzip darstellen. Monochromatische Phasenschiebeinterferometrie und Weißlichtinterferometrie (Kohärenz-Scanning-Interferometrie) sind zwei wichtige Varianten der Interferenzmikroskopie. Die monochromatische Phasenschiebeinterferometrie ist ein Verfahren, welches seit Mitte des 20. Jahrhunderts schon zur Messung verwendet wird, während Weißlichtinterferometrie erst seit Ende des 20. Jahrhunderts verwendet wurde. Die Weißlichtinterferometrie überwindet das Problem von Phasenmehrdeutigkeiten bei der monochromatischen Phasenschiebeinterferometrie und erweitert damit die Anwendungsgebiete der optischen Interferenzmikroskopie. [107]

3.2.1 Phasenschiebeinterferometrie

Die Phasenschiebeinterferometrie ist eine etablierte Technik für die Oberflächencharakterisierung, die auf der Digitalisierung der erfassten Interferenzdaten während einer kontrollierten Phasenverschiebung beruht und wird bei Interferometern und Interferenzmikroskopen eingesetzt. Dabei wird normalerweise eine monochromatische oder quasi monochromatische Lichtquelle eingesetzt [108]. Im Jahr 1966 wurde die zeitliche Phasenschiebeinterferometrie von Carré zum ersten Mal angewandt [109]. Zur Überprüfung optischer Oberflächen wurde sie von Burning im Jahr 1974 als erstes verwendet [110]. Von 1980 bis 1990 gab es durch den Fortschritt in der Informationstechnologie sowie die schnell entwickelte CCD-Technologie bedeutende Entwicklungen der automatisierten 3D-Messmikroskope nach den Prinzipien der Phasenschiebeinterferometrie [108].

Die generelle Funktionsweise der Phasenschiebeinterferometrie besteht darin, dass der Referenzstrahl mit dem an der zu messenden Objektoberfläche reflektierten Strahl überlagert wird und Interferenzen entstehen, welche von der zu messenden Oberfläche abhängig sind (Gleichung (4) und Gleichung (5)). Die Interferenzbilder werden durch eine Kamera sequentiell bei definierten Phasenverschiebungen des Referenzstrahls aufgenommen. Danach werden die Phaseninformationen jedes zu messenden Punktes an der Oberfläche durch Analyse des Interferogramms demoduliert. Darauf basierend können die Höheninformation von jedem zu messenden Punkt erhalten werden, die zur Darstellung der Topografie genutzt werden. Aufgrund der arctan- bzw. arctanz-Funktion und des Eindeutigkeitsbereiches sind die direkt aus den gemessenen Interferenzbildern ermittelten Phasenwerte verteilt zwischen $(-\pi, \pi)$ [111, 112]. Mittels *unwrapping* bei der Datenverarbeitung können die Phasendaten der einzelnen Pixel durch Subtraktion oder Addition von 2π ermittelt werden [113], um die In-

terferenzordnung zu bestimmen. Jedoch wird das *unwrapping* schwieriger und liefert dann keine korrekten Interferenzordnungen, wenn die absolute Phasendifferenz zwischen benachbarten Pixeln an den Stellen, an denen eine Diskontinuität bei der arctan-Funktion vorliegt, größer als π ist [111]. Deswegen ist die Phasendifferenz zwischen benachbarten Pixeln auf kleiner als π bzw. die Höhendifferenz auf kleiner als $\lambda/4$ begrenzt [114]. Aufgrund der Mehrdeutigkeit ist die Messung von hohen und steilen Kanten auf der Oberfläche nicht möglich [63]. Die Verwendung von zwei Wellenlängen und der resultierenden größeren synthetischen Wellenlänge kann diesen eindeutigen Bereich vergrößern [115, 116, 117].

3.2.2 Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie, die auch als niedrig kohärente Interferometrie bezeichnet wird, ist ein berührungsloses optisches Messverfahren, welches die Interferenz breitbandigen Lichts (Weißlicht) ausnutzt. Deshalb wird bei Änderung der optischen Wegdifferenz zwischen Mess- und Referenzarm die Intensität durch die Interferenz nur in einem sehr kleinen Bereich bei gleicher optischer Weglänge moduliert. Bei der Messung werden die Kamerabilder und die zugehörigen vertikalen Positionen während des vertikalen bzw. axialen Scans erfasst. Für jedes Kamerapixel wird die Abfolge der Interferenzintensität separat ausgewertet. Im Gegensatz zu der Phasenschiebeinterferometrie werden bei der Weißlichtinterferometrie die Höhenwerte des Messobjekts aus Hüllkurven der Interferenzfunktion ermittelt. Bei optisch ebenen Oberflächen können so Höhenauflösungen von 5 nm erzielt werden, während bei optisch rauen Oberflächen Messabweichung in der Größenordnung der verwendeten Kohärenzlänge des Lichts auftreten können [63]. Deshalb wird meist eine Kombination der Auswertung der Hüllkurven und der Phaseninformation bevorzugt, um eine bessere Auflösung zu erzielen. Je nach Aufbau werden drei Typen der am häufigsten verwendeten Interferenzmikroskope unterschieden (Bild 4): Mirau-, Michelson- und Linnik-Systeme [115].

Mirau-Interferenzmikroskopie

Die Mirau-Interferenzmikroskopie ist eine Variante der Interferenzmikroskopie, bei der ein Mikroskopobjektiv, ein halbdurchlässigen Strahlteiler und ein Referenzspiegel verwendet werden. Es wurde am 3. März 1949 von dem französischen Optiker André Henri Mirau zum Patent angemeldet. [118] Bild 4 (a) zeigt den Strahlengang der Mirau-Interferenzmikroskopie. Die Beleuchtung des Objekts erfolgt dabei durch das Objektiv hindurch, wobei der Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahlengang im Objektiv

gleich sind. Das Licht fällt von oben durch das Objektiv ein. Ein Teil des Lichtes durchläuft den halbdurchlässigen Strahlteiler und wird danach von der Oberfläche des Messobjekts gespiegelt. Der andere Teil des Lichtes, der vom Strahlteiler reflektiert wird, nimmt den Weg zum Referenzspiegel und wird von dort wieder zum halbdurchlässigen Strahlteiler reflektiert. [119, 120] Schließlich vereinigen sich der von der Messobjekttoberfläche reflektierte Strahl und der von dem Referenzspiegel reflektierte Strahl und gelangen überlagert zurück ins Objektiv. Das Objektiv bildet diese Überlagerung als Interferenz in das zur Beobachtung eingesetzte Okular oder eine Kamera ab. Bei der Mirau-Interferenzmikroskopie sind Mess- und Referenzarm sehr kurz und die Störungen gering. Der eingesetzte Referenzspiegel und Strahlteiler erfordern ein Objektiv mit großem Arbeitsabstand, was wiederum die numerische Apertur A_N begrenzt.

Michelson-Interferenzmikroskopie

Die Michelson-Interferometrie wurde im Jahr 1881 von dem Physiker Albert A. Michelson zunächst zur Messung der Lichtgeschwindigkeit entwickelt und nach ihm benannt. Bekannt geworden ist das Michelson-Interferometer durch das im Jahr 1887 von Michelson und Morley in Cleveland durchgeführte Michelson-Morley-Experiment zu den Messungen der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Raumrichtungen, um die Erdgeschwindigkeit relativ zu einem hypothetischen Lichtäther zu messen [115].

Bei der Michelson-Interferenzmikroskopie fungiert ein teildurchlässiges Prisma sowohl als Strahlteiler als auch als strahlvereinigendes Element (siehe Bild 4 (b)). Indem die einfallenden Strahlen im 45° Winkel auf die teildurchlässige Schicht treffen, werden sie durch Transmission bzw. Reflexion in zwei Teilstrahlen aufgespalten und nach der Reflexion an der Referenzoberfläche und Messobjekttoberfläche wieder zusammengeführt und können interferieren [121]. Eine derartige Strahlteileranordnung begrenzt den Arbeitsabstand. Deshalb eignet es sich nur für Systeme mit kleiner numerischer Apertur und größerem Arbeitsabstand. Die Vergrößerung des Objektivs bei der Michelson-Interferenzmikroskopie ist relativ gering.

Linnik-Interferenzmikroskopie

Die Grundkonfiguration bei der Linnik-Interferenzmikroskopie (Bild 4 (c)) ähnelt der Michelson-Interferenzmikroskopie. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass bei dieser Konfiguration die Strahlteilung im Parallelstrahl vor dem Objektiv erfolgt und ein zweites baugleiches Objektiv im Referenzarm erforderlich ist. Der Vorteil dieses Aufbaus ist die Möglichkeit zur Kompensation der chromatischen Dispersion und anderer optischer

Aberrationen. Da es keine anderen optischen Elemente zwischen dem Objektiv und dem Messobjekt gibt, kann bei der Linnik-Interferometrie ein Objektiv mit kleinem Arbeitsabstand und hoher Vergrößerung verwendet werden.

Vergleich der drei unterschiedlichen Interferenzmikroskope

Diese drei unterschiedlichen Interferenzmikroskope können entsprechend des Aufbaus nach Mirau, Michelson und Linnik unterschiedliche laterale Auflösungen erzielen [122, 123, 124, 125, 126]. Bild 4 stellt die Strukturen des Mirau-Interferenzmikroskops, des Michelson-Interferenzmikroskops und des Linnik-Interferenzmikroskops dar.

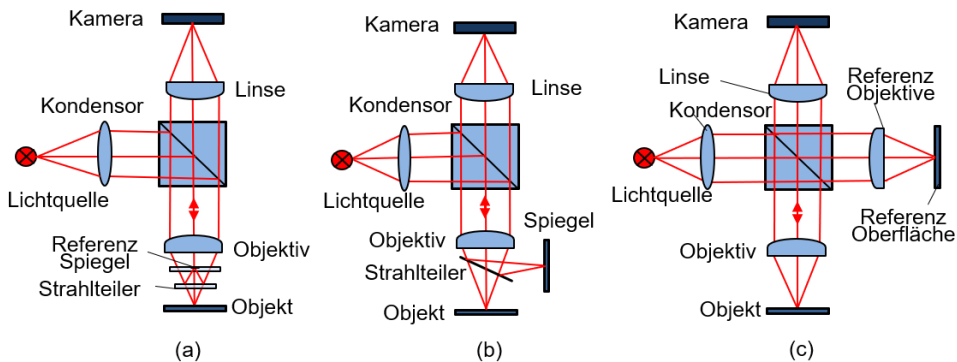


Bild 4: Drei unterschiedliche Interferenzmikroskope (a) Mirau-Interferenzmikroskop, (b) Michelson-Interferenzmikroskop, (c) Linnik-Interferenzmikroskop (nach [115])

Bild 4 (a) zeigt das Prinzip des Mirau-Interferenzmikroskops, bei dem die Interferometeranordnung vor dem Objektiv liegt. Struktur und Aberration des Objektivs haben keinen Einfluss auf die Interferenzkonfiguration. Jedoch kann bei einem System mit einer großen numerischen Apertur der Strahlteiler starke Aberrationen auslösen [119].

Beim Michelson-Interferenzmikroskop wird ein Strahlteiler zwischen dem Objektiv und dem Messobjekt eingefügt. Dies verringert den zur Verfügung stehenden Arbeitsabstand deutlich (Bild 4 (b)). Deshalb sind nur Objektive mit größerem Arbeitsabstand geeignet, so dass die Vergrößerung des Objektivs bei der Michelson-Interferenzmikroskopie relativ gering ist.

In einem Linnik-Interferenzmikroskop (Bild 4 (c)) sind zwei identische Mikroskopobjektive zu finden, wovon eines im Messarm, das andere im Referenzarm liegt. Die Verwendung von Messoptiken im Referenzarm, die im Wesentlichen die Messoptik im Messarm duplizieren, hat zur Folge, dass die chromatische Dispersion und andere optische Aberrationen sich kompensieren können. Dies erfordert in der Praxis eine perfekte Ausrich-

tung, Einstellung und der zwei vollkommen identischen Objektive, was jedoch schwer zu erreichen ist [127]. Beim Linnik-Interferenzmikroskop gibt es keine optischen Elemente zwischen dem Objektiv und dem Messobjekt im Messarm. Der Arbeitsabstand wird durch das Objektiv vorgegeben. Dies erlaubt einen sehr großen Arbeitsabstand oder eine sehr hohe Vergrößerung. Nachteilig wirken sich die aufwendige Justage, die hohen Kosten und die längeren Mess- und Referenzarme auf die Stabilität aus.

Tabelle 2: Überblick der spezifischen Merkmale der drei genannten Typen von Interferenzmikroskopen [128]

Typ	Objektive	numerische Apertur	Vergrößerung	Vorteile (+) und Nachteile (-)
Michelson	1	< 0,2	1~5	<ul style="list-style-type: none"> • relative geringe Vergrößerung • großes Bildfeld (+) • Strahlteiler begrenzt Arbeitsabstand (-) • keine zentrale Abdunkelung
Mirau	1	0,25~0,55	10~50	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Vergrößerung • zentrale Abdunkelung (-) • begrenzte numerische Apertur • niedrige Empfindlichkeit gegen Störung (+)
Linnik	2	~0,96	100~200	<ul style="list-style-type: none"> • große numerische Apertur • hohe Vergrößerung (+) • Strahlteiler begrenzt nicht Arbeitsabstand (+) • angepasste Objektive • Schwingungsempfindlich (-)

In Tabelle 2 sind die spezifischen Merkmale der drei genannten Typen von Interferenzmikroskopen zu sehen. Die Vergrößerung und die numerische Apertur beim Linnik-Interferenzmikroskop sind am größten. Jedoch ist das Linnik-Interferenzmikroskop schwingungsempfindlich, sodass steife Strukturen notwendig sind, um Vibrationen zu vermeiden. Ein Michelson-Interferenzmikroskop erfordert einen großen Abstand vor dem Objektiv. Das Mirau-Interferenzmikroskop besitzt eine mittlere Vergrößerung und numerische Apertur mit kompaktem Aufbau.

Demodulationen der Interferenzsignale

Aufgrund der Fortschritte der Rechentechnik hat sich in den letzten Jahren die scannende Weißlichtinterferometrie schnell entwickelt. Sie kommt zur Anwendung in Bereichen wie der Oberflächencharakterisierung, der Bestimmung von Dünnschichtkonstanten, der Bestimmung der Position der Oberflächen und der Fourier-Spektroskopie [129]. Die ermöglichten messbaren Abmessungen der Profile von Strukturen betragen zwischen einigen Mikrometern und einigen Zentimetern.

Die Mirau-Weißlichtinterferometrie wird am häufigsten verwendet, da diese im Vergleich zu einem Linnik-Aufbau leichter zu justieren und unempfindlicher gegen Vibrationen ist. Im Vergleich zu einem Michelson-Aufbau kann der Mirau-Aufbau auch bei geringen Arbeitsabstand integriert werden und ermöglicht eine höhere Vergrößerung. Bei der Messung wird das Messobjekt, das Objektiv oder das gesamte Mikroskop in axialer Richtung verfahren. Dabei variiert der Weglängenunterschied zwischen Mess- und Referenzarm des Interferenzmikroskops und wird als Interferenzsignal moduliert.

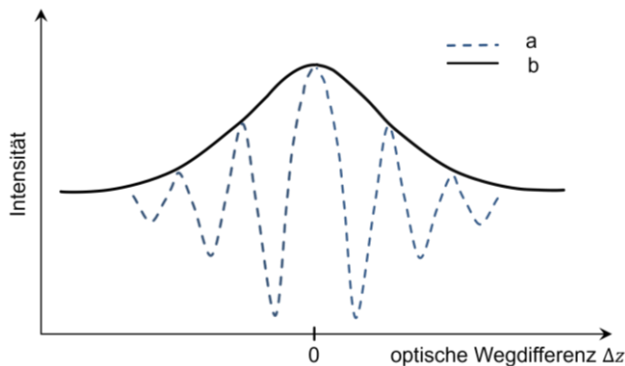


Bild 5: Schematische Darstellung eines Korrelogramms (a) und einer Einhüllenden (b) der Weißlichtinterferometrie [128]

Während der Bewegung bzw. des axialen Scans wird mit dem Kamerasensor ein Bilderstapel aufgenommen, der für jeden einzelnen Objektpunkt separat ausgewertet wird. Die Abfolge der Intensitäten desselben Objektpunktes in dem entsprechenden Pixel des Bilderstapels ergibt ein Interferogramm. Die genaue Form der Intensitätseinhüllenden hängt von dem Spektrum der verwendeten Lichtquelle und dem Messobjekt ab. Bild 5 zeigt eine schematische Darstellung eines Korrelogramms und dessen Einhüllende. Die Intensität des Signals nimmt deutlich ab, wenn die optische Wegdifferenz zwischen Mess- und Referenzarm Δz wesentlich größer als

die Kohärenzlänge wird. Das Interferenzsignal eines Objektpunktes weist eine maximale Intensität auf, wenn die optische Wegdifferenz Δz null ist. Diese Position wird als Höheninformation der zu messenden Oberfläche verwendet. Daher entspricht die Höhendifferenz von zwei beliebigen Punkten auf der Oberfläche der Scanpositionsänderung (siehe Bild 6, Punkt A und Punkt B).

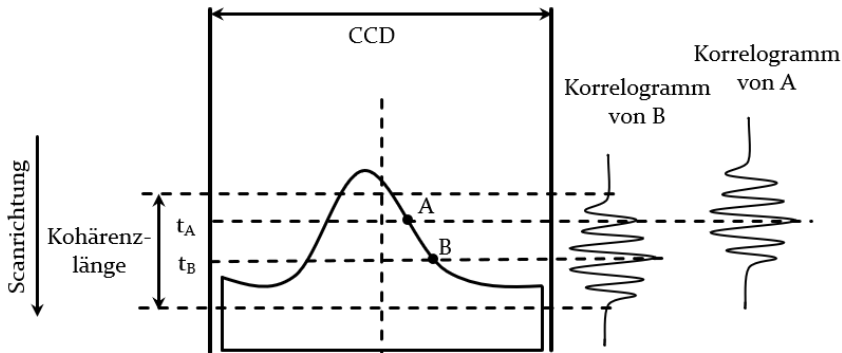


Bild 6: Schematische Darstellung der Korrelogramme der unterschiedlichen Punkten auf der Messobjektoberfläche während eines Scans [130]

Eine CCD-Kamera wird verwendet, um Signale in der Form von Interferenzintensitäten zu erfassen. Das Interferenzsignal wird dann im Computer verarbeitet, um die Hüllkurven der Korrelationsfunktionen zu extrahieren und die jeweiligen Stellen des Maximums der Hüllkurven zu detektieren. Die Amplitude des Interferenzsignals nimmt infolge der kurzen Kohärenzlänge von nur wenigen Mikrometern sehr schnell ab. Die vom Detektor übermittelte Signalintensität lässt sich beschreiben durch [131]:

$$I = I_{\text{obj}} + I_{\text{ref}} + 2 \sqrt{I_{\text{obj}} I_{\text{ref}}} |\gamma \Delta z| \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda_{\text{eff}}} \Delta z + \phi_0 \right), \quad (12)$$

Wobei I_{obj} die Intensität des Messstrahls und I_{ref} die Intensität des Referenzstrahls ist. Δz ist die optische Wegdifferenz. $\gamma \Delta z$ ist die zeitliche Kohärenzfunktion. λ_{eff} ist die effektive Wellenlänge. ϕ_0 ist die Anfangsphase. Die Raumfrequenz von Interferenzstreifen ist von der Struktur der zu messenden Oberfläche und der zur Auswertung verwendeten Wellenlänge λ_{eff} abhängig. Die Phasenanalyse der Interferenzsignale bei einer längeren λ_{eval} , die einer längeren effektiven Wellenlänge λ_{eff} entspricht, ermöglicht eine bessere laterale Auflösung der Topografiemessungen. Eine längere effektive Wellenlänge λ_{eff} resultiert aus einer höheren numerischen Apertur und einem höheren Einfallswinkel des Messtrahls. [131]

Die Information des Höhenprofils $z(x, y)$ des Prüflings muss für die Messung extrahiert werden. Das Maximum der Hüllkurve des Korrelogramms

ist an der Position, bei der die optische Wegdifferenz null ist. Diese Position des Maximums unterscheidet sich in der Regel für jeden Oberflächenpunkt und ist von der Topografie des Messobjekts abhängig. Die typischen Abstandintervalle der Kameraaufnahmepositionen liegen zwischen 50 nm bis 100 nm [132]. Die Detektion der Hüllkurve umfasst unterschiedliche Methoden, um den Träger des modulierten Signals zu entfernen und die Hüllkurve des Signals zu erhalten [119, 132, 133]. Die Extraktion des Maximums des Korrelogramms geschieht meist mit der sogenannten Phasenschiebe-Methode [134, 135, 136, 137, 138], dabei gibt es viele verschiedene Algorithmen zur Phasenauswertung, welche bei der herkömmlichen Phasenschiebeinterferometrie verwendet werden [126, 139, 140] sowie die Auswertung der Phase aus der Fourier-Transformation [141, 142]. Es kann eine Höhenauflösung von < 1 nm erreicht werden.

Die Algorithmen werden hauptsächlich in zwei Kategorien unterteilt, die jeweils auf dem Frequenzbereich oder dem Ortsbereich basieren. Die Algorithmen in Ortsbereich sind typischerweise Zentroidalgorithmen [143], Polynomanpassung [144], Interpolation [145] und Hilbert-Transformationsalgorithmen [119, 146]. Im Frequenzbereich gibt es Algorithmen wie Fourier-Transformationsalgorithmen [147, 148], Wavelet-Analyse [149, 150] und Algorithmen in der Raumfrequenzdomain [151, 152, 153]. Die Algorithmen im Ortsbereich sind schneller, jedoch gleichzeitig mit relativ niedriger Auflösung. In den vergangenen Jahren wurde die Kombination der Hüllkurve und der Auswertung der Phasendaten bevorzugt, um eine höhere Auflösung und eine geringe Störanfälligkeit zu erzielen [140, 154, 155].

3.3 Grundlagen der AFMs

Das AFM gehört zur Gruppe der SPMs, die Bilder einer Oberfläche nicht durch optische oder elektronenoptische Abbildung, sondern durch Wechselwirkung einer physischen Sonde mit dem Messobjekt erzeugen. Durch ständige Weiterentwicklung dieser Technik können damit neben reiner Topografieabbildung mittlerweile vielfältige Oberflächenbeschaffenheiten wie elektrische, magnetische, biologische, chemische, oder tribologische Eigenschaften ermittelt werden [156].

Im Jahr 1986 stellten G. Binnig und C. F. Quate das AFM vor, welches auch Messungen an nicht-leitenden Objekten gestattet [25]. Sein englischer Name "*atomic force microscope*" spielt auf die Wechselwirkung auf atomarer Ebene zwischen Antastspitze und Messobjekt an. Die bei Annäherung und Kontakt zwischen *Cantilever*-Spitze und Messoberfläche auftretenden Wechselwirkungen besitzen eine komplexe und nichtlineare Natur. Die

auftretenden Kräfte variieren je nach Umgebungsparametern (z. B. Temperatur, Luftfeuchte), Materialpaarung, Geometrie und dem umgebenden Medium wie Luft und Wasser oder einem Vakuum [157, 158, 159].

Diese Wechselwirkungen können durch das Lennard-Jones-Potential beschrieben werden [159]. Die wirkenden Kräfte bei der Interaktion von *Cantilever*-Spitze und Messoberfläche lassen sich in kurz- und langreichweitige Kräfte unterscheiden, nämlich die anziehend wirkende Van-der-Waals-Kraft und die abstoßend wirkende Pauli-Kraft (durch die sich überlappenden Elektronenorbitale). Die Pauli-Kraft wirkt auf kleinere Distanzen als die Van-der-Waals-Kraft. Typischerweise ist die Van-der-Waals-Kraft über einen Abstand von 100 nm aktiv und deren Potential bewegt sich im Bereich von 30 eV beziehungsweise 10 nN. [160]

3.3.1 Funktionsprinzip

Vereinfachend kann man sich ein AFM ähnlich einem Tastschnittgerät vorstellen, welches das Messobjekt mit einer sehr scharfen Spitze abrastert. Die Antastspitze am Ende eines fotolithografisch hergestellten Biegebalkens (*Cantilever*) wird über das Messobjekt geführt (Bild 7). Die Kraftwirkung zwischen der Antastspitze und dem Messobjekt, die von dem Abstand zwischen der Antastspitze und dem Messobjekt abhängig ist, wird während der lateralen Scanbewegung detektiert. Durch die Wechselwirkung zwischen der Oberfläche und der Antastspitze wird der *Cantilever* ausgelenkt.

Ein einseitig befestigter *Cantilever* bzw. Biegebalken mit einer scharfen Antastspitze an seinem freien Ende, der üblicherweise aus Silizium oder Siliziumnitrid hergestellt wird [161], dient als Hauptkomponente eines AFMs. Meistens besitzt ein *Cantilever* eine Länge von 100 μm bis 300 μm , eine Breite von 10 μm bis 30 μm und eine Dicke von 0,5 μm bis 3 μm , was zu einer Federkonstante zwischen 0,01 N/m und 100 N/m führt. [162]

Während der Messung mit dem AFM werden die Messwerte punktweise aufgenommen. Um die gesamte Oberflächentopografie abzubilden, sind linienförmige Scanbewegungen (Bild 7 (a)) über die Oberfläche erforderlich. Durch Überwachung der Relativbewegung zwischen Antastspitze und Messobjekt bei jedem Scan über die Oberfläche werden Linienprofile erzeugt, die später zur Topografie der Oberfläche (Bild 7 (b)) zusammengeführt werden. Zur Erzeugung der lateralen Scanbewegung bzw. vertikalen Stell- und Nachföhrbewegung werden üblicherweise Piezoaktoren verwendet.

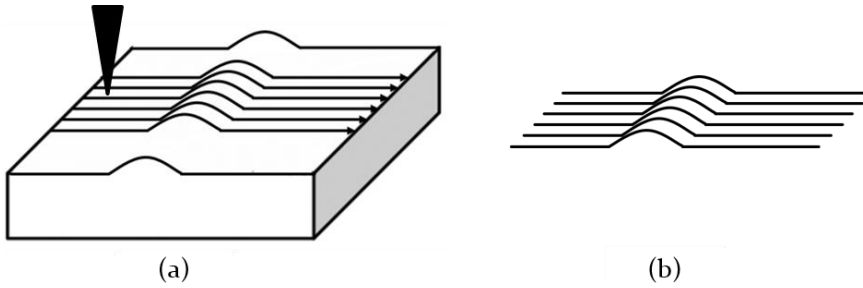


Bild 7: Arbeitsprinzip eines AFM

3.3.2 Betriebsarten

Der *Cantilever*, der als Sonde fungiert, tastet zeilenweise die Oberfläche ab. Sein statisches oder dynamisches Verhalten ändert sich bei der Annäherung an die Messoberfläche. Der *Cantilever* kann als einseitig eingespannter dreidimensionaler Balken modelliert werden [163], bei dem es statisch hauptsächlich zwei mögliche Verformungsarten die Biegung und Torsion gibt. Bei Messkräften in unterschiedliche Richtungen treten diese unterschiedlichen Verformungsarten auf (Bild 8). Je nach Betriebsart dominieren repulsive oder attraktive Kräfte und werden als Wechselwirkung verwendet [164]. In welchem Modus das AFM betrieben wird, ist von Bediener, Ausrüstung und Messaufgabe abhängig.

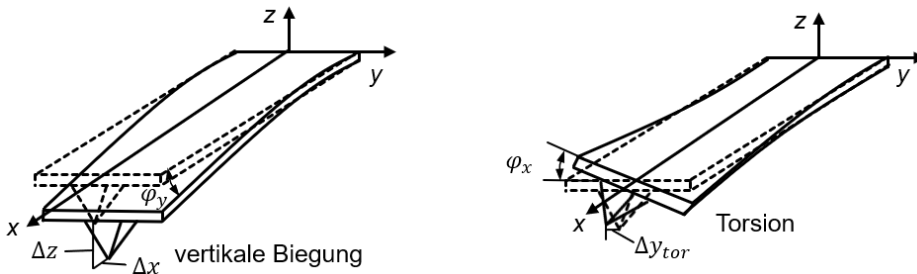


Bild 8: Verformungstypen

Für die Messungen im Kontakt-Modus (CM von engl. *Contact-Mode*) werden *Cantilever* mit geringeren Federkonstanten k_c (typischerweise zwischen 0,01 N/m und 5 N/m) verwendet, um das zu messende Objekt nicht zu beschädigen [159]. Im Kontakt-Modus dominieren die repulsiven Kräfte (Bild 9), die zur Kraftmessung genutzt werden. Die Berührung zwischen der Antastspitze und der zu messenden Oberfläche führt zur elastischen Deformation des *Cantilevers*, die proportional zu den auf ihn wirkenden Kontaktkräften ist. Die Proportionalität zwischen der wirkenden Kraft F

und der auftretenden Auslenkung Δz des *Cantilevers* kann durch die Federkonstante des *Cantilevers* beschrieben werden. Die Auslenkungen können durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben werden [165]:

$$F = k_c \cdot \Delta z \quad (13)$$

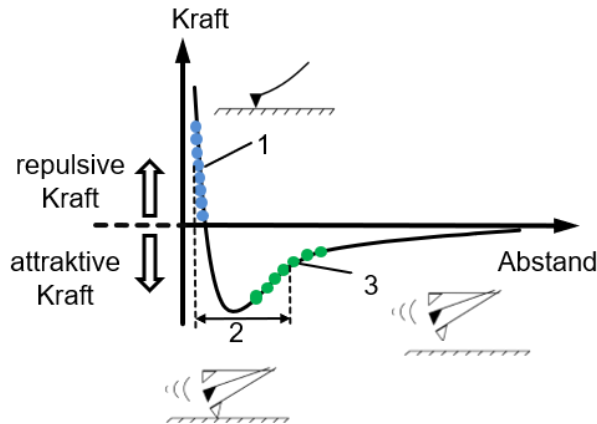


Bild 9: Wechselwirkungskräfte (Abstands-Kraft-Kurve) für die Betriebsarten: 1 CM, 2 IM, 3 NCM [91, 166]

Im Kontakt-Modus kann mit zwei unterschiedlichen Betriebsarten gemessen werden, nämlich konstante Höhe und konstante Kraft. Im Betriebsmodus konstanter Höhe wird das Messobjekt durch eine Antastspitze abgerastert, wobei die Rasterbewegung in einer zur messenden Oberfläche nahezu parallelen Ebene durchgeführt wird. Die vertikale Biegung des *Cantilevers* bzw. Auslenkung der Antastspitze aufgrund der Unebenheit der Oberfläche wird wie bei einem Tastschnittgerät direkt als die topografische Information der Oberfläche des Messobjekts verwendet, was zu einer hohen Scangeschwindigkeit führt. Aufgrund der begrenzten Biegung und schnellen Zerstörung des *Cantilevers* bzw. der Antastspitze ist dieser Arbeitsmodus auf sehr flache Oberflächen beschränkt. Um diese Einschränkung zu umgehen, kann der *Cantilever* im Arbeitsmodus konstanter Kraft betrieben werden. Hierbei wird die Auslenkung des *Cantilevers* während der Abtastung durch einen Regelkreis konstant gehalten. Anhand des nachgeführten Wegs und der verbleibenden Auslenkung der Antastspitze kann die Höheninformation der Oberflächentopografie erhalten werden. Im Kontakt-Modus weist die Kraft-Abstand-Kurve bei Annäherung nach dem Snap-In einen großen Kraftanstieg auf. Die Auflösung von atomaren Strukturen ist im CM nicht möglich. [160]

Für die Messungen in einem dynamischen Modus werden steifere *Cantilever* mit höheren Resonanzfrequenzen (ab 20 kHz) verwendet [160, 167].

Cantilever mit höheren Resonanzfrequenzen werden auch für Messungen mit höherer Scangeschwindigkeit benötigt [160]. Bei den Messungen im Nicht-Kontakt-Modus (NCM von engl. *Non-Contact-Mode*) dominieren die attraktiven Kräfte und der *Cantilever* wird mit einer Anregung in der Nähe seiner Resonanzfrequenz zur Schwingung angeregt, wobei die Interaktion zwischen dem oszillierenden *Cantilever* und der Messoberfläche zur Messung genutzt wird [168]. Je nach Art der Interaktion wird zwischen „echtem“ NCM und dem *Intermittent*-Modus (IM) bzw. Tapping-Modus unterschieden. Der NCM erfolgt im Vakuum und stellt hohe Ansprüche an die Größe der Schwingbewegung aufgrund der geringeren Empfindlichkeit der Kennlinie im attraktiven Bereich. Beim NCM gibt es keine Berührung zwischen der Antastspitze und der Messoberfläche, während beim IM ein zeitweiser Kontakt stattfindet. Bei der Annäherung an die Oberfläche variieren die Wechselwirkungskräfte zwischen Antastspitze und Oberfläche, was zur Dämpfung der Amplitude und zur Verschiebung der Frequenz führt. Abhängig von der Regelungsart wird jeweils die Dämpfung der Amplitude bei der Amplitudenmodulation (AM) oder die Verschiebung der Frequenz bei der Frequenzmodulation (FM) als Regelgröße verwendet. [160]

Bei der Amplitudenmodulation wird der *Cantilever* in der Nähe seiner Resonanzfrequenz f_0 zu einer Schwingung mit konstanter Amplitude A_0 angeregt. Bei Annäherung an die Messoberfläche wird die Amplitude gedämpft. Die Dämpfung der Amplitude ist vom Abstand zwischen der Antastspitze und der Oberfläche abhängig. Bei der Messung wird die Amplitude innerhalb eines geschlossenen Regelkreises konstant gehalten. Bei der Frequenzmodulation kann die Verschiebung der Frequenz durch die Annäherung an die Oberfläche des *Cantilevers* direkt verfolgt werden. [160]

Die Änderung der Regelgröße erfolgt bei beiden Betriebsmodi nicht zeitgleich mit der Änderung des Abstands zwischen *Cantilever*-Spitze und Oberfläche, sondern mit einer gewissen Latenzzeit. Bei der Amplitudenmodulation ist der Zeitabstand $t_{AM} \sim 2Q/f_0$ [169, 170] durch die Resonanzfrequenz f_0 und den Gütefaktor Q ($Q > 1$) bestimmt, während bei der Frequenzmodulation der Zeitabstand definiert wird als $t_{FM} \sim 1/f_0$. Dadurch ist ersichtlich, dass die mögliche Messgeschwindigkeit beim FM-Modus deutlich höher als im AM-Modus ist. Der FM-Modus wird bevorzugt für Messungen im Vakuum eingesetzt. [160]

Während das erste AFM ein STM verwendete [25], um die Auslenkung des *Cantilevers* zu detektieren, wurden nachfolgend unterschiedliche Techniken zu diesem Zweck entwickelt. Im Vergleich zu den nicht-optischen

Messprinzipien wie der kapazitiven, piezoresitiven und piezoelektrischen Detektion werden zur Erkennung der Biegung und Torsion des *Cantilevers* meist optische Strahlablenkungssysteme verwendet [171]. Mit Fokus-Sensor-Detektionssystemen und interferometrischen Detektionssystemen kann die Position des *Cantilevers* gemessen werden. Messungen mit einem Laserinterferometer können prinzipiell über die Laserwellenlänge direkt auf die Meterdefinition zurückgeführt werden.

4 Integration eines WLI in die NMM-1

Das für diese Arbeit verwendete WLI kann eine Punktdichte von 1000×1000 Punkten pro Messbereich in einer Messsequenz erzeugen und flächige Bereiche entsprechend der Bildsensorgröße und der Vergrößerung des Objektivs innerhalb einer kurzen Zeit von einigen Sekunden erfassen. Um die Fähigkeiten des WLI voll auszuschöpfen, wurde das Sensorsystem in das Nanopositionier- und Nanomesssystem NMM-1 integriert.

In diesem Kapitel werden die Einmessstrategie und die daraus resultierenden Transformationen der gemessenen Punktwolken für großflächige Messungen mittels des WLI dargestellt. Die metrologischen Eigenschaften der Kombination von WLI-Sensor und NMM-1 hinsichtlich des Messrauschens, der Ebenheitsabweichung, der Skalierung und der Linearitätsabweichung, des Verstärkungskoeffizienten und der Rechtwinkligkeit der Achsen müssen charakterisiert. Durch die Integration des WLI in die NMM-1 kann der Bezug zwischen den benachbarten Teilmessbereichen mit Hilfe der Positionsmessdaten des Koordinatensystems der NMM-1 ohne überlappende Messfelder hergestellt werden. Die Fusion der Daten der Teilmessbereiche erfordert eine eindeutige Transformationsbeschreibung der Koordinatensysteme des WLI-Sensors und der NMM-1 zueinander. Die Orientierung des WLI-Sensors zum Koordinatensystem der NMM-1, die Verdrehung um die z -Achse sowie die Neigung um die x -Achse und y -Achse müssen hierfür kalibriert und bei den großflächigen Messungen berücksichtigt werden.

4.1 Systemaufbau

Das eingesetzte Nanopositionier- und Nanomesssystem NMM-1 wurde an der Technischen Universität Ilmenau am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik in Zusammenarbeit mit der Firma SIOS Meßtechnik GmbH entwickelt und stetig verbessert [34].

Die fundamentalen und innovativen Konzepte der NMM-1 sind die dreidimensionale Realisierung des Abbe-Prinzips, die Parallelmetrologie mit hochgenauem Referenzkoordinatensystem, sehr kurze Rückführungsketten auf Definition des Meters mittels Interferometer, stabile und ausdehnungsarme Messkreise und ein geringer Wärmeeintrag durch Mess- und Positioniersysteme [172, 173]. Die NMM-1 fällt in die Klasse der Nanokoordinatenmessgeräte und verfügt über ein Positionier- und Messvolumen von $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Eine Spiegelecke, die zum Tragen des zu messenden Objekts und zur Realisierung der Parallelmetrologie [173] verwendet

wird, wird durch ein serielles dreiachsiges Antriebssystem positioniert. Ein Kompensationssystem kann die Kompensationskraft an unterschiedliche Messobjektmassen sowie verschiedene Auflage- und Schwerpunkte des Messobjektes anpassen. Die Kompensation wird vor der Messung durchgeführt, damit kein zusätzlicher Wärmeeintrag während der Messung entsteht. Die Position der Spiegelecke wird mit drei Homodyninterferometern gemessen, die mit drei frequenzstabilisierten He-Ne-Lasern für drei Bewegungsachsen gespeist werden. Damit kann die Rückführbarkeit der mit dem Gerät erhaltenen Messergebnisse sichergestellt werden.

Nach dem Einbau der Messspiegelecke und der Justage der Winkellage der Interferometer werden die Messstrahlen der drei Interferometer auf einen gemeinsamen Schnittpunkt justiert. Die Messspiegelecke besitzt eine Transmission von ca. 4 % und ermöglicht durch die nahezu senkrechte Strahlausrichtung zur Spiegelfläche einen nicht gebrochenen bzw. versetzten Strahlverlauf. Diese Teilstrahlen werden auf eine schräg stehende Lochblende mit einem Durchmesser von 2 mm geleitet. Die Flächennormale der Blende befindet sich unter einem gleich großen Winkel zu jedem Messstrahl, sodass jeder der drei Strahlen die Blende durchlaufen kann. Zuerst wird die Blende lateral auf den z-Strahl durch Maximieren der hinter der Blende erfassten Lichtleistung ausgerichtet. Die vertikale Position des Abbe-Punktes wird durch die Geometrie des Blendenbauteils vorgegeben. Anschließend erfolgt die Justage des Parallelversatzes der Strahlen des x- und y-Interferometers mit kippbaren Planparallelplatten jeweils ebenfalls durch Maximieren der hinter der Blende erfassten Lichtleistung. Der seitliche Versatz der Messstrahlen zum idealen Strahlschnittpunkt kann auf einen Wert von $\leq 0,1$ mm justiert werden. [174] Dadurch kann der Aufbau das Abbe-Prinzip in allen drei Achsen erfüllen, insofern auch die Antastung des Messobjektes in diesem Punkt erfolgt. Dieser Punkt (oft als Abbe-Punkt bezeichnet) sollte der Arbeitspunkt des integrierten Sensors sein, der durch eine Zerodurplatte (Bild 12 (a)) fest am ausdehnungsarmen Metrologierahmen installiert wird. Dies bewirkt, dass das systematische und zufällige Kippen der Führungselemente des Antriebssystems nicht zu sogenannten Abweichungen erster Ordnung führen.

Die interferometrischen Messergebnisse werden für die Positionsregelung der Spiegelecke verwendet, um die translatorischen Führungsabweichungen der Linearführungen zu kompensieren. Durch die Verwendung von zwei optischen Autokollimatoren an den x- und y-Achsen werden auch Winkelabweichungen des Führungssystems gemessen. Ein zusätzliches Winkelregelungssystem, das die vier z-Achsen-Antriebe verwendet, kompensiert die gemessenen Winkelabweichungen um die x- und y-Achse. Das

Positioniersystem verfügt über eine zuverlässige Messauflösung von 0,1 nm mit dem kleinsten Schritt von 0,02 nm. Die Positionierunsicherheit beträgt für den gesamten Messbereich weniger als 10 nm. [174] Die NMM-1 realisiert eine einfache Integration verschiedener Sensorsysteme mit ihren analogen Eingängen des digitalen Signalprozessor (DSP). Die Steuerung der NMM-1 (Bild 10) erfolgt über eine spezielle Software oder mittels MATLAB auf dem Host-PC. Die DSP-Einheit nimmt alle Messsignale inklusive der Signale des Antastsystems, der Umweltsensoren, der Winkelsensoren der NMM-1 und der Interferometer der NMM-1 auf und verarbeitet diese weiter.

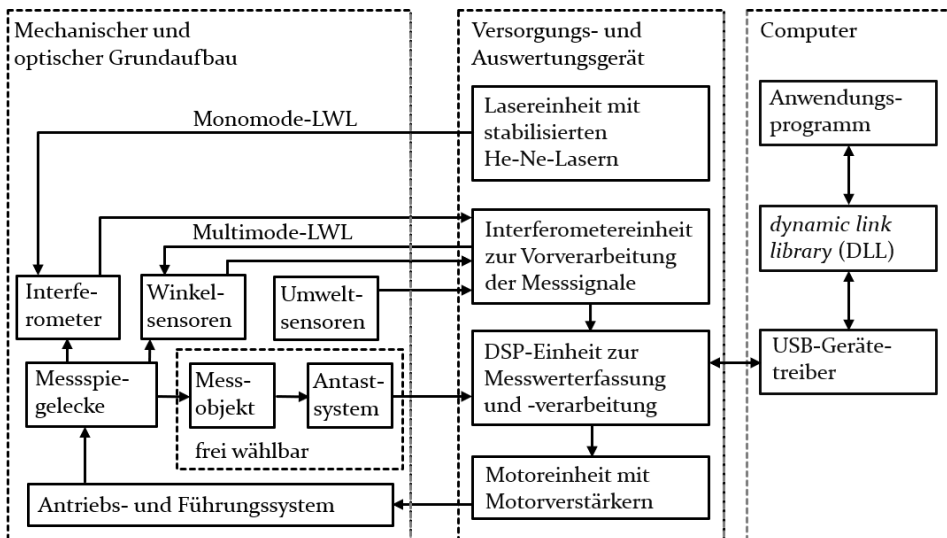


Bild 10: Steuerungseinheit der NMM-1 [174]

Die Messsignale der Interferometer und Winkelsensoren werden zuerst in der Interferometereinheit vorverarbeitet. Anschließend werden die vorverarbeiteten Messsignale bzw. -daten gemeinsam mit den Signalen aus dem Antastsystems zur DSP-Einheit weitergeleitet. Die Umweltinformation, wie beispielsweise Temperatur, Luftdruck oder Luftfeuchtigkeit werden als gewandelte Daten mittels RS-232-Schnittstelle zur DSP-Einheit übertragen. [174] Die DSP-Einheit realisiert die Kommunikation und Messwertausgabe zum PC-System über USB. Außerdem werden auch die Stellsignale für die Motorverstärker an die Motorverstärkereinheit weitergeleitet, wodurch die Position der Spiegelecke durch das Antriebs- und Führungssystem eingestellt werden kann.

Die Anordnung der Integration eines WLI-Sensors in die NMM-1 ist in Bild 11 dargestellt.

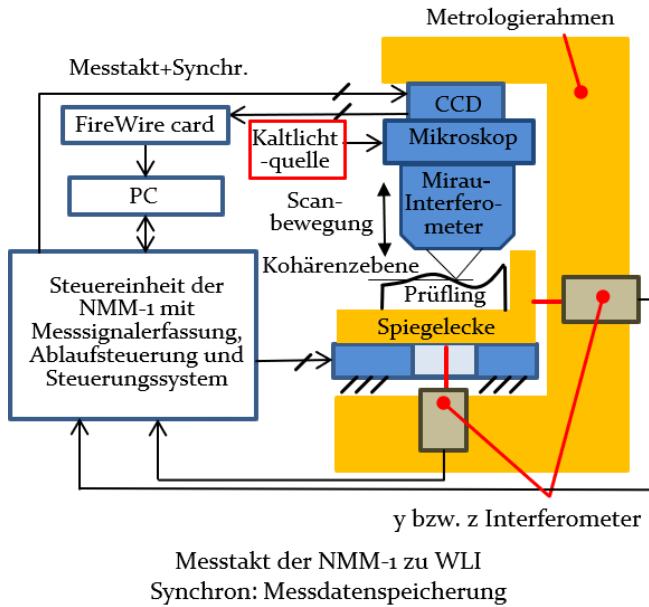


Bild 11: System Setup des WLI-Sensors integriert in die NMM-1

Ein kommerzieller WLI-Sensor der Firma GBS wurde in dieser Arbeit verwendet. Das System besteht aus der CCD-Kamera AVT PIKE F-100B mit Winkelkopf-Option W270, dem Kompaktmikroskop Nikon CM-30L und dem Mirau-Interferometerobjektiv Nikon CF Plan 20x Epi DI. Der WLI-Sensor wurde über die Zerodurplatte (vgl. Bild 12 (a)) an dem Metrologierahmen der NMM-1 montiert. Nach der Integration wird die axiale Scanbewegung durch die NMM-1 durchgeführt, indem die Spiegelecke zusammen mit dem zu messenden Objekt bewegt wird (Bild 11). Die drei Interferometer der NMM-1 lesen die Position der Spiegelecke bzw. des Objekts in Echtzeit, so dass der Positionsregelkreis eine Skalen- bzw. Ortsauflösung von 0,1 nm sicherstellen kann [175]. Die Steuereinheit der NMM-1 erzeugt während der axialen Abtastung die Triggersignale für den Kamerasensor. Die CCD-Kamera nimmt über FireWire 1394b mit bis zu 30 fps das Interferogramm an nahezu äquidistanten Positionen auf und überträgt sie an den Computer zur Datenverarbeitung.

In Bild 12 (b) ist der WLI-Sensor integriert in die NMM-1 zu sehen. Für die mechanische Integration eines Tastsystems dient die Zerodurplatte, die auf drei Zerodursäulen der NMM-1 festgeschraubt ist. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, dass der Sensorarbeitspunkt genau auf dem Abbe-Punkt liegt. Das Messsystem ist an einer Einschubplatte befestigt und wird mit dem Halter der Einschubplatte geführt, wobei die vertikale Position des Messsystems durch die Einschubplatte festgelegt werden kann. Der Halter

der Einschubplatte mit dem Messsystem wurde bis zum Anschlag in die Führungsschiene eingefügt. Hier wirkt der Sensor als Nullpunktindikator, so dass das Abbe-Komparator Prinzip in allen drei Messachsen realisiert werden kann.

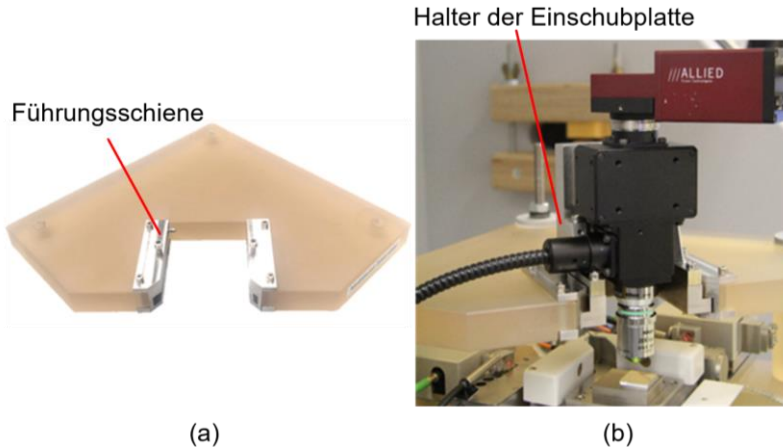


Bild 12: Zerodurplatte (a) und WLI integriert in die NMM-1 (b)

4.2 Einmessstrategie des WLI-Systems

Für die meisten Messverfahren ist eine Kalibrierung erforderlich. Dies gilt insbesondere in den Fällen, in denen eine Vielzahl schwer zu identifizierender und schwer zu kontrollierender Faktoren die Messung beeinflusst und somit Messabweichungen entstehen. Geometrische Messungen von Merkmalen auf der Mikro- und Nanoskala gehören zu solchen Fällen [176]. Die Orientierung des WLI-Sensors bzgl. der NMM-1 hat entscheidenden Einfluss auf die Messgenauigkeit für großflächige Messungen. Daher muss die Kalibrierung der Sensororientierung mit großer Sorgfalt durchgeführt werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um die Ergebnisse dieses schnellen und genauen Messverfahrens sicherer zu machen. Die metrologischen Eigenschaften und WLI-Sensororientierung sind in der Charakterisierung und Kalibrierung enthalten.

4.2.1 Charakterisierung der metrologischen Eigenschaften

Die metrologischen Eigenschaften der Kombination von WLI-Sensor und NMM-1 wurden für das Messfeld unter Verwendung des flächenhaften Kalibriergitters (Bild 13) des *National Physical Laboratory* (NPL) und eines Planspiegels (Bild 14) charakterisiert. Nach DIN EN ISO 25178-600:2019-12 werden folgende Merkmale charakterisiert bzw. kalibriert: Messrauschen,

Ebenheitsabweichung, Skalierung und Linearitätsabweichung, Verstärkungskoeffizient, Rechtwinkligkeit der Achsen und Messunsicherheit. Die Charakterisierungs- und Kalibrierverfahren wurden nach dem *Good Practice Guide* des NPL durchgeführt [177].

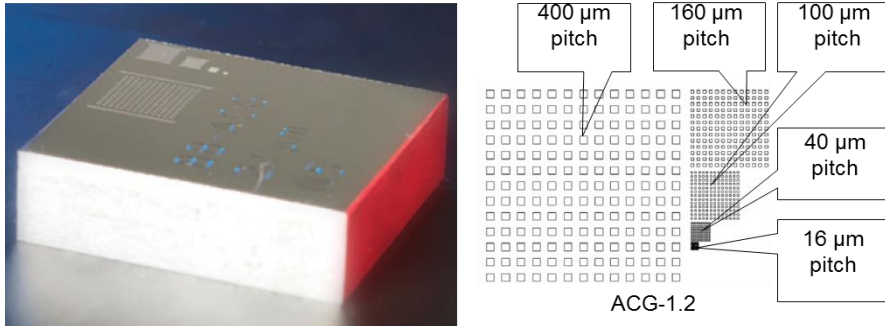


Bild 13: Kalibrierstandard des NPL Typ ACG

Das flächenhafte Kalibriergitter, welches auch als *Areal Cross Grating* (ACG) bezeichnet wird, wurde mit den Nennmaßen von 20 mm × 20 mm × 3 mm hergestellt. Darauf wurden Gitter unterschiedlicher Abmessungen mit jeweils unterschiedlichem Gitterabstand angeordnet. Die Oberfläche wurde mit Nickel beschichtet, auf das schließlich die Polymermaster-Strukturen durch Elektronenstrahlithografie graviert wurden. [178]

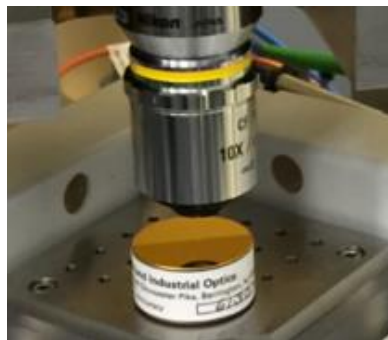


Bild 14: Goldbeschichteter Planspiegel mit Oberflächenebenheit von $\lambda/20$

Präzise Planspiegel (Bild 14) werden normalerweise aus den zwei Materialien Zerodur oder Quarzglas hergestellt. Zerodur besitzt einen extrem niedrigen linearen Ausdehnungskoeffizienten α_l im Bereich von $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}/K$ im Bereich von 0 °C bis 50 °C (Dehnungsklasse 2) oder kleiner [179]. Quarzglas besitzt ebenfalls einen niedrigen linearen Ausdehnungskoeffizienten α_l von $0,55 \cdot 10^{-6}/K$ [180]. Der zur Charakterisierung der metrologischen Eigenschaften verwendete Planspiegel wurde aus Zerodur hergestellt und eine der Oberflächen des Planspiegels wurde mit Gold beschichtet. Die Ober-

flächenebenheit beträgt $\lambda/20$.

Messrauschen

Der Begriff des Messrauschens wird nach der Norm DIN EN ISO 25178-604:2013-12 so definiert, dass während des üblichen Betriebs des Messgeräts ein Rauschen entsteht und sich zum Ausgangssignal addiert [181]. Dieses Rauschen kann von unterschiedlichen Rauschquellen z. B. internem Rauschen, Umgebungsrauschen, externen elektromagnetischen Störungen und Schwingungen verursacht werden. Zur Messrausch-Identifikation wird im Allgemeinen ein ebenes Artefakt mit der maximalen Höhe der ungefilterten, skalenbegrenzten Oberfläche S_z von kleiner als 30 nm verwendet [177].

Zwei wiederholte Messungen reichen nach [177] aus, um das Messrauschen zu bestimmen. Dafür wurde ein Planspiegel mit einer Ebenheit von $\lambda/20$ und einem Durchmesser von 12,5 mm zum Einsatz gebracht. Der Planspiegel wurde zweimal innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraums hintereinander an derselben Stelle gemessen. Durch Subtraktion der zwei gemessenen Topografien kann das Messrauschen von den Oberflächenformabweichungen und der intrinsischen Rauheit des Messobjekts isoliert werden. Nach DIN EN ISO 25178-2:2012-09 wird der quadratische Mittelwert der skalenbegrenzten Oberfläche als S_q definiert [182]. Damit wird der quadratische Mittelwert S_q der zwei subtrahierten Flächen ($\Delta z(x, y) = z_2(x, y) - z_1(x, y)$) ermittelt:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \Delta z^2(x, y) dx dy} \quad (14)$$

Wobei $z_1(x, y)$ und $z_2(x, y)$ die Datensätze der gemessenen Topografien sind.

Die gemessene Datensätze $z_1(x, y)$ und $z_2(x, y)$ können jeweils mittels der folgenden Gleichungen umgeschrieben werden:

$$z_1(x, y) = z(x, y) + n_1(x, y) \quad (15)$$

$$z_2(x, y) = z(x, y) + n_2(x, y) \quad (16)$$

Wobei $n_1(x, y)$ und $n_2(x, y)$ jeweils das Rauschen der zwei gemessenen Topografien sind.

Da das Rauschen doppelt in $\Delta z(x, y)$ enthalten ist ($\Delta z(x, y) = z_2(x, y) - z_1(x, y) = n_2(x, y) - n_1(x, y)$), kann das Rauschen S_{qnoise} durch Berechnung entsprechend der folgenden Gleichung bestimmt werden [177]:

$$S_{\text{qnoise}} = \frac{S_q}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Das berechnete Rauschen des untersuchten WLI-Systems beträgt 2,14 nm bei einem Objektiv mit 20-facher Vergrößerung und 0,22 nm bei einem Objektiv mit 10-facher Vergrößerung. Wie zu erwarten ist das Rauschen bei einem Objektiv mit 20-facher Vergrößerung größer als bei einem mit 10-facher Vergrößerung. Jedoch wurde das Ergebnis bei dem Objektiv mit 10-facher Vergrößerung und dem Objektiv 20-facher Vergrößerung jeweils mittels zwei an derselben Stelle gemessenen Topografien berechnet, was zur Messabweichung führen könnte.

Ebenheitsabweichung

Das metrologische Merkmal Ebenheitsabweichung ist ein Qualitätsmerkmal der Referenzebene eines Messgeräts. Diese wird beim untersuchten WLI-System durch die optische Abbildung des Objektivs sowie die Ebenheiten der Strahlteilerfläche und Referenzspiegelfläche definiert. Die Ebenheitsabweichung der Referenzebene wurde durch die Messungen am Planspiegel ermittelt. Dabei wurden die Messungen mehrmals an unterschiedlichen Stellen nach lateralen Verschiebungen des Planspiegels durchgeführt. Nach der Richtlinie VDI VDE 2655 werden die Mindestwerte für die Verschiebung (siehe Tabelle 3) vorgegeben [183].

Tabelle 3: Mindestwerte für die Verschiebung des Planspiegels bei der Bestimmung der Topografie der Bezugsfläche [183]

Objektiv-Vergrößerung	Seitliche Verschiebung in μm
2,5-fach	≈ 200
5-fach	≈ 200
10-fach	≈ 100
20-fach	≈ 50
50-fach	≈ 20

Die maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche S_z , die als Summe des größten Wertes der Spitzenhöhe und des größten Wertes der Senkenhöhe innerhalb des Definitionsbereichs bestimmt wird, wird zur Quantifizierung der Qualität der Fläche verwendet. Um die Einflüsse der unerwünschten Merkmale wie beispielsweise Staub, der sich auf der Oberfläche befinden, zu verringern, ist das Setzen eines Schwellwerts der Senkenhöhe und Spitzenhöhe sowie die Ermittlung eines Polynoms empfehlenswert [177]. Nach

Ausrichtung der gemessenen Topografie des Planspiegels wird ein Formfilter verwendet, um die Form der Topografie zu entfernen. Um eine beste Annäherung an die entsprechende Oberfläche zu erzielen, muss ein geeigneter Polynomgrad ausgewählt werden. Die oberen und unteren Schwellwerte werden so gesetzt, dass die Maxima und Minima der residualen Oberfläche mindestens dreimal so groß wie der S_q Wert der residualen Oberfläche sind. Danach wird die residuale Oberfläche mit der Formtopografie wieder addiert. [177] Bild 15 zeigt die Form, die residuale Oberfläche, die residuale Oberfläche mit der Setzung eines Schwellwertes und die Oberfläche mit Setzung eines Schwellwertes einer gemessenen Topografie des Planspiegels (mit einem Objektiv mit 20-facher Vergrößerung). Die $S_{zflatness}$ der gemessenen Topografie beträgt 13,7 nm.

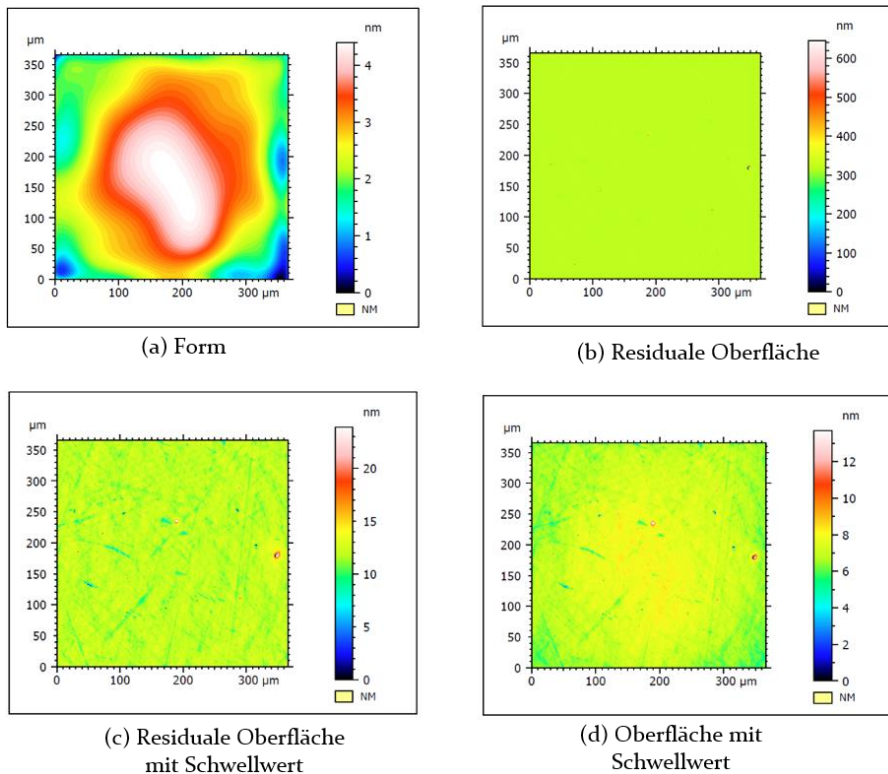


Bild 15: Form (a), residuale Oberfläche (b), residual Oberfläche mit Schwellwert (c) und Oberfläche mit Schwellwert (d)

Nach der Ermittlung des Durchschnitts von vierzehn Messungen beträgt die maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche $S_{zflatness}$ mit 10-facher Vergrößerung und mit 20-facher Vergrößerung der Objektive jeweils 9 nm und 12,1 nm.

Skalierung der vertikalen Achse

Nach der Norm DIN EN ISO 25178-604:2013-12 wird der Verstärkungskoeffizient als Steigung der linearen Regressionsfunktion der statischen Übertragungsfunktion definiert, welche den Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Größe und der gemessenen Größe beschreibt [181]. Die Linearitätsabweichung kann durch die maximale Differenz zwischen der statischen Übertragungsfunktion und der Linie berechnet werden, deren Steigung der Verstärkungskoeffizient ist. Der Verstärkungskoeffizient α kann durch die kalibrierten Werte C_j und die gemessenen Werte I_j und die Anzahl n der zur Kalibrierung verwendeten Kalibriergitter mit unterschiedlichen Stufenhöhen bestimmt werden [177]:

$$\alpha = \frac{\sum_i^n C_j \cdot I_j}{\sum_j^n C_j^2} \quad (18)$$

Die Kalibrierung in z-Richtung besteht aus den Messungen mehrerer Stufenhöhenstandards mit unterschiedlichen Stufenhöhen. Der Bereich der verschiedenen Stufenhöhenstandards sollte den gesamten Arbeitsbereich der z-Achse oder mindestens den interessierenden Bereich abdecken. Gemäß DIN EN ISO 5436-1:2000-11 dient ein Tiefeneinstellnormal mit kalibrierten rechtwinkligen Rillen zur Kalibrierung der vertikalen Achse [184]. Anstatt des Tiefeneinstellnormal wurden die flächenhaften Kalibriergitter mit Stufenhöhen von jeweils 0,5 μm , 1,2 μm und 2,1 μm verwendet. Die Stufenhöhen der zentralen Löcher des jeweiligen Gitters wurden nur in den Bereichen mit Pitchabstand von 160 μm kalibriert, weswegen diese zur Kalibrierung des WLI-Systems verwendet wurden. Die kalibrierten mittleren Stufenhöhen \bar{x} und die zugehörigen erweiterten Unsicherheiten U ($k = 2$) sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4: Kalibrierte mittlere Stufenhöhen und die zugehörigen Unsicherheiten [185]

Stufenhöhe	0,5 μm	1,2 μm	2,1 μm
\bar{x}	501,7 nm	1262,6 nm	2052,8 nm
U	4,1 nm	4,3 nm	4,2 nm

Eine Methode zum Messen der Stufenhöhe des Standardartefakts, die die flächigen Daten und das Verfahren der Standardhöhenanalyse nach DIN EN ISO 5436-1:2000-11 verwendet [186], besteht darin, die durchschnittlichen Höhen aller parallel extrahierten Profile zu berechnen, die nominal senkrecht zu der Verlaufsrichtung der Stufe sind [187]. Dabei wurden die drei Kalibriergitter in fünf unterschiedlichen Positionen bzw. bei 10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % des vertikalen Arbeitsbereichs der NMM-1, je-

weils fünfmal gemessen, um die Bestimmung der Wiederholpräzision und Vergleichspräzision zu ermöglichen. Nach DIN EN ISO 5436-1:2000-11 Typ A 1 werden die Stufenhöhen nach folgender Gleichung berechnet:

$$Z = \alpha X + \beta + h\delta \quad (19)$$

wobei die Unbekannten α , β und h nach der Methode der kleinsten Quadrate an ein Profil anzupassen sind. Die Variable δ nimmt den Wert $+1$ in den Bereichen A und B und -1 im Bereich C an. Die Stufenhöhe der Rille d ist das Doppelte des so bestimmten Wertes h (Bild 16).

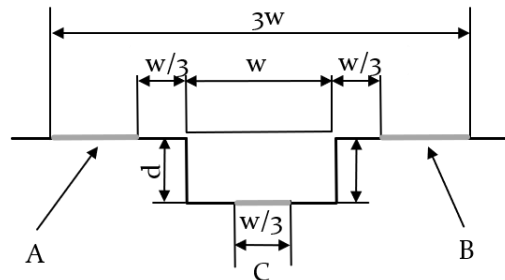


Bild 16: Bereiche für die Berechnung der Stufenhöhe [184]

Während des Verfahrens war das Interferenzmikroskop als Tastsystem fest angeordnet und die Spiegelecke der NMM-1 mit dem Kalibriergitter wurde in der vertikalen Richtung bewegt. Entsprechend stellt Tabelle 5 die berechnete Wiederholpräzision (Wiederholbedingungen) und Vergleichspräzision (Vergleichbedingungen) bei 50 % des Arbeitsbereichs dar.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Wiederholpräzision und Vergleichspräzision

Nennwerte der Stufenhöhe	0,5 μm		1,2 μm		2,1 μm	
	10-fach	20-fach	10-fach	20-fach	10-fach	20-fach
$\delta_{\text{wiederhol}}$ in nm	1,09	0,96	1,55	1,48	1,70	2,63
$\delta_{\text{vergleich}}$ in nm	3,97	1,09	4,55	1,48	3,43	4,35

Die Wiederholpräzision beschreibt die Messpräzision bei einer Menge von Messbedingungen, die dasselbe Messverfahren, dieselben Bediener, dasselbe Messsystem, dieselben Betriebsbedingungen und denselben Ort und wiederholte Messungen an demselben Objekt oder an ähnlichen Objekten während eines kurzen Zeitintervalls umfassen. Die Vergleichspräzision beschreibt die Messpräzision bei einer Menge von Messbedingungen, die un-

terschiedliche Messorte, Bediener, Messsysteme und wiederholte Messungen an demselben Objekt oder an ähnlichen Objekten umfassen. [188]

In Bild 17 sind beispielhaft die Kalibrierungsergebnisse jeweils mit 10-facher Vergrößerung und 20-facher Vergrößerung zu sehen. Aus den gemessenen Werten können der Verstärkungskoeffizient α und die Linearität bestimmt werden, indem eine lineare Regressionsfunktion der statischen Übertragungsfunktion definiert wird. Die maximale Differenz zwischen der statischen Übertragungsfunktion und der angepassten Linie, deren Steigung der Verstärkungskoeffizient ist, gibt die Linearitätsabweichung an. [181] In Bild 17 werden die Abweichungen der gemessenen Werte von der tatsächlichen Größe dargestellt. Der Verstärkungskoeffizient bei 10-facher Vergrößerung und 20-facher Vergrößerung beträgt jeweils 0,994698 und 0,995544 und die Linearitätsabweichungen resultieren im Wesentlichen aus der relativen Unsicherheit der Werte aus dem Kalibrierzertifikat. Die Verstärkungskoeffizienten können entsprechend für Objektive mit unterschiedlicher Vergrößerung korrigiert bzw. konfiguriert werden.

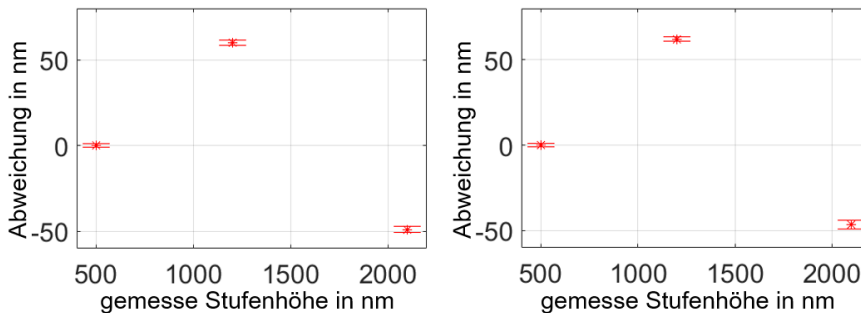


Bild 17: Abweichungsbalkendiagramme der Verstärkung und der Linearität der gemessenen Stufenhöhen mit 10-fachem Objektiv (links) und mit 20-fachem Objektiv (rechts)

Aus Bild 17 ist ersichtlich, dass die Vergrößerung des Objektivs erwartungsgemäß wegen der geringen Ebenheitsabweichungen keinen signifikanten Einfluss auf die Kalibrierergebnisse der Verstärkung und Linearität der z-Achse hat, da der WLI-Sensor als Nullpunktsensor agiert und die axiale Scanbewegung mit der NMM-1 erfolgt. Als Wegmesssystem dient dabei das z-Interferometer der NMM-1, welches über die Wellenlänge des genutzten Laserlichtes rückgeführt wird. Die Kalibrierung der Verstärkung mittels der Kalibrierung der Laserlichtwellenlänge und Umweltmessung kann mit geringerer Unsicherheit im Vergleich zum zuvor beschriebenen Verfahren erfolgen. Die Nichtlinearitäten der interferometrischen Wegmessung lassen sich mittels des Verfahrens nach Heydemann [189] ebenfalls besser bestimmen. Die Phasenabweichungen zwischen den analogen Quadratursignalen

des z-Interferometers der NMM-1 nach Durchführung einer nachträglichen Ellipsenregression mittels der aufgezeichneten Quadratursignale (sin/cos-Signale) des z-Interferometers beträgt $0,17^\circ$. Der Offset des sin-Signals und des cos-Signals beträgt jeweils $-3,71$ Digits und $-4,84$ Digits (Die Spitze-Spitze-Amplitude der sin/cos-Signale ist ungefähr 800 Digits). Das Amplitudenverhältnis von dem sin-Signal und dem cos-Signal ist $0,9949$. Die Differenz der Länge der nachträglichen Demodulation der unkorrigierten und korrigierten Quadratursignale über eine Periode beträgt $0,15$ nm. Dieser Wert ist die periodische Nichtlinearität und ist im Vergleich zu den im Bild 17 gezeigten Nichtlinearitäten um Größenordnungen geringer.

Kalibrierung der lateralen Achsen

Mithilfe des flächenhaften Kalibriergitters können durch eine Auswertung einer „Messung im Bild“ zusätzlich die Verstärkungskoeffizienten und die Linearitätsabweichungen der x-Achse und der y-Achse des WLI-Systems bestimmt werden. Die Integration des WLI-Systems in die NMM-1 ermöglicht jedoch eine Nutzung der Interferometer der NMM-1 für die Kalibrierung des WLI-Systems durch eine definierte laterale Verschiebung von Merkmalen und eine Auswertung als „Messung am Bild“, welche zu besseren Ergebnissen als die „Messung im Bild“ führt. Das Bild 18 und das Bild 19 zeigen die Kalibrierergebnisse der Verstärkungskoeffizienten und der Linearitätsabweichungen der x-Achse und der y-Achse des WLI-Systems durch die Auswertung als „Messung am Bild“. Es ist ersichtlich, dass das Bild 18 und das Bild 19 sowohl entlang der x-Achse als auch entlang der y-Achse ähnliche Messabweichungstrends zeigen, jedoch entgegengesetzt. Der Verstärkungskoeffizient bei 20-facher Vergrößerung entlang der x-Achse und entlang der y-Achse beträgt jeweils $1,002062$ und $0,998211$. Die zwei Achsen können mit unterschiedlichen Verstärkungskoeffizienten entsprechend korrigiert bzw. konfiguriert werden.

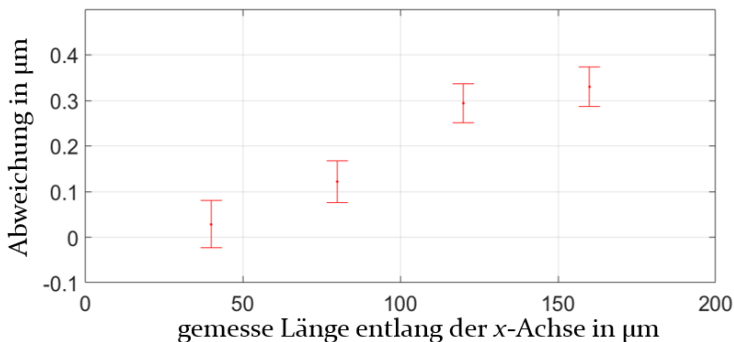


Bild 18 Abweichungsbalkendiagramm des Verstärkungskoeffizient und der Linearitätsabweichungen der x-Achse mit 20-fachem Objektiv über das Gitter mit $40 \mu\text{m}$ Pitchabstand

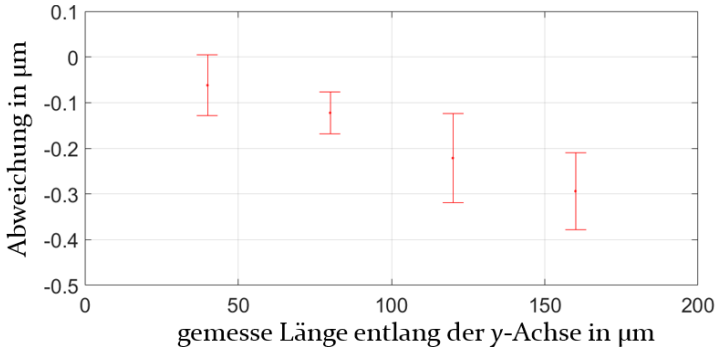


Bild 19 Abweichungsbalkendiagramm des Verstärkungskoeffizient und der Linearitätsabweichungen der y -Achse mit 20-fachem Objektiv über das Gitter mit 40 μm Pitchabstand

Rechtwinkligkeit der Achsen

Nach dem in [177] beschriebenen Verfahren mittels der einzelnen an unterschiedlichen vertikalen Positionen gemessenen Topografien kann die Orthogonalität zwischen der x -Achse und der y -Achse berechnet werden. Der Winkel zwischen den Geraden, die an die Schwerpunkte der quadratischen Löcher angepasst werden, wird hierfür ausgewertet. Die berechnete Rechtwinkligkeitsabweichung γ beträgt $0,579^\circ$ mit zugehöriger Standardabweichung des Mittelwerts von $0,215^\circ$. Die maximale Auswirkung der Rechtwinkligkeitsabweichung Δl könnte entstehen, wenn die gleiche Länge in den beiden Bilddiagonalen gemessen wird. Aus dem Sinus- und Kosinussatz und der Summe der Innenwinkel können die folgenden Gleichungen abgeleitet werden:

$$c_1 = \frac{\cos\left(\frac{\gamma\pi}{180^\circ}\right) l}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma\pi}{360^\circ}\right)} \quad (20)$$

$$c_2 = \frac{\cos\left(\frac{\gamma\pi}{180^\circ}\right) l}{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma\pi}{360^\circ}\right)} \quad (21)$$

$$\Delta l = \frac{c_1 - c_2}{2} \quad (22)$$

Wobei c_1 und c_2 jeweils die gemessene Länge in den beiden Bilddiagonalen sind. l ist die zu messende Länge. Die berechnete maximale Abweichung beträgt 7,4 μm . Das berechnete Ergebnis der Rechtwinkligkeit ist ein Kombinationseffekt des WLI-Systems und des Kalibriergitters, dessen Rechtwinkligkeit das Kalibrierergebnis beeinflusst. Durch die Integration in die NMM-1 ist es möglich, die Rechtwinkligkeit durch Verschiebung des Kalibriergitters mit Mittelpunktabständen zu prüfen. Die Messung und

Separationen der Rechtwinkligkeitsabweichungen des Kalibriergitters, des WLI-Sensors und der NMM-1 könnten wie folgt erfolgen:

- Rechtwinkligkeit der NMM-1: Messung eines Mittelpunktabstands mit Ausrichtung in beiden Diagonalen und entlang der x - oder/und y -Achse mit Messung am Bild (Mittelpunkte immer in Mitte des WLI-Sensors).
- Rechtwinkligkeit des WLI-Sensors: Verschiebung eines Mittelpunkts mit definiertem Abstand in die Ecken des WLI-Sensors mit der NMM-1.
- Rechtwinkligkeit Kalibriergitters: Gitter mit 45° -Drehung zur x - und y -Achse der NMM-1 und Messung der beiden diagonalen Abstände der Mittelpunkte an den Ecken.

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit kann von vielen Faktoren wie beispielsweise Messabweichungen und Rauschen von Messgeräten, Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte von Umgebung und Kalibrierungsergebnisse der metrologischen Eigenschaften wie Linearität und Verstärkung beeinflusst werden. Nach dem GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) können die einzelnen Messunsicherheitsbeiträge als Unsicherheitskomponenten nach Typ A oder nach Typ B bestimmt werden. Nach Typ A wird die Standardunsicherheit u_A durch Auswertung über die Analyse mehrerer statistisch unabhängiger Messwerte von den Messreihen ermittelt und nach Typ B wird die Standardunsicherheit u_B durch andere Mittel als der statistischen Analyse ermittelt, beispielsweise durch Entnahme der Werte aus einem Kalibrierschein, aus der Genauigkeitsklasse oder aus persönlichen Erfahrungen. Die beiden Beiträge zur Messunsicherheit lassen sich mit der folgenden Gleichung zur kombinierten Standardunsicherheit u_c zusammenfassen [190]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (23)$$

Der kombinierte Effekt der Ebenheitsabweichung und des Rauschens zur Messunsicherheit in der z -Achse lässt sich somit bestimmen durch [177]:

$$u_N = \sqrt{s_{\text{qnoise}}^2 + \frac{s_{z\text{flatness}}^2}{12}} \quad (24)$$

In Folgenden sind beispielhaft die Messunsicherheitsbeiträge des Rauschens und der Ebenheitsabweichung zur Messunsicherheit in der z -Achse zu sehen.

Tabelle 6: Messunsicherheit in z-Achse mit jeweils 10-facher und 20-facher Vergrößerung

Unsicherheitsbeitrag	10-fache Vergrößerung	20-fache Vergrößerung
S_{noise} in nm	0,22	2,14
$S_{\text{zflatness}}$ in nm	9	12,1
Messunsicherheit in nm	0,78	2,37

Der kombinierte Effekt der Abweichung, der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision zum Verstärkungs- und Linearitätsbeitrag der Messunsicherheit der Koordinatenmessung ergibt:

$$u_T = \sqrt{u_{\text{Abweichung}}^2 + u_{\text{Wiederhol}}^2 + u_{\text{Vergleich}}^2} \quad (25)$$

Beispielhaft beträgt der maximale Verstärkungs- und Linearitätsbeitrag zur Messunsicherheit der Koordinatenmessung der x -Achse und y -Achse bei einem Gitterabstand von $100 \mu\text{m}$ mit 10-facher Vergrößerung jeweils $1,6 \mu\text{m}$ und $1,2 \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu beträgt der maximale Verstärkungs- und Linearitätsbeitrag der x -Achse und y -Achse bei einem Gitterabstand von $100 \mu\text{m}$ mit 20-facher Vergrößerung jeweils $0,46 \mu\text{m}$ und $0,30 \mu\text{m}$.

Die kombinierte Standardunsicherheit u_c der Koordinatenmessung in der x -, y - und z -Achse lässt sich mittels Gleichung (23) mit entsprechend zugehörigen Unsicherheitsbeiträgen bestimmen. Die bestimmte kombinierte Standardunsicherheit u_c in der x -, y - und z -Achse mit 10-facher Vergrößerung ist jeweils $1762,8 \text{ nm}$, $1409,8 \text{ nm}$ und $3,9 \text{ nm}$. Die bestimmte kombinierte Standardunsicherheit u_c in der x -, y - und z -Achse mit 20-facher Vergrößerung beträgt jeweils $590,3 \text{ nm}$, $476,3 \text{ nm}$ und $5,6 \text{ nm}$. Die Verzerrung des Objektivs dominiert für die kombinierte Standardunsicherheit der x - und y -Achse.

4.2.2 Kalibrierung und Korrektur der Sensorverkipfung

Eine wichtige Voraussetzung für die Messung großer Bereiche und die Registrierung und Datenfusion ohne Überlappungsfelder mit dem WLI ist, dass die Orientierung des Koordinatensystems des WLI-Sensors in Bezug auf das Koordinatensystem der NMM-1 bekannt und nach Möglichkeit ausgerichtet ist. Wenn die Orientierung des Koordinatensystems des WLI-Sensors nicht genau dem der NMM-1 entspricht, entstehen horizontale und vertikale Versätze in den resultierenden fusionierten Messdaten.

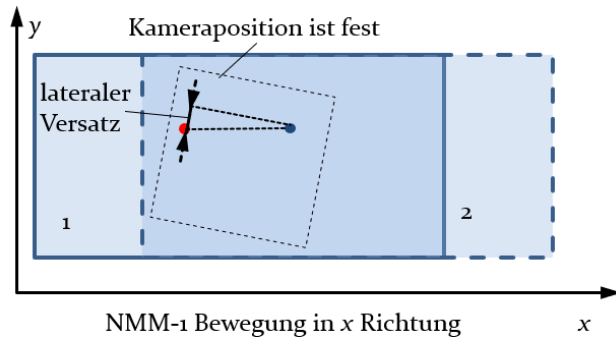


Bild 20: Auftreten des lateralen Versatzes im WLI-Sensor

Ein Ausrichtungsfehler des WLI-Sensors um die z -Achse wird zu lateralen Messabweichungen führen. Ein Punkt auf der gemessenen Oberfläche wird als Beispiel genommen (Bild 20). Die Position des Punktes bei der ersten Messung ist durch den roten Punkt und die Position desselben Punktes bei der zweiten Messung nach Bewegung der NMM-1 in x -Richtung ist durch den blauen Punkt gekennzeichnet.

Wenn der Kamerasensor um die x - und y -Achse gekippt ist, werden die beobachteten Oberflächendaten auch gekippt. Der Kamerasensor wurde bereits manuell durch die mechanische Befestigung ausgerichtet. Eine perfekte, abweichungsfreie Ausrichtung ist jedoch so nicht möglich. Wenn die verbleibende Verkippung des WLI-Sensors in Übereinstimmung mit den Maschinenkoordinaten nicht berücksichtigt wird, werden bei den resultierenden Topografiedaten Sprünge bei den Übergängen von benachbarten Messfeldern auftreten, welche sich in der vertikalen Richtung zueinander durch einen definierten Versatz entstehen (siehe Bild 21). Wird ein Teilbereich von $366 \mu\text{m}$ gemessen, kann ein Kippungswinkel von 1° zu einem Höhenversatz bzw. Höhenoffset von $6,388 \mu\text{m}$ zum nächsten Teilbereich führen. Die Orientierung des WLI-Sensors muss also ermittelt und bei der Fusion der Messdaten berücksichtigt werden.

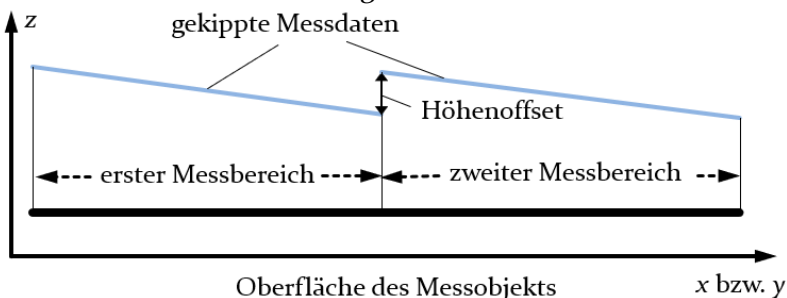


Bild 21: Höhenversatz zwischen zwei Messbereichen

Zur Kalibrierung der Orientierung bzw. Verkippung des WLI-Sensors wurde ebenfalls das bereits beschriebene Kalibriergitter des NPLs benutzt. Die Messungen wurden auf dem ACG-1.2 (Stufenhöhe von 1 200 nm, mit fünf verschiedenen Pitchabständen: 400 μm , 160 μm , 100 μm , 40 μm , 16 μm , siehe Bild 13, S. 46) durchgeführt und deren laterale und axiale Schwerpunkte der quadratischen Löcher des Kalibriergitters für die Kalibrierung verwendet. Eine vom NPL in MATLAB entwickelte Software wurde zur Identifikation der Merkmale für die Isolierung der quadratischen Löcher sowie zur Berechnung der Schwerpunkte verwendet [191]. Die Position des Schwerpunktes (x_c, y_c) kann mit den Koordinaten der Punkte innerhalb jedes quadratischen Loches berechnet werden.

$$x_c = \frac{\sum x_{ij} \cdot z_{ij}}{\sum z_{ij}}, \quad y_c = \frac{\sum y_{ij} \cdot z_{ij}}{\sum z_{ij}}, \quad (26)$$

wobei x_{ij} , y_{ij} und z_{ij} die Koordinaten der Punkte innerhalb jedes quadratischen Loches sind.

Um die Position des Schwerpunktes jedes quadratischen Loches in der z -Richtung zu berechnen, werden n Punkte eines Quadrates, die auf die Mitte des nach Gleichung (26) berechneten Punktes (x_c, y_c) ausgerichtet sind, ausgewählt [191]. Dann kann die z -Koordinate des Schwerpunktes abgeleitet werden als:

$$z_c = \frac{\sum z_{ij}}{n}. \quad (27)$$

Die Idee der Kalibriermethode besteht darin, Punkte von demselben Bereich einer Objektoberfläche in zwei gemessenen Topografien zu erfassen, die im Messfeld des WLI-Sensors an zwei verschiedenen Positionen mit einer definierten Verschiebung des Gitters in x - oder/und y -Richtung aufgenommen wurden (vgl. Bild 22). Zwischen den beiden Messungen befindet sich ein überlappender Bereich.

Dabei sind x_R, y_R, z_R die Koordinaten im Koordinatensystem der NMM-1, x_S, y_S, z_S die Koordinaten im Koordinatensystem des WLI-Sensors und $\Delta x_S, \Delta y_S, \Delta z_S$ Komponenten des Verschiebungsvektors \vec{t} der Oberfläche im Koordinatensystem des WLI-Sensors mit einer definierten Verschiebung Δx_R oder Δy_R im Koordinatensystem der NMM-1. Die dreidimensionale Verschiebung des Gitters zwischen den beiden aufgenommenen Topografien resultiert aus der lateralen Bewegung des Kalibriergitters durch die Bewegung der NMM-1 und wird durch die Orientierung des WLI-Sensors beeinflusst. Rotationen des Kalibrierwerkstücks um die x -, y - und z -Achse treten nur aufgrund der Führungsabweichungen für die beiden Positionen des Gitters auf. Die Verschiebung und die Rotationen können unter Ver-

wendung der Koordinaten der Schwerpunkte im Überlappungsbereich in zwei Messungen berechnet werden. Ein mittlerer Translationsvektor wird über alle entsprechenden Schwerpunktpaare basierend auf dem nichtlinearen kleinsten Quadrate-Algorithmus [192] berechnet. Die Koordinatentransformation wird durch die folgende Gleichung definiert:

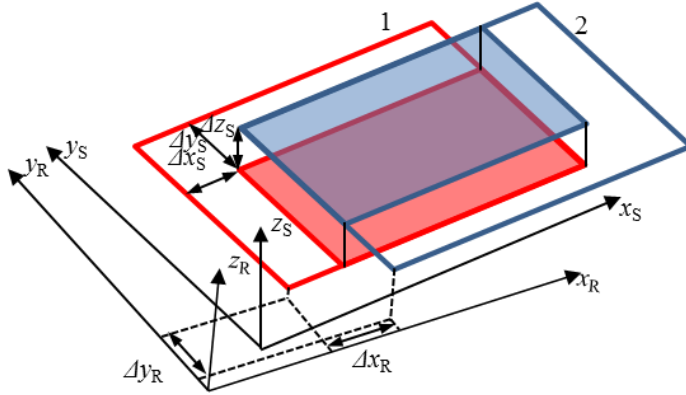


Bild 22: Erzeugung von zwei teilweise überlappenden Messbereichen durch Verschieben des Gitters mit einer vorgegebenen Distanz

$$X'_S = \vec{t} + \mathbf{R}(\varphi)X_S \quad (28)$$

In Gleichung (28) ist X_S der gemessene Datensatz der Schwerpunkte und X'_S ist der transformierte Datensatz. \vec{t} ist der Translationsvektor und $\mathbf{R}(\varphi)$ ist die durch die Gleichungen (29)–(32) gegebene Rotationsmatrix:

$$\mathbf{R}(\varphi) = \mathbf{R}(\varphi_x)\mathbf{R}(\varphi_y)\mathbf{R}(\varphi_z) \quad (29)$$

$$\mathbf{R}(\varphi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_x & \sin\varphi_x \\ 0 & -\sin\varphi_x & \cos\varphi_x \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{R}(\varphi_y) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_y & 0 & -\sin\varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi_y & 0 & \cos\varphi_y \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{R}(\varphi_z) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_z & \sin\varphi_z & 0 \\ -\sin\varphi_z & \cos\varphi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Die sechs Transformationsparameter (Δx , Δy , Δz , φ_x , φ_y , φ_z) müssen gefunden werden, um sicherzustellen, dass die Abstände zwischen $X_{S,1}$ (der Datensatz der Schwerpunkte im überlappten Bereich des gemessenen Bereichs 1) und $X'_{S,2}$ (der transformierte Datensatz der Schwerpunkte im

überlappten Bereich 2) minimal sind. Die Zielfunktion kann mit Gleichung (33) beschrieben werden:

$$F(X) = \min_{\{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\}} \left\{ \sum_{i=1}^n \|R(\varphi)X_{S,2} - X_{S,1} + \vec{t}\|^2 \right\} \quad (33)$$

Die Gauß-Newton-Iteration Methode wurde verwendet, um dieses nichtlineare Problem zu lösen [192]. Der Ablauf des Iterationsprozesses ist in Bild 23 dargestellt. Dabei ist N der vorgegebene maximale Iterationsschritt. Die Funktion wird zunächst mit der Taylor-Expansion um einen Punkt X^P linearisiert [192]:

$$F(X) \approx DF(X^P)(X - X^P) - F(X^P) \quad (34)$$

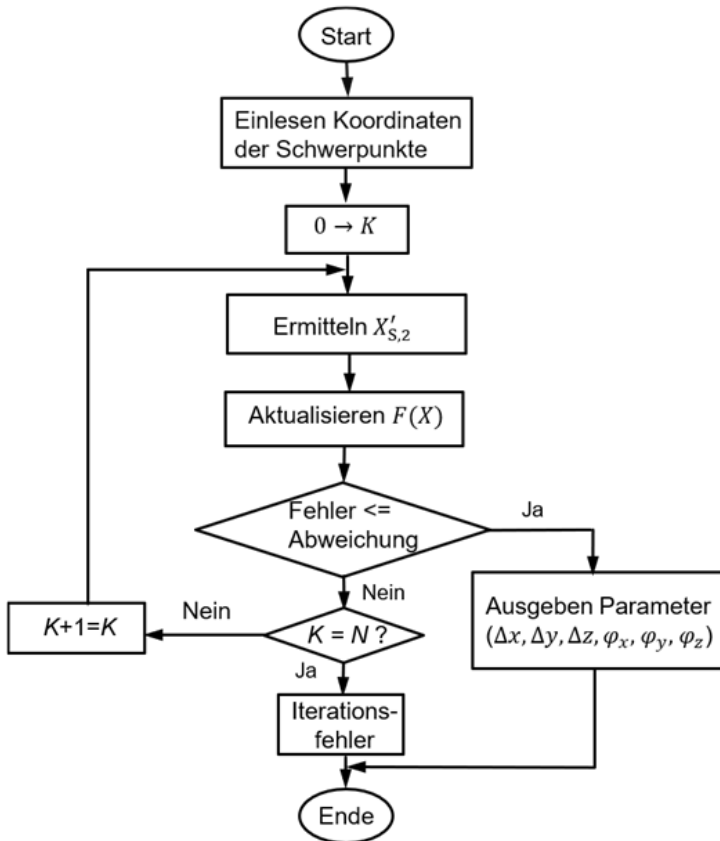


Bild 23: Ablauf der Gauß-Newton-Iteration Methode

Nach mehreren wiederholten Iterationen der Gauß-Newton-Methode sinkt die Summe der quadrierten Residuen ε und das Verfahren konvergiert nach $\varepsilon_n \cong \varepsilon_{n+1}$ (n ist der Iterationsschritt). Dadurch können die optimalen

Parameter des Translationsvektors \vec{t} und der Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\varphi)$ bestimmt werden. Die Kalibrierung kann separat mit zwei Bewegungen Δx_R und Δy_R des Gitters in x - und y -Richtung durchgeführt werden. Die Faktoren $\vec{t}_x/\Delta x_R$ und $\vec{t}_y/\Delta y_R$ können für die dreidimensionale Translation der Messdaten für jeden Messbereich mit einer bekannten lateralen Verschiebung durch die NMM-1 verwendet werden. Das Ergebnis der dreidimensionalen Translation ist ein Datensatz im Koordinatensystem des WLI-Sensors. Die Faktoren $\vec{t}_x/\Delta x_R$ und $\vec{t}_y/\Delta y_R$ können auch für die Bestimmung der WLI-Sensororientierung und der Rotation der Datensätze des WLI-Sensors um alle drei Achsen des Koordinatensystems der NMM-1 verwendet werden.

4.3 Großflächige Messungen ohne Überlappungsfelder

Um diesen Korrekturalgorithmus zu verifizieren, wurde eine Kalibrierkugel mit einem Durchmesser von 5 mm an vier benachbarten Positionen gemessen. Die Ergebnisse der vier Einzelmessungen wurden zu einer gemeinsamen Höhendatentopografie mit einer gesamten lateralen effektiven Fläche von $732 \mu\text{m} \times 732 \mu\text{m}$ und einem Pixelabstand von $0,3663 \mu\text{m}$ fusioniert (Bild 24). Die Auflösung hängt von der Optik ab. Im Vergleich mit dem fusionierten Ergebnis ohne Korrektur (Bild 24 (c)) der Sensororientierung ist das fusionierte Ergebnis mit Korrektur (Bild 24 (b)) genauer und ohne Versatz, Spalt oder Verformung [193].

Die Unsicherheit der Ergebnisse der Datenfusion wird von der Kalibrierung und der Korrektur der Sensorkippung, dem Messprozess sowie der zufälligen Abweichung beeinflusst. Die Unsicherheit der berechneten Regressionsparameter der Transformation, die zur Datenfusion verwendet werden, wird nicht nur durch den Iterationsprozess, sondern auch durch die zufällige Abweichung und die Messprozesse der Kalibrierung beeinflusst. Dies wiederum geht als Unsicherheit in die Ergebnisse der Datenfusion ein.

Um die Regressionsparameter zu berechnen bzw. eine bessere Überlappung zu erreichen, wurde das Kalibriergitter mit unterschiedlicher definierter Distanz in x - oder y -Richtung verschoben (vgl. Bild 22). Die Transformationsparameter wurden jeweils berechnet. Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten Regressionsparameter der Transformation und die zugehörigen Standardabweichungen, die durch die an 10 unterschiedlichen Positionen jeweils mit einer Verschiebung von $40 \mu\text{m}$ in x - und y -Richtung aufgenommenen Messdaten ermittelt wurden.

4 Integration eines WLI in die NMM-1

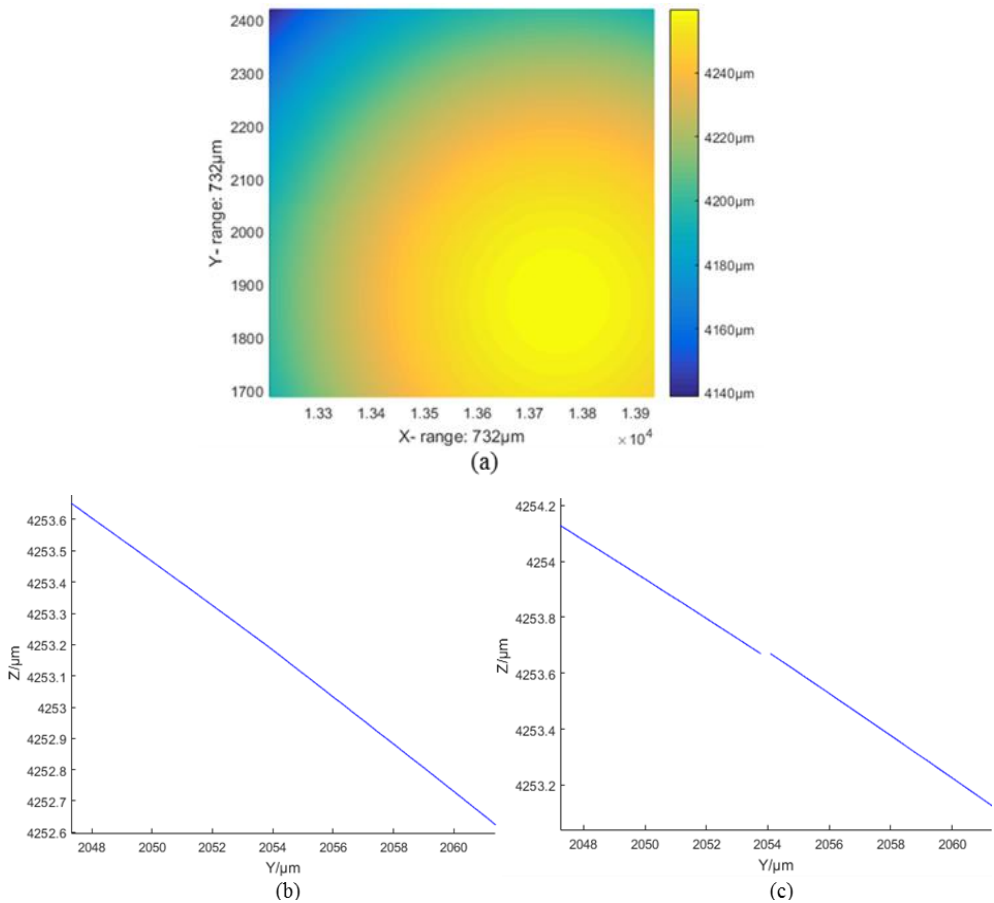


Bild 24: Fusioniertes Ergebnis einer Kalibrierkugel (a) sowie Ausschnitte einer Profillinie mit Korrektur (b) und einer Profillinie ohne Korrektur (c)

Tabelle 7: Parameter der Transformationsregression und ihre Standardabweichungen (Δx , Δy und Δz in μm , φ_x , φ_y und φ_z in Grad)

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung
Δx	0,1	0,005
Δy	-0,29	0,0071
Δz	-0,16	0,002
φ_x	$-1,48 \cdot 10^{-4}$	$8,54 \cdot 10^{-5}$
φ_y	$-9,4 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
φ_z	$-5,3 \cdot 10^{-5}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$

5 Das metrologische AFM

Neben den optischen Messmethoden werden sehr oft auch AFMs zur Topografiemessung verwendet, da sie die Oberfläche mit sehr guter Strukturauflösung darstellen können. Im Rahmen eines *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) Projekts „*Traceable three-dimensional nanometrology (3DNano)*“ [194] wurde ein neuer metrologischer AFM-Sensor entwickelt. Dieses Kapitel behandelt die Funktionsweise dieses metrologischen AFM für 3D-Messungen.

5.1 Das optische Messsystem

Eine neue Version eines metrologischen AFM-Messkopfes wurde auf Basis eines modifizierten Laserinterferometers entwickelt. Das Messsystem besteht aus einer abgesetzten Versorgungseinheit und dem Messkopf mit einem Interferometer zur Messung der Position, einem Deflektionsmesssystem zur Messung der Biegung und Torsion sowie einem Vorsatz, der *Cantilever*-Einheit, zur *Cantilever*-Halteung, -Justage und -Modulation. Die Längenmessung mit dem AFM mit integriertem Laserinterferometer kann über die Laserwellenlänge direkt auf die Meterdefinition zurückgeführt werden. AFMs mit besonderem Augenmerk auf die Rückführbarkeit der dimensionellen Messung werden „metrologische AFMs“ genannt. Die erste Version des Systemaufbaus ist in Bild 25 dargestellt. Dieser optische Messkopf wurde entwickelt, um gleichzeitige Messungen der Position, Biegung und Torsion der reflektierenden Rückseite des *Cantilevers* zu ermöglichen [195, 196].

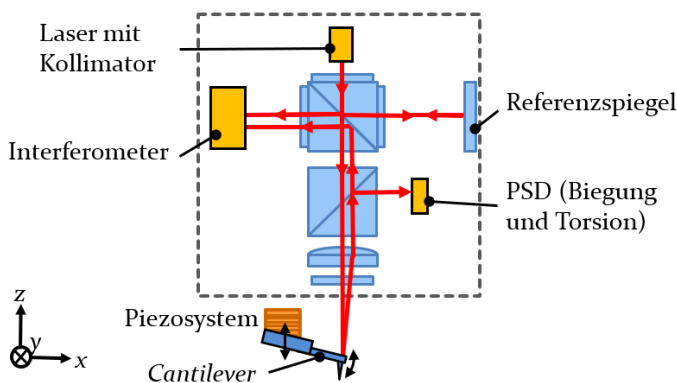


Bild 25: Funktionsprinzip des Messsystems für das AFM (Version 1) [195]

Dieser optische Messkopf wurde verbessert und angepasst für ein 3D-Mikrosondensystem. Der Hauptunterschied im optischen System besteht darin, dass der hin- und rückgehende Strahl im Messarm durch einen außermittigen Strahldurchgang durch die Fokuslinse geometrisch getrennt ist (vgl. Bild 26) [197, 198]. Das optische System verwendet nur einen einzigen fokussierten Laserstrahl eines He-Ne-Laser in der abgesetzten Versorgungseinheit mit einer Wellenlänge von 632,8 nm [199]. Die Laserlichtquelle ist mit dem Messkopf unter Verwendung einer polarisationserhaltenden Monomode-Faser gekoppelt. Die Faserübertragung des Laserlichts ermöglicht eine räumliche Trennung der Laserquelle und des Messkopfes. Dadurch beeinflusst die Abwärme der Laserquelle den Messaufbau nicht und die optische Justage wird vereinfacht. Außerdem wird die Größe des Sensorkopfes nur durch optische Elemente des Interferometers und des Deflektionsmesssystems bestimmt. Dies führt zu dem wesentlichen Vorteil eines kleinen und kompakten Aufbaus mit einer gesamten Abmessung von ungefähr 110 mm × 130 mm × 40 mm (inklusive Referenzarm). Die meisten Laserinterferometer mit einem Messstrahl können nur die Position in axialer Richtung (eine Verschiebung) und/oder nur von großen Reflektoren messen. Um die 3D-Informationen am *Cantilever* zu erfassen, sind zusätzliche Messungen der Winkel notwendig. Daher wird der reflektierte Strahl durch einen nicht polarisierenden Strahlteilerwürfel in zwei Teilstrahlen geteilt. Ein Teilstrahl wird zu einem positionsempfindlichen Detektor (PSD von engl. *position sensitive detector*), speziell einer Quadrantenfotodiode, weitergeleitet, um die Neigung um die *x*- und *y*-Achse zu erfassen. Der andere Teilstrahl wird zurück in das Interferometer geführt, um die vertikale Auslenkung des *Cantilevers* in Normalenrichtung der spiegelnden Rückseite zu bestimmen.

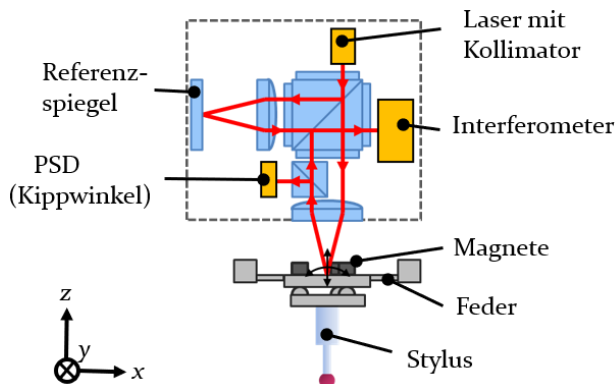


Bild 26: Funktionsprinzip des 3D-Mikrosondensystems (Version 2) [197]

recht steht. Deswegen muss die Richtung des die Fokuslinse durchlaufenden Strahls abgelenkt werden. Beim ersten System wurde deshalb der ganze Messkopf gedreht [195]. Die Ausrichtung kann jedoch auch umgesetzt werden, indem nur der Strahl nach der Fokuslinse senkrecht zur Rückseite des *Cantilevers* ausgerichtet wird. Zusätzlich wird von dem System erwartet, dass die Position des fokussierten Laserstrahls auf der Rückseite des *Cantilevers* sowohl axial als auch lateral einstellbar ist. Dies ist in der Praxis sehr nützlich, da das System nach dem Austausch des *Cantilevers* oder der gesamten *Cantilever*-Einheit angepasst werden kann und dies sogar bei unterschiedlichen Neigungswinkeln oder Längen der *Cantilever*.

5.1.2 Anpassung des Messkopfes

Eine Möglichkeit zur Justierung der Position und der Richtung des fokussierten Laserstrahls aufbauend auf dem Messkopfsystem aus [197] ist, dass drei Keilplatten im Messarm innerhalb der Brennweite der Konvexlinse als Justiereinheit eingesetzt werden, wie in Bild 28 darstellt.

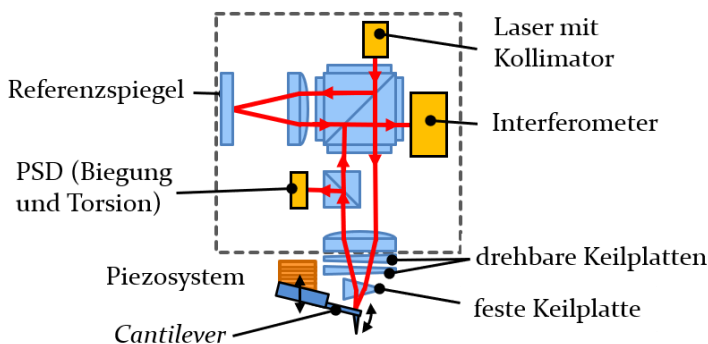


Bild 28: Messkopf mit drehbaren Keilplatten

Die hinzugefügten optischen Bauelemente dienen nicht nur zum Ablenken des Messstrahles, sondern auch zum Justieren der Lage des auf die Rückseite des *Cantilevers* fallenden Brennpunktes. Das Keilplattenpaar, welches auch als Risley-Prisma bekannt ist [201], besteht aus zwei dünnen Keilplatten, die eine identische Geometrie aufweisen. Mit diesem Keilplattenpaar kann ein Strahl innerhalb eines Kegelwinkels abgelenkt werden, wie in Bild 29 dargestellt. Die Strahllenkung wird durch eine Drehung der beiden Keilplatten zueinander und gemeinsam erreicht. Der Auslenkungswinkel, der von einer einzigen Keilplatte erzeugt wird, hängt von dem Brechungsindex und dem Keilwinkel ab. In Bild 29 (a) ist der Ablenkungswinkel einer einzigen Keilplatte zu sehen. Mittels zweier Keilplatten kann der Strahl auf eine beliebige Position innerhalb eines Kegels, mit dem vierfachen Ablen-

kungswinkel einer Keilplatte als Kegelwinkel, abgelenkt werden (Bild 29 (b)). Nach diesem Prinzip kann die Position des Fokuspunktes des Strahls innerhalb eines Kreises auf der Rückseite des *Cantilevers* eingestellt werden. Die Justage der Position des Brennpunktes kann durch Drehung des Keilprismenpaares realisiert werden. Die Verwendung der Keilprismen führt jedoch zu zusätzlichen Reflexionen an den Keilprismen und Störinterferenzen. Aufgrund des noch zusätzlich erforderlichen dritten Keils zur Realisierung der Ablenkung von 8° und des großen Platzbedarfs wurde diese Variante nicht genutzt, obwohl sie eine sehr langzeitstabile Justage erlaubt.

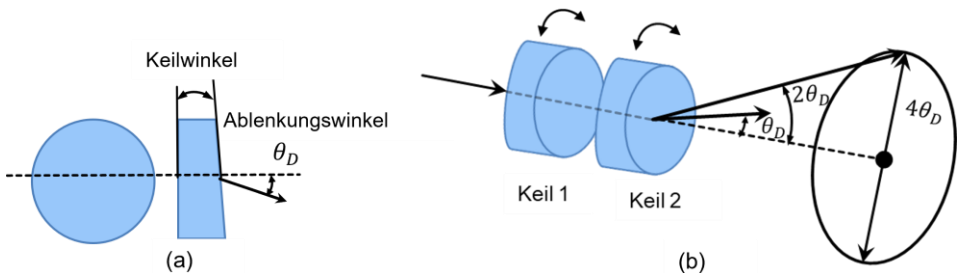


Bild 29: Ablenkung an einer Keilplatte (a) und Ablenkungsbereich von zwei Keilplatten (b)

Stattdessen werden zwei kippbare elliptische Planspiegel als Justiereinheit verwendet, um die Richtung des fokussierten Laserstrahls und die Position des Fokuspunktes auf der Rückseite des *Cantilevers* einzustellen.

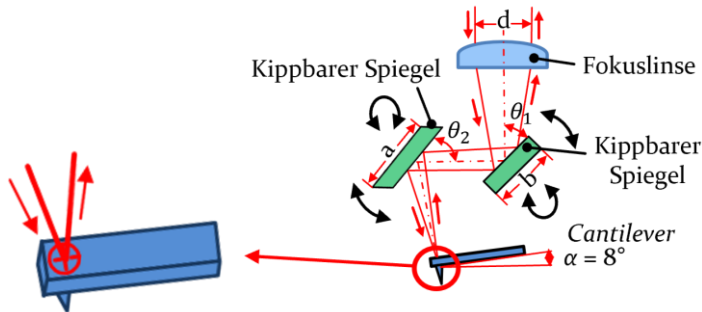


Bild 30: Schematische Darstellung der Auslegung der Justiereinheit mit zwei Planspiegeln

Bei der Umsetzung des Konzeptes sollten möglichst kommerzielle Standardbauteile eingesetzt werden. Zum Zeitpunkt der Konstruktion waren runde Laserspiegel in der kleinsten Standardausführung lediglich mit einem Durchmesser von 12,7 mm und einer Dicke von 2 mm–6 mm erhältlich. Dahingegen wurden Spiegel in elliptischer Form mit einem Maß von 10 mm \times 14 mm und einer Dicke von 2 mm angeboten. Aufgrund des geringen verfügbaren Platzes und um den Strahlengang während der Justage nicht zu unterbrechen, wurden zwei elliptische Spiegel ausgewählt und um 90°

zueinander angeordnet (Bild 30). Die zwei Spiegel wurden aus Hartglas in elliptischer Form hergestellt und mit Aluminium als Oberflächenspiegel beschichtet. Nach dem Abstand d (4 mm) zwischen dem einfallenden Strahl und dem ausfallenden Strahl ergibt sich für einen Spiegel mit $14 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ($a \times b$) Größe die maximal zulässige Neigung von der lateralen Achse:

$$90^\circ - \theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{4 \text{ mm}}{14 \text{ mm}}\right) \approx 73^\circ \quad (35)$$

Unter Berücksichtigung der Abweichungen am Spiegelrand, des Strahlabstands zwischen dem einfallenden Strahl und dem reflektierten Strahl, der zum Fokuspunkt hin abnimmt, der Fokusslänge der Fokuslinse, der Vermeidung von Kollision und Abschattungseffekten, wurde der Neigungswinkel des ersten Spiegels θ_1 als 45° verwendet. Für den zweiten Spiegel beträgt der Neigungswinkel:

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{1}{2}\alpha \quad (36)$$

Dabei ist der Winkel α , unter dem der *Cantilever* angebracht ist, auf 8° festgelegt. Daraus ergibt sich ein Neigungswinkel des zweiten Spiegels θ_2 von 49° .

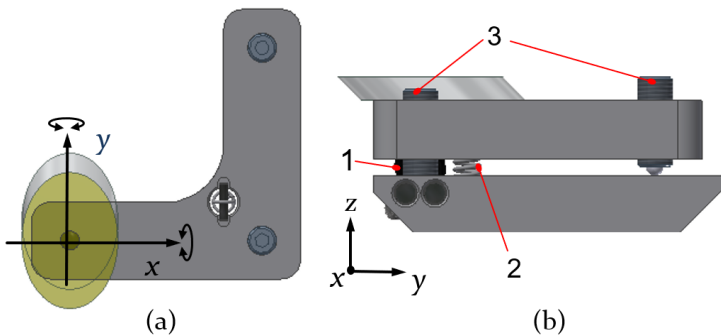


Bild 31: Darstellung einer der beiden Spiegeljustiereinheiten in der Draufsicht (a) und seitlichen Ansicht (b): 1 Unterstützungskugel, 2 Feder, 3 Feineinstellschrauben

Die präzise und langzeitstabile Winkeleinstellung des Spiegels ist hier sehr wichtig. In diesem Fall wird auf eine elektrische Einstellung bzw. eine Einstellung mittels eines Motors verzichtet, da das Volumen des Motors relativ groß und die Wartung relativ schwierig ist. Stattdessen wird eine manuelle Einstellung durch Feineinstellschrauben eingesetzt. Durch die Einstellung von lediglich einer Feineinstellschraube oder gleichzeitig von zwei Feineinstellschrauben kann der Spiegel jeweils um die x -Achse und die y -Achse

geneigt werden (Bild 31). Der einstellbare Winkel von einem Spiegel ist $\pm 3^\circ$, während der andere Spiegel fest ist. Entsprechend kann der Fokuspunkt auf der Rückseite des *Cantilevers* innerhalb eines Kreisdurchmessers von ca. $250\ \mu\text{m}$ – $290\ \mu\text{m}$ eingestellt werden (nur ein Spiegel wird justiert, während der andere fest ist).

Bei einer Mehrstrahlinterferenz handelt es sich um eine Interferenz, die durch mehrmalige Reflexionen eines Strahls zwischen zwei parallelen Grenzflächen verursacht wird. Die Mehrstrahlinterferenz kann in unterschiedlichen Situationen brauchbar oder störend während der Messung sein. In dem optischen System nach Bild 27 erzeugt die Mehrstrahlinterferenz eine Störung bei der Erfassung der Signale von der PSD. Praktisch wird häufig eine Keilplatte zur Minimierung der Mehrstrahlinterferenz bei Strahlteilerplatten verwendet. Das Funktionsprinzip ist wie in Bild 32 gezeigt: Die reflektierten Strahlen der Rückseite werden innerhalb der Platte abgelenkt und verursachen nur Interferenzen mit den reflektierten Strahlen der Vorderseite, bei denen die Interferenzstreifen so schmal sind, so dass der Einfluss der Störinterferenzen minimiert wird.

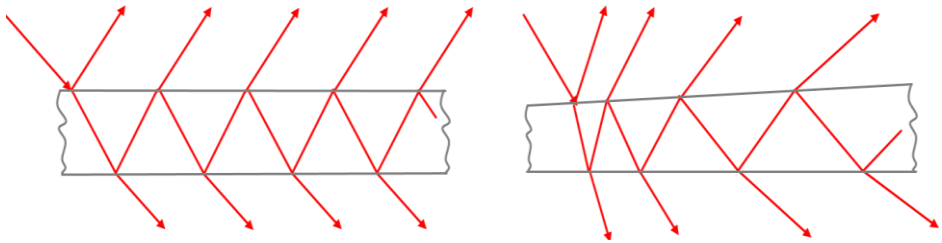


Bild 32: Mehrstrahlinterferenz an einer Strahlteilerplatte mit parallelen Oberflächen (a) und in einer Keilplatte (b)

Die Anwendung einer Keilplatte bietet die Möglichkeit den Strahlteilerwürfel vor der Quadrantenfotodiode in Bild 27 zu ersetzen und stattdessen mit der Keilplatte die Strahlen zu teilen und gleichzeitig die Störinterferenz zu verringern. Die Keilplatte, die im Messarm eingesetzt wird, besitzt eine Teilerbeschichtung mit einem Teilungsverhältnis von 50R/50T. Die einfallenden Strahlen werden also zu 50 % reflektiert und zu 50 % transmittiert. Der reflektierte Strahlenteil wird zur PSD geleitet, um die Biegung und Torsion zu detektieren. Der transmittierte Strahlenteil durchläuft die Keilplatte und wird zum Interferometer weitergeleitet. Um den seitlichen Versatz bzw. die Ablenkung, die durch die Brechung der Keilplatte hervorgerufen wird, zu kompensieren, wird eine zusätzliche transparente Keilplatte im Referenzarm eingesetzt. Der Unterschied zwischen der Strahlteilerkeilplatte und der Kompensationskeilplatte ist, dass beide Seiten der Kompensationskeilplatte mit einem Antireflexionscoating beschichtet sind.

Durch die Integration der Keilplatte in den Messarm stören die von dem $\lambda/4$ -Plättchen reflektierten Strahlen durch die Ablenkung der Keilplatte nicht mehr, da der Winkel zwischen den Strahlen für erfassbare Interferenzstreifen zu groß wird und zusätzlich die Fokusse der abgelenkten Strahlen neben dem *Cantilever* liegen (Bild 33).

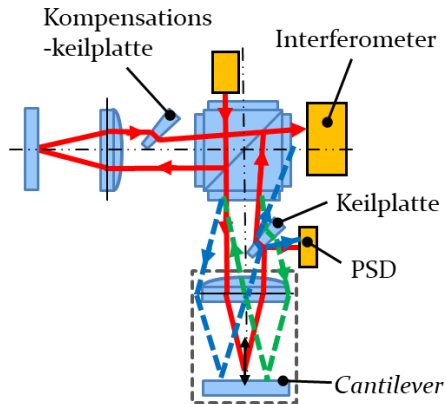


Bild 33: Verwendung von Keilplatten zur Überwindung von störender Interferenz

Um die Anpassung zu überprüfen, wurde zuerst ein Modell des Systems in der Software *OpticStudio* aufgebaut und eine Simulation durchgeführt (Bild 34).

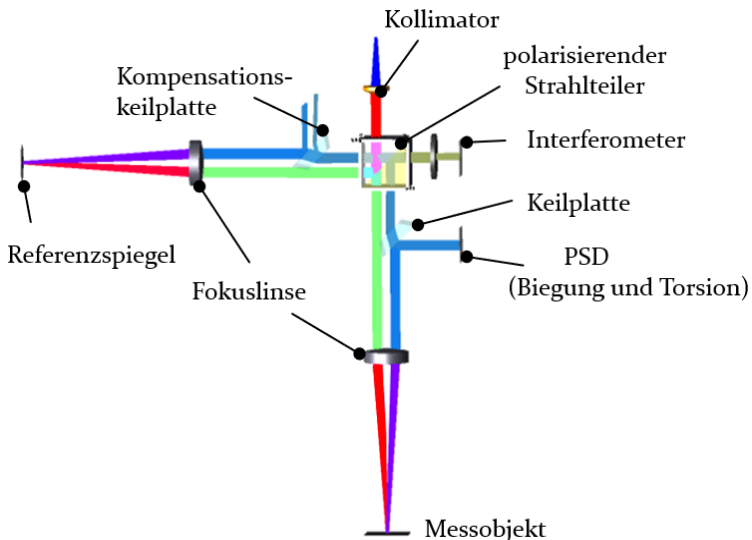


Bild 34: Simulationsaufbau in *OpticStudio*

Es wurden zwei Systeme simuliert, eines mit Strahlteilerplatten mit parallelen Oberflächen und eines mit Keilplatten mit einem Keilwinkel von $0,5^\circ$.

Die Simulationsergebnisse der kohärenten Bestrahlungsstärke auf der PSD von beiden Systemen wurden analysiert. In Bild 35 kann man die Mehrstrahlinterferenzen klar beobachten. Die mittlere Schwankung der Bestrahlungsstärke beträgt $0,005 \text{ Watt/cm}^2$. Das Simulationsergebnis des Systems mit den Keilplatten zeigt das, was bereits erwartet wurde, nämlich, dass die Verwendung der Keilplatte den Einfluss der Mehrstrahlinterferenz deutlich reduzieren kann (Bild 36).

Bei der Herstellung der Keilplatten muss berücksichtigt werden, dass der Ablenkwinkel der beiden Strahlen in Mess- und Referenzarm so identisch wie möglich sein muss. Damit können die Ausbreitungsrichtungen der beiden Strahlen wieder parallel sein und sich auf den Detektoren überlagern. Daher wurden die beiden Keilplatten aus einer Keilplatte geschnitten und dann mit unterschiedlichem *Coating* beschichtet.

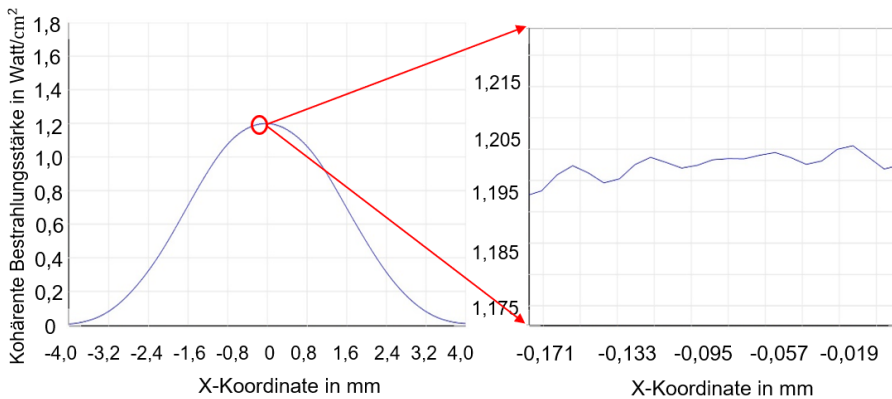


Bild 35: Simulationsergebnis für Platten mit parallelen Oberflächen

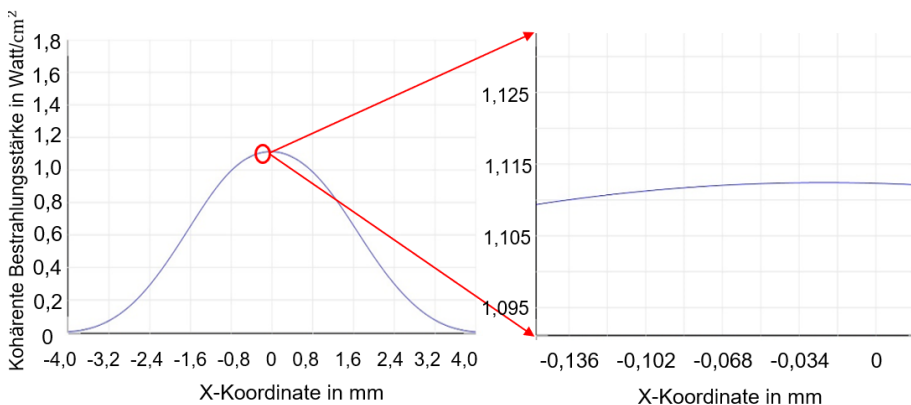


Bild 36: Simulationsergebnis für Keilplatten mit einem Keilwinkel von $0,5^\circ$

Zusätzlich wurden in das neue Messsystem Kameras zur Beobachtung der Justage des fokussierten Strahls sowie des Messablaufes integriert. Diese sind ebenfalls hilfreich für die Beobachtung des *Cantilevers* (z. B. Brechen des *Cantilevers*) und die visuelle Kontrolle bei der Annäherung des *Cantilevers* an die Messoberfläche. Die schematische Darstellung des neuen Messsystems ist in Bild 37 dargestellt.

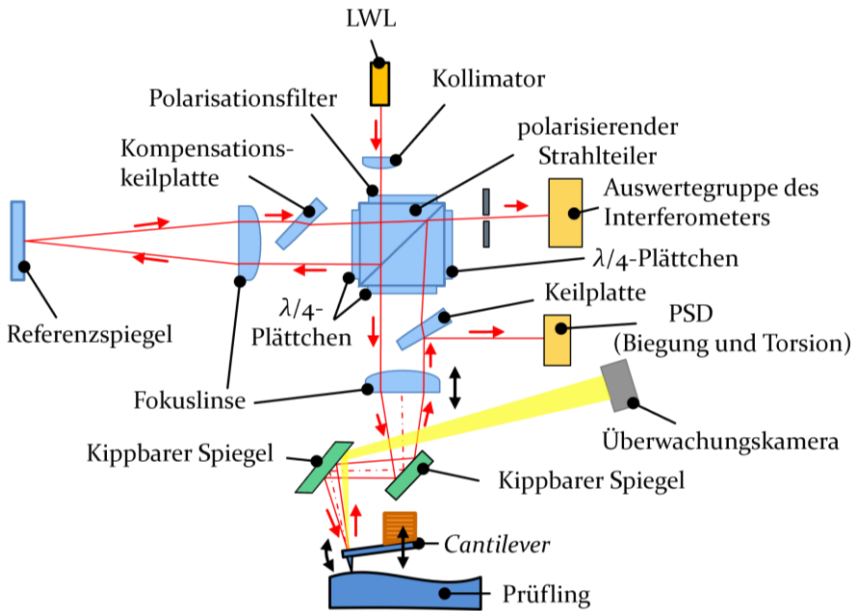


Bild 37: Schematische Darstellung des optischen Designs des neuen Messsystems

5.1.3 Signalentstehung

Entstehung der Interferenzsignale

Der Laserstrahl wird dem Sensorkopf über einen polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter (LWL) zugeführt. Der kollimierte Strahl besitzt eine zum Strahlteilerwürfel diagonal ausgerichtete Polarisationsrichtung und gelangt durch den Polarisationsfilter, dessen Polarisationsrichtung identisch zum Laserstrahl ist, zur Teilerschicht des Teilerwürfels (Bild 37 polarisierender Strahlteiler). Der linearpolarisierte ($\varphi_x - \varphi_y = \varphi_e - \varphi_e = 0$) Laserstrahl nach dem Polarisationsfilter lässt sich durch einen Jones-Vektor beschreiben [97] (Abschnitt 3.1):

$$\vec{E}_{\text{ein}} = \begin{bmatrix} A_x \cdot e^{j\varphi_e} \\ A_y \cdot e^{j\varphi_e} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Bei dem Teilerwürfel wird das Licht aufgrund der diagonal ausgerichteten Polarisationsrichtung zu 50 % durchgelassen bzw. reflektiert. Der P -polarisierte (parallel zur Einfallsebene) Anteil wird zum Messobjekt als Messstrahl weitergeleitet, der andere bzw. der S -polarisierte (senkrecht zur Einfallsebene) Anteil wird zum Referenzspiegel als Referenzstrahl geleitet. Beide Strahlen durchlaufen dann je ein $\lambda/4$ -Plättchen, die das linear polarisierte Licht in zirkular polarisiertes Licht umwandeln. Durch die Reflexion des Referenzstrahls und des Messstrahls jeweils am Referenzspiegel und Messobjekt, was in dem gegebenen Fall der *Cantilever*-Rückseite entspricht, ändert sich der Drehsinn der zirkularen Polarisation. Nach dem erneuten Durchlauf des $\lambda/4$ -Plättchens hat sich der lineare Polarisationszustand des Messstrahls wieder verändert bzw. um 90° gedreht, sodass er komplett an der Teilerschicht reflektiert wird. [174, 202] Demgegenüber durchläuft der Referenzstrahl nach dem zweiten Durchlauf des $\lambda/4$ -Plättchens vollständig die Teilerschicht. Entsprechend des zweimaligen Durchlaufens des Strahls ergeben sich die Phasenänderungen der Messarmlänge L_{mess} und der Referenzlänge L_{ref} zu [97]:

$$\varphi_{\text{mess}} = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\text{mess}}, \quad (38)$$

$$\varphi_{\text{ref}} = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\text{ref}}. \quad (39)$$

Zwischen der Strahlteilerschicht und einem weiteren $\lambda/4$ -Plättchen überlagern sich die zwei orthogonal zueinander linearpolarisierten Strahlen, die allerdings nicht interferenzfähig sind. Nach dem Durchlauf des weiteren $\lambda/4$ -Plättchens entstehen aus beiden linearpolarisierten Strahlen ein links- und ein rechtszirkular polarisierter Strahl, die miteinander interferieren können. Nach dem $\lambda/4$ -Plättchen ist die Polarisationsrichtung des resultierenden Strahls von der Phasendifferenz zwischen dem Messstrahl und dem Referenzstrahl abhängig. Die Phasendifferenz zwischen dem Messstrahl und dem Referenzstrahl kann aus den Gleichungen (38) und (39) abgeleitet werden [97]:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{mess}} - \varphi_{\text{ref}} = \frac{4\pi}{\lambda} (L_{\text{mess}} - L_{\text{ref}}). \quad (40)$$

Der Laserstrahl wird zur Auswertegruppe des Interferometers des Messkopfes geleitet (Bild 43). Wie in Abschnitt 3.1 (S. 25) bereits geschrieben, lassen sich die ausgehenden Teilstrahlvektoren analytisch durch Multiplikation des Vektors \vec{E}_{ein} (Gleichung (37)) mit den Jones-Matrizen der durchlaufenen optischen Bauteile (Tabelle 1) des Systems \mathbf{M}_{sys} sowie das Superpositionsprinzip der Vektoren des Mess- und Referenzstrahls darstellen:

$$\vec{E}_{\text{aus}}(\theta_{\text{PTW}}) = \mathbf{M}_{\text{sys}} \cdot \vec{E}_{\text{ein}}. \quad (41)$$

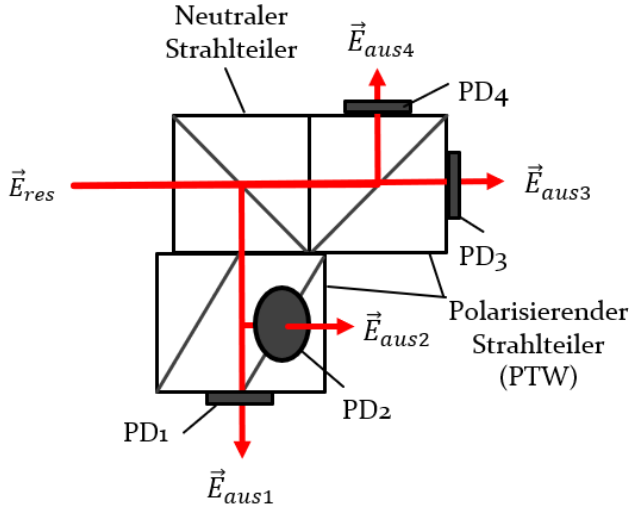


Bild 38: Auswertegruppe des Interferometers des neuen Messkopfes (nach [97])

Eine laufende elektromagnetische Welle transportiert Energie von einem Ort zum anderen. Die Feldstärke der Welle kann nicht direkt gemessen werden. Von einem optoelektronischen Empfänger wird Licht als die energetische Größe Bestrahlungsstärke erfasst [203]. Die Leistungsdichte entspricht dem Betrag des Poynting-Vektors, die häufig als Intensität I bezeichnet wird. Dieser Betrag $|\vec{S}|$ kann aus der elektrischen oder magnetischen Feldstärke durch die folgende Gleichung berechnet werden [93]:

$$|\vec{S}| = S = c\epsilon_r\epsilon_0\vec{E}^2 = c\mu_r\mu_0\vec{B}^2. \quad (42)$$

Dabei ist ϵ_r die relative Permittivität, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, μ_r die relative Permeabilität, μ_0 die magnetische Feldkonstante und c die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Der Mittelwert der Strahlungsstärke ist gegeben durch [93]:

$$\bar{S} = I = \frac{1}{2}c\epsilon_r\epsilon_0\vec{E}^2 = \frac{1}{2}c\mu_r\mu_0\vec{B}^2. \quad (43)$$

Ein Fotoempfänger, der zur Messung der Strahlungsstärke des Lichts eingesetzt wird, kann infolge der hohen Frequenz des Lichtes immer nur den Mittelwert \bar{S} anzeigen [93]. Gleichung (43) zeigt jedoch, dass die gemessene Strahlungsstärke bzw. die Lichtintensität der Vektoramplitude der elektrischen Feldstärke dazu proportional ist. In der komplexen Darstellung erfordert die Leistungsberechnung die Multiplikation der komplexen und konjugiert komplexen Feldstärke E und E^* [197]:

$$I \cong E \cdot E^* \quad (44)$$

Nach dem Einsetzen der Gleichung (41) in Gleichung (44) ergibt sich folgende normierte Intensität:

$$I_{\text{aus}}(\theta_{\text{PTW}}) = 1 + \cos(\Delta\varphi - 2\theta_{\text{PTW}}). \quad (45)$$

Der interferenzfähige Strahl wird von der Auswertegruppe des Interferometers (siehe Bild 38) aufgenommen und analysiert. Der Strahl wird durch einen neutralen Strahlteiler und zwei polarisierende Strahlteiler in 4 Teilstrahlen aufgeteilt. An den Ausgängen der polarisierenden Strahlteiler sind vier Fotodioden PD₁–PD₄ positioniert. Die Achsen der jeweiligen polarisierenden Strahlteiler sind in einem Winkel von 90° angeordnet, so dass der Phasenunterschied von den Wechselanteilen der Intensitätssignale bei 180° liegt (Gleichung (45)) und deshalb jeweils ein Differenzpaar der Quadratursignale bereitstellen. Der Strahlteiler, an dem die PD₁ und die PD₂ positioniert sind, ist um 45° gedreht. Die Phase jedes Intensitätssignals repräsentiert die Interferenz für eine Polarisationsrichtung der sich überlagernden Mess- und Referenzstrahlen bzw. die Längeninformation. Der Fotodiodenstrom ist direkt proportional zu der Intensität des einfallenden Strahls. Nach der optoelektrischen Wandlung gibt es vier Signale I_{PD1} , I_{PD3} , I_{PD2} , I_{PD4} , die durch die nachfolgenden vier Gleichungen beschrieben werden können [97]:

$$I_{\text{PD1}} = I_{\text{konst}} + I_{\text{wechsel}} \cdot \cos\left(\Delta\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (46)$$

$$I_{\text{PD2}} = I_{\text{konst}} + I_{\text{wechsel}} \cdot \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (47)$$

$$I_{\text{PD3}} = I_{\text{konst}} + I_{\text{wechsel}} \cdot \cos(\Delta\varphi + \pi) \quad (48)$$

$$I_{\text{PD4}} = I_{\text{konst}} + I_{\text{wechsel}} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (49)$$

Um die Differenzsignale zu berechnen, werden sie in der Auswerteelektronik voneinander subtrahiert. Dadurch werden gleich große Gleichanteile sowie Störeinflüsse wie Umgebungslicht eliminiert. Es lassen sich zwei Gleichungen aufstellen, die die Differenzsignale beschreiben [97]:

$$I_{\text{cos}} = I_{\text{PD4}} - I_{\text{PD3}} = 2I_{\text{wechsel}} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (50)$$

$$I_{\text{sin}} = I_{\text{PD1}} - I_{\text{PD2}} = 2I_{\text{wechsel}} \cdot \sin(\Delta\varphi) \quad (51)$$

Entstehung der PSD-Signale

Zum Messen der Winkelsignale bzw. der Biegung und Torsion wird die Quadrantenfotodiode eingesetzt. Bei den Messungen wird der von der Oberfläche des zu messenden Objekts, was im Falle des AFM die Rückseite des *Cantilevers* ist, reflektierte Strahl teilweise zur interferometrischen Auswertung sowie zur Deflektionsmessung genutzt. Ein Auswandern auf der PSD wird von der Kippung des *Cantilevers* verursacht und durch die Fokulinse in einen Parallelversatz des Strahls gewandelt. Das auf die Quadrantenfotodiode auftreffende Licht wird in elektrische Ströme umgewandelt. Die Ströme hängen von der Position des Lichts, dessen Intensitätsverteilung ab [174, 204]. Um die Kippung bzw. die Winkelinformation von φ_x und φ_y zu erfassen, werden die Ströme der vier Fotodioden getrennt erfasst (Bild 39). Trifft der Lichtstrahl auf die Quadrantenfotodiode, werden die Fotoströme mittels je eines Operationsverstärkers in eine der Lichtmenge entsprechende Spannung gewandelt. Die vier resultierenden Spannungssignale U_A , U_B , U_C , U_D werden durch entsprechende Anordnung von Summationsschaltung und Differenzschaltung verarbeitet und anschließend zu den Ausgangssignalen für die Winkel U_{φ_x} und U_{φ_y} normiert (Gleichungen (52) und (53) [204]:

$$U_{\varphi_x} = \frac{(U_A + U_D) - (U_B + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \quad (52)$$

$$U_{\varphi_y} = \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \quad (53)$$

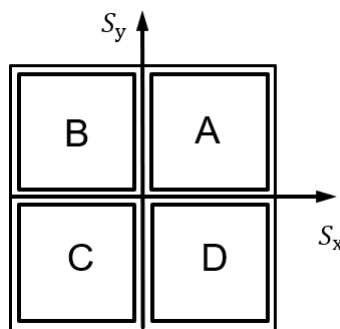


Bild 39 Anordnung der Empfangsdioden einer Quadrantenfotodiode

Die lateralen Positionen s_x und s_y können nach der Kalibrierung der Koeffizienten k_x und k_y mit den untenstehenden Formeln berechnet werden [174]:

$$s_x = k_x \frac{(U_B + U_C) - (U_A + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \quad (54)$$

$$s_y = k_y \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \quad (55)$$

Die Positionswerte s_x und s_y können mit der Brennweite f der Fokuslinse in die Winkelwerte α_x und α_y umgerechnet werden [174]:

$$\alpha_x = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s_x}{f}\right) \quad (56)$$

$$\alpha_y = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s_y}{f}\right) \quad (57)$$

Das folgende Bild 40 zeigt den neu hergestellten Messkopf. Darin sind alle optischen und mechanischen Elemente, elektromechanische Komponenten zur Erfassung des Interferenzsignals sowie die Quadrantenfotodiode mit Vorverstärkern enthalten. Der Sensorkopf wird durch den Lichtwellenleiter mit Laserlicht versorgt.

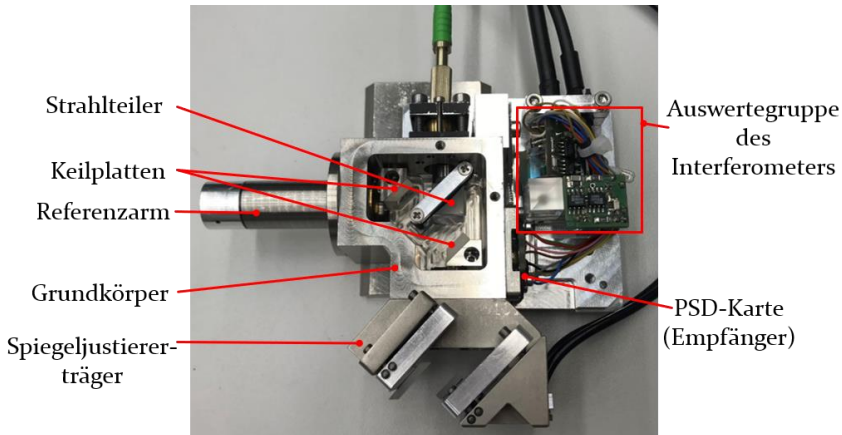


Bild 40: AFM-Messkopf

5.2 Vorsatz zur Cantilever-Halterung, -Justage und -Modulation

Die elektrische und mechanische Verbindung des Messsystems und des Tastsystems wurde in Absprache mit der PTB entwickelt, um einen Technologietransfer zu ermöglichen.

Der Alignment-Chip (Chip zur Aufnahme und Ausrichtung des *Cantilevers*) ist auf einem abnehmbaren Träger (*Plug*) montiert, um den *Cantilever* einfach austauschen zu können (ohne den gesamten Messkopf aus der NMM-1 auszubauen). Der Träger des *Cantilevers* ist magnetisch über eine kinematische Kugel-V-Nut-Verbindung (*Maxwell kinematic system*) [205] mit dem Trägerhalter gekoppelt. Bild 41 zeigt das Prinzip der mechanischen und elektrischen Verbindung zwischen dem Träger des *Cantilevers* und dem Messsystem.

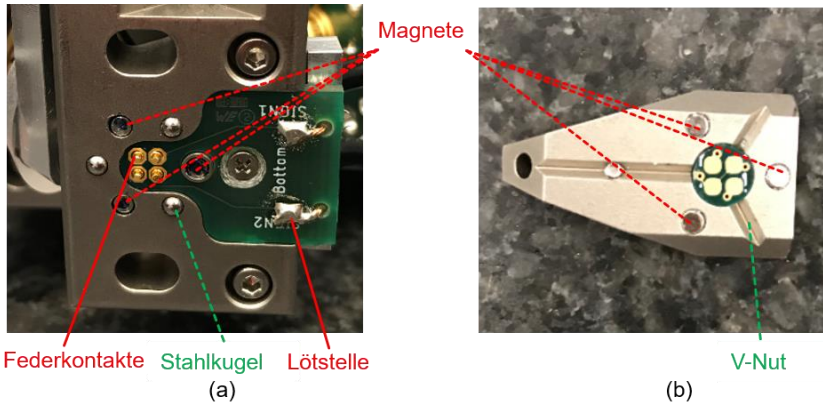


Bild 41: Prinzip der mechanischen und elektrischen Schnittstelle zwischen dem Trägerhalter (a) und dem Träger des *Cantilevers* (b)

Das neue MAFM ist sowohl für statische als auch dynamische Messungen vorgesehen. Beim dynamischen Modus wird der *Cantilever* üblicherweise von einem Piezoaktor angetrieben und oszilliert nur in der vertikalen Richtung. Dies ist prinzipiell nicht ideal für das Erfassen von vertikalen Seitenwänden, da die Spitze nahezu parallel zu der zu messenden Oberfläche oszilliert. Zur Erfassung von Seitenwänden eignet sich die von Dai et al. in [206] beschriebene Kombination von *flared tips* und vertikalem und torsionalem Oszillationsmodus [207]. Dafür wurden anstelle eines zwei piezoelektrische Aktoren im Träger integriert (vgl. Bild 42). Die elektrische Kontaktierung des Trägers für die Piezoanregung wird durch Federkontakte am Trägerhalter (vgl. Bild 41 (a)) und vergoldete Kontaktflächen am Träger (vgl. Bild 41 (b)) realisiert.

Der *Cantilever* kann als einseitig eingespannter dreidimensionaler Balken betrachtet werden. In Bild 8 (Abschnitt 3.3.2, S. 36) sind die zwei hauptsächlichsten Deformationsformen eines *Cantilevers* zu sehen: vertikale Biegung (um y -Achse), Torsion (um x -Achse). Die kombinierte Deformation kann durch gleichzeitige Messung von Position, Biegung und Torsion (Bild 42 (a)) des *Cantilevers* bestimmt werden. Bild 42 (c) zeigt, wie der *Cantilever*

ver durch eine Feder, welche zum Wechsel des *Cantilevers* weggeschwenkt werden kann, in dem *Alignment-Chip* gehalten wird. Der *Cantilever* mit seiner Halterung bzw. dem *Alignment-Chip* kann durch die zwei piezoelektrischen Aktoren angeregt werden. Wie von *Dai et al.* in [206] beschrieben, kann durch Anlegen eines Paares von Ansteuersignalen mit gleicher Phase bei einer Frequenz in der Nähe der vertikalen Resonanzfrequenz des *Cantilevers* die vertikale Schwingung der Cantileverspitze erzeugt werden. Im Vergleich dazu werden beim Torsion-Modus zwei Ansteuersignale mit einer Phasenverschiebung von 180° bei einer Frequenz in der Nähe der Torsionsresonanzfrequenz des *Cantilevers* angelegt, damit die laterale Oszillation der *Cantilever*-Spitze generiert werden kann.

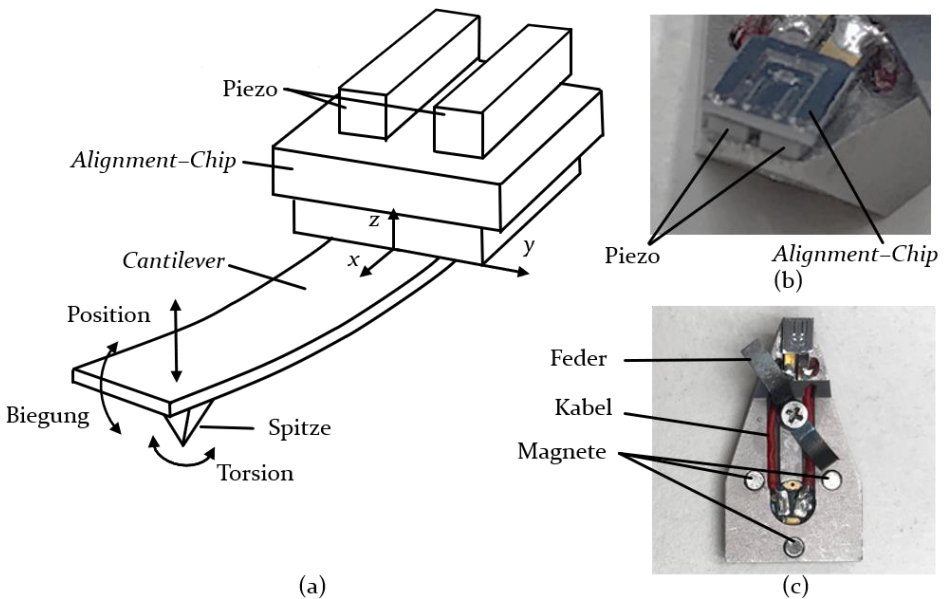


Bild 42: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips (a) und das realisierte Tastsystem (b), (c)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden *Cantilever* der *XY-Alignment*-Serie von der Firma Nanosensors zur Messung verwendet (Bild 43). Die speziell entwickelten Sonden ermöglichen eine einfache und reproduzierbare Ausrichtung der Spitze des *Cantilevers*. Aufgrund der angepassten Geometrie des *Cantilever-Chips*, an dem der *Cantilever* befestigt ist, können *Cantilever* von vier verschiedenen Längen mit gleicher Position der Spitze in dem *Alignment-Chip* montiert werden. Die *Cantilever* für CM und IM besitzen jeweils eine durchschnittliche Länge L von $225\ \mu\text{m}$ und $128\ \mu\text{m}$, eine durchschnittliche Breite w von $48\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$. Die Spitzenhöhe beträgt $10\ \mu\text{m}$ bis $15\ \mu\text{m}$ und der Radius der Spitze weniger als $10\ \text{nm}$. [208]

Beim Einsatz spielt die Größe des Laserspots des kollimierten Strahlenbündels auf der Rückseite des *Cantilevers* eine wichtige Rolle für die Signalqualität bezüglich der Empfindlichkeit und der Störinterferenz auf der PSD [209, 210]. Im vorliegenden Fall werden *Cantilever* nicht nur für den CM, sondern auch für den IM verwendet. Deswegen muss der Fokusspot des Laserstrahls auf die Rückseite des *Cantilevers* mit einem Durchmesser $< 30 \mu\text{m}$ abgebildet werden. Das verwendete Strahlenbündel wird als Gauß-Strahl betrachtet.

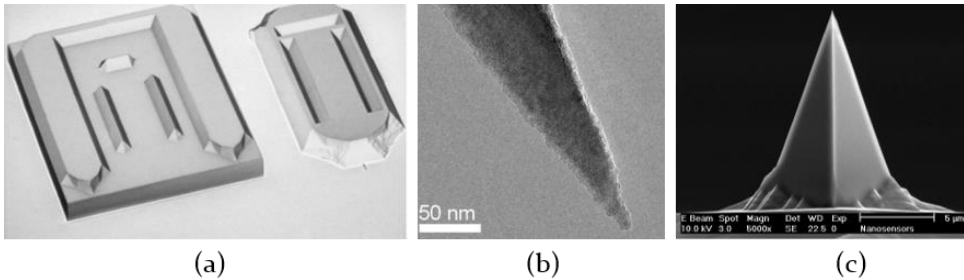


Bild 43: SEM Image des *Alignment-Chips* und Rückseite des *Cantilever-Chips* (a) und der Spitze des *Cantilevers* (b), (c) [208]

In den optischen Wegen am Messkopf bzw. des Messarms und des Referenzarms sind ausgehend vom Faseraustritt jeweils zwei Linsen wirksam, die Kollimationslinse und die Fokussierlinse, die den Strahldurchmesser auf dem *Cantilever* beeinflussen und bei Berechnungen berücksichtigt werden müssen. In Bild 44 ist die im Messkopf vorhandene Anordnung der Linsen in einem optischen Weg veranschaulicht. Der Gauß-Strahl ist durch die roten Linien dargestellt. Die erste Linse ist die Kollimationslinse mit einer Brennweite f_0 von 7,5 mm. Die zweite ist die Fokussierlinse mit einer Brennweite f_1 von 40 mm. Die Strahltaile w_0 wird durch die Größe des Kerndurchmessers der polarisationserhaltenden Monomodefaser des Lasers bestimmt und in diesem Fall mit $1,75 \mu\text{m}$ [211] angenommen. Anhand der folgenden Gleichungen (58) und (59) abhängig vom Radius w_0 der Strahltaile des Lasers und dem Abstand s zwischen der Taille und der ersten Linse werden der Tailenradius w_0' und die Entfernung der Taille s' von dieser Linse ermittelt [96]. Durch erneute Anwendung der Gleichungen für die zweite Abbildung lassen sich die Taille w_0'' und die Entfernung dieser Taille von der zweiten Linse s_1'' ermitteln.

$$s' = \frac{f_0^2(f_0 - s)}{(f_0 - s)^2 + z_R^2} - f_0 \quad (58)$$

$$w_0' = w_0 \cdot f_0 \sqrt{\frac{1}{(s - f_0)^2 + z_R^2}} \quad (59)$$

Dabei wird $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$ als Rayleighlänge bezeichnet und ist der Abstand zwischen der Strahltaile w_0 und der Stelle in Ausbreitungsrichtung z , bei der der Radius des Strahls auf $\sqrt{2}w_0$ aufgeweitet ist [96].

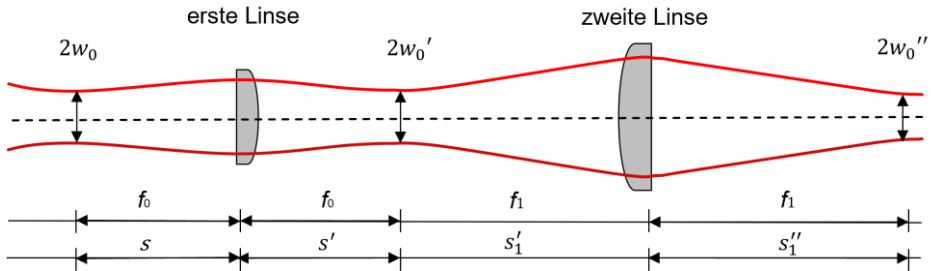


Bild 44: Darstellung der zweifachen Abbildung eines Gauß-Strahls

Der Durchmesser des Strahls bzw. $2w_0''$ an der Stelle, an der der Strahl fokussiert ist, wird mit $18,67 \mu\text{m}$ bestimmt und ist kleiner als die Breite der verwendeten *Cantilever*. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die eingesetzte Optik für die Fokussierung auf die *Cantilever*-Rückseite in diesem Fall geeignet ist.

5.3 Montage der optischen Elemente und Ausrichtung des Messkopfes

Um die erwartete und optimale Funktion des optischen Messkopfes zu erreichen, müssen die optischen Elemente exakt positioniert, montiert und vor der Messung möglichst genau ausgerichtet werden. Beispielsweise muss der Messstrahl in einem Winkelbereich von $90^\circ \pm 2'$ auf den Messreflektor bzw. die Rückseite des *Cantilevers* auftreffen. Die Abweichung erster Ordnung, die durch den Parallelversatz s zwischen der Messstrahlrichtung und der Messrichtung bei einer Verkippung des Messobjekts hervorgerufen wird, sowie die Abweichung zweiter Ordnung, die durch Richtungsabweichung der Messstrahlrichtung gegenüber der Messrichtung unter dem Winkel α_r verursacht wird, können prinzipiell entstehen [174] (Bild 45). Dies muss bei dem Einbau und der Ausrichtung der Komponenten des Messkopfes sowie des Messobjekts bzw. des *Cantilevers* berücksichtigt werden, das heißt, es sollte gewährleistet sein, dass Messstrahl und Messrichtung fluchtend angeordnet sind. Die Abweichung erster Ordnung Δl_1 und

die Abweichung zweiter Ordnung Δl_2 können nach der folgenden Gleichung (60) und Gleichung (61) berechnet werden:

$$\Delta l_1 = s \cdot \tan(\alpha_r) \tag{60}$$

$$\Delta l_2 = l \cdot (1 - \cos(\alpha_r)) \text{ mit } l \text{ der realen Messlänge} \tag{61}$$

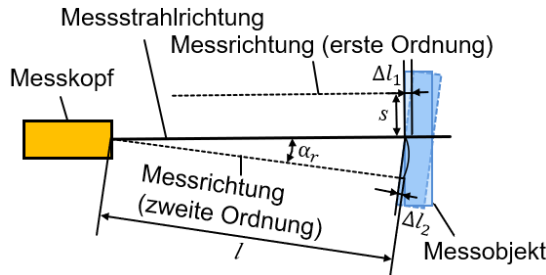


Bild 45: Abweichungen erster und zweiter Ordnung

Um die einbaubedingten Abweichungen zu vermeiden oder zu minimieren, werden Justagen und Abgleiche durchgeführt. Die exakte Position der Keilplatten, die Richtung und die Position des Laserstrahls, der Fokus der Linsen und die Nullposition der Quadrantenfotodiode müssen mit größter Sorgfalt justiert werden.

Der aus der Faser austretende Laserstrahl weist eine starke Divergenz auf und sollte, wie bereits beschrieben, als Gauß-Strahl betrachtet werden. Im Querschnitt zeigt der Gauß-Strahl ein Profil gemäß einer gaußschen Kurve mit einer Breite, die entlang der Ausbreitungsachse variiert. Die divergierende Strahlung des Laserstrahls kann durch Linsensysteme fokussiert oder kollimiert werden. Die einfachste und beliebteste Weise, einen Laserstrahl zu kollimieren, ist die Verwendung einer einzelnen asphärischen Linse als Kollimationslinse. Der Kollimator, bestehend aus divergierender Lichtquelle und Kollimationslinse sowie deren mechanische Verbindung, kann Strahlen mit annähernd parallelem Strahlengang erzeugen.

Im Sensorkopf werden die Kollimatorlinse und der LWL durch zwei in x - und y -Richtung verschiebbare Halterungsplatten mit Kegelbohrungen befestigt und durch eine gebohrte Kugel verbunden (Bild 46). Damit kann die Richtung (Rotation um x -, y - und z -Achse) sowie Position (x - und y -Position) des Strahls durch Justage der Kugel realisiert werden. Die Polarisationsrichtung des Laserstrahls muss so genau wie möglich zur Transmissionsrichtung des Polarisationsfilters (Bild 37, S.72) passen, damit so viel Laserstrahlung wie möglich durch das Polarisationsfilter gelangen kann. Die gebohrte Kugel wird so rotiert, dass die Richtung zum Polarisationsfilter passt, damit die maximal mögliche Leistung in den Strahlteilerwürfel ein-

tritt. Dieser Vorgang wird mit Hilfe eines Lichtleistungsmessgeräts durchgeführt. Die x - und y -Position des Laserstrahls kann über das Spaltmaß zwischen den Schrauben und den Halterungsplatten eingestellt werden (Bild 46 (a)), so dass der Laserstrahl das optische System wie vorgesehen durchläuft. In dem Messkopf durchläuft der Laserstrahl nicht die Mitte des polarisierenden Strahlteilers und der Fokusslinse. Der einfallende und der reflektierte Strahl sind geometrisch getrennt [197].

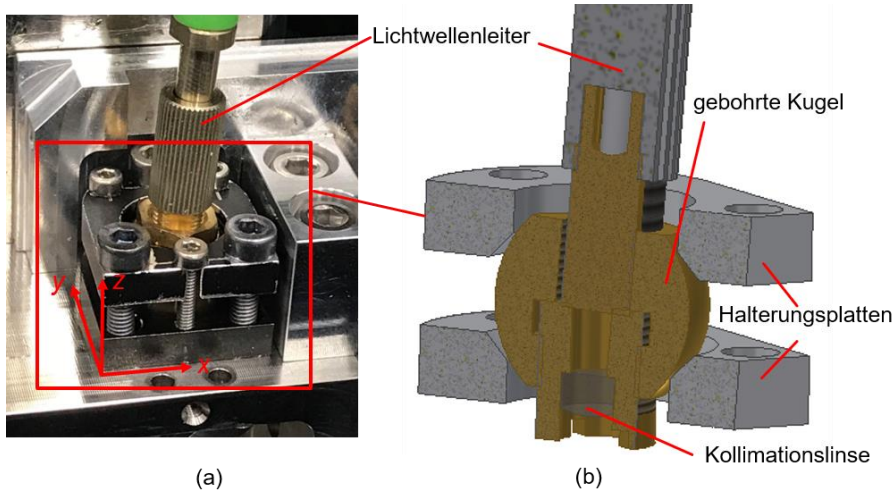


Bild 46: Kollimator (a) und Schnittdarstellung (b) mit LWL, Kollimationslinse und Halterung

Da die meisten optischen Elemente am Grundgehäuse des Messkopfs befestigt sind, muss die Ausrichtung des Laserstrahls zum Gehäuse oder zur Messrichtung (Rotation der Kugel um x - und y -Achse) durchgeführt werden.

Der polarisierende Strahlteiler besteht aus zwei 90° -Prismen. Die Hypotenusenoberfläche eines Prismas ist beschichtet, um S -polarisiertes und P -polarisiertes Licht zu reflektieren bzw. durchzulassen. Die beiden Prismen des Strahlteilers sind so miteinander verkittet, dass sie einen Würfel bilden. Um eine Beschädigung des Zements durch die Montage und Befestigung sowie Messgerätedriften zu vermeiden, sollte die Kittschicht nicht zu sehr belastet werden. Der Polarisationsstrahlteiler wird an zwei gefrästen Kanten angelegt und mit einem Bügel auf die Grundfläche eines Prismas gedrückt. Ein Schutzgummi ist zwischen dem Strahlteiler und dem Bügel platziert (Bild 47 (b)).

Die Position und Orientierung der Keilplatten in dem Strahlengang spielen eine sehr wichtige Rolle für die Interferometersignale (Bild 47). Die durch

die Keilplatten verursachten Ablenkungen und Versätze des Mess- und Referenzstrahls müssen an der Stelle zusammenpassen, an der sie sich miteinander überlagern sollen. Die Keilplatten werden jeweils mit der vorgesehenen Halterung verklebt und anschließend am Grundgehäuse angeschraubt. Die Positionierung und Ausrichtung der Keilplatten mit den Halterungen erfolgen mit Hilfe von zwei Parallelendmaßen (Bild 47 (b)).

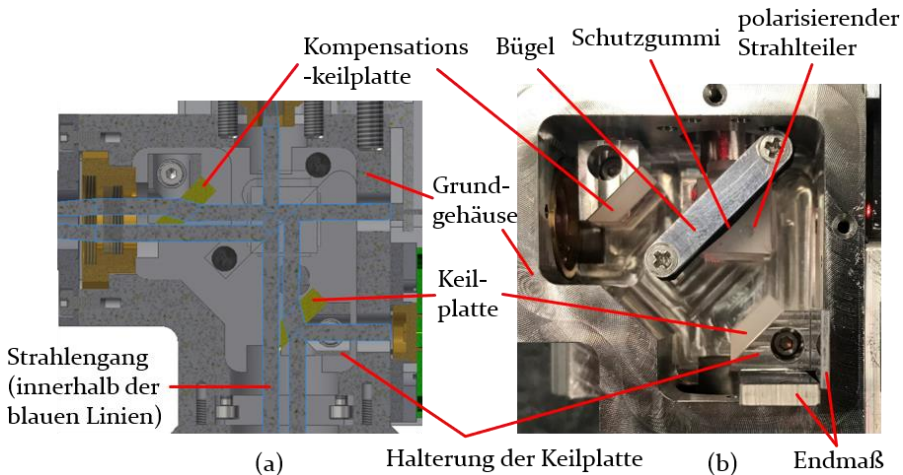


Bild 47: Querschnitt inkl. Strahlengang (a) und Grundgehäuse mit den optischen Elementen (b)

Für die Funktion des Interferometers ist die Parallelität bzw. die Kollimation des Laserstrahls notwendig und muss überprüft werden. Die Ursprungsidee aus [197] war, dass ein Hebel ein Shear-Plättchen in den Strahlengang dreht und über eine Mattscheibe die Interferenz sichtbar wird, wie in Bild 48 schematisch dargestellt. Dies basiert auf dem Prinzip der Überlagerung einer Wellenfront mit sich selbst. Dabei wird der zu untersuchende Strahl in zwei Teilwellen aufgeteilt, von denen eine an der ersten Oberfläche reflektiert und die andere, die diese durchläuft, von der zweiten Oberfläche reflektiert wird. Damit werden die Teilwellen lateral zueinander verschoben (*Shearing*). Aus dem von den Teilwellen im Überlappungsgebiet erzeugten Interferogramm, lässt sich die Ursprungswellenfront ableiten. Im Fall eines idealen kollimierten Strahlbündels bilden sich parallele Interferenzstreifen im rechten Winkel zum Keil aus (Bild 48). [212] Praktisch sind die Interferenzstreifen jedoch nicht leicht zu beobachten. Aus diesem Grund wurde an den Hebel ein Spiegel geklebt, um den Strahl nach oben aus dem Gehäuse auszukoppeln. Über ein weißes Blatt Papier kann in Strahlrichtung die Parallelität beurteilt werden (kontinuierliche Aufweitung des Spots oder Fokussierung und anschließende Verbreiterung des Spots als Abweichungsindikatoren).

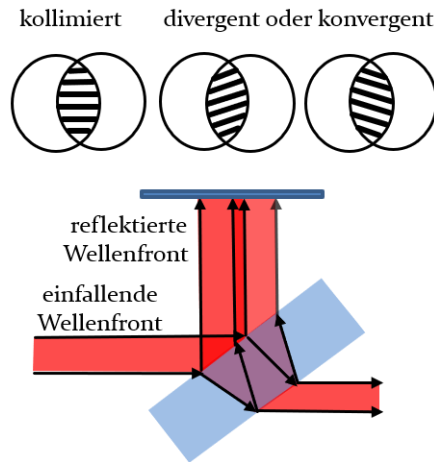


Bild 48: Funktionsprinzip des Shearinterferometers

Darüber hinaus, müssen im Messarm und im Referenzarm der *Cantilever* und der Referenzspiegel auf die Brennebene der Linsen eingestellt werden. Dazu können jeweils am Gehäuse ausgerichtete Spiegel im entsprechenden Abstand verwendet werden. Die Positionen der Linsen bzw. Ausrichtungen auf die Fokuspunkte können durch Drehung der Halterung der jeweiligen Linse über Löcher (siehe Bild 49) angepasst werden.

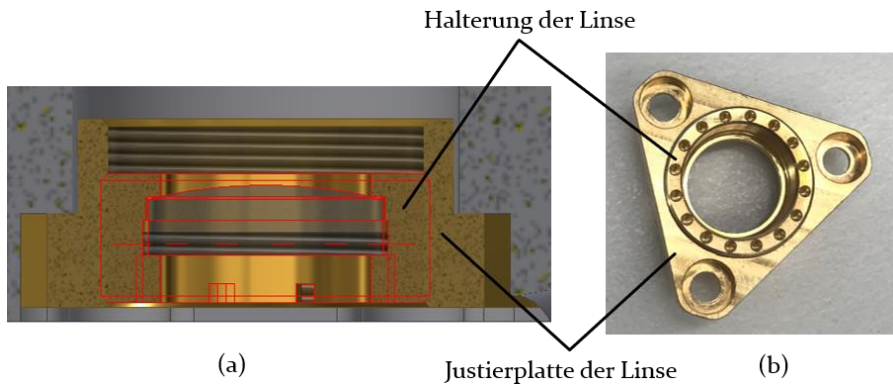


Bild 49: Querschnitt (a) und Ansicht (b) der Linseneinheit

Anschließend folgt die Ausrichtung der zwei Linsen zueinander. Durch Ein- und Ausblenden des Referenzarms kann vor der Auswertegruppe innerhalb des Gehäuses überprüft werden, ob der Referenzstrahl und der Messstrahl sich geometrisch überlagern. Falls sich die Strahlen nicht überlagern und alle vorherigen Schritte bereits ausgeführt worden sind, müssen die Linsen zueinander ausgerichtet werden. Durch das Spaltmaß an der Halterung der Linsen können die Linsen zueinander eingestellt werden. Im

Fall, dass sich die Strahlen überlagern, kann die Blende vor der Auswertegruppe des Interferometers eingestellt werden. Die Blende wird lateral verschoben, damit die maximal mögliche hinter der Blende erfasste Lichtleistung eintritt.

Schließlich sind die analogen Interferometersignale durch Einstellung der Regelparameter für Gain (Amplitude) und Offset auf ihr Maximum abzugleichen. Die beiden Analogsignale des Interferometers (sin/cos, Abschnitt 5.4) können eine Lissajousfigur bilden, die zur Justierung herangezogen werden kann. Dafür ist ein Oszilloskop notwendig, um die Lissajousfigur zu beobachten. Der Durchmesser der auf dem Oszilloskop angezeigten Lissajousfigur wird für die Signalamplitude genutzt. Die Lage der Lissajousfigur entsteht durch den Offset der Signale der beiden Kanäle. Dies wird so justiert, bis ein Maximum des Durchmessers der Lissajousfigur in diesem Fall von ca. $3 V_{ss}$ erreicht wird.

Die Quadrantenfotodiode muss so justiert werden, dass im Oszilloskop im X/Y-Bild der Signalpunkt in Nulllage ist. Deren Position kann über das Spaltmaß zwischen der Schraube und der Halterung der Diode eingestellt werden.

5.4 Auswertung der Messsignale

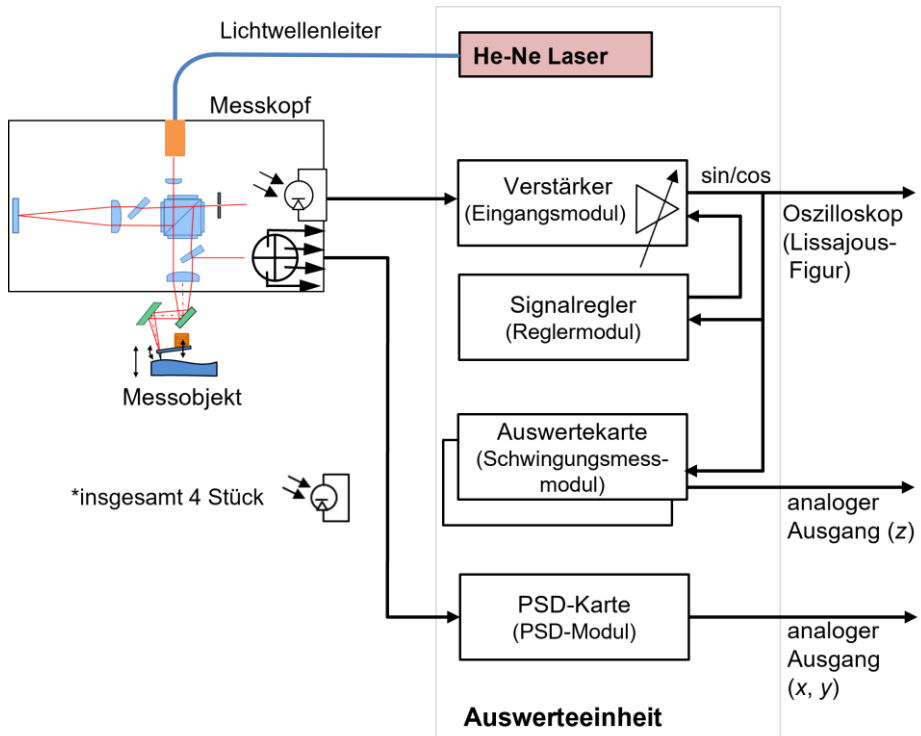


Bild 50: Schaltbild der Auswerte- und Versorgungseinheit

Das optische Messsystem kann sowohl zur Längenmessung als auch zur Schwingungsmessung eingesetzt werden. An die Signalqualität und Signalverarbeitung eines präzisen und dynamischen laserinterferometrischen Messsystems werden sehr hohe Ansprüche gestellt. Für die Signalauswertung des optischen Systems stellt der Messkopf der Auswerte- und Versorgungseinheit vier optische Ausgangssignale (Gleichungen (46)-(49)) sowie die vier von der Biegung und Torsion abhängigen intensitätsproportionalen Spannungssignale zur Verfügung. In Bild 50 ist das Blockschaltbild der modularen Auswerte- und Versorgungseinheit zu sehen.

Für diese Auswerte- und Versorgungseinheit wurden das Laserausgangsmodul (LA-02), das analoge Eingangsmodul (EM-05) des Interferometers, das digitale Reglermodul (RG-04), das Schwingungsmessmodul (SM-05) und das PSD-Modul (PSD-03) in einem 19"-Modulträger der SIOS Meßtechnik GmbH verwendet (Bild 51). Um die Größe des Sensorkopfes zu minimieren, ist die He-Ne-Laserquelle zusammen mit den anderen Modulen zur Signalverarbeitung in den 19"-Modulträger eingebaut. Das Laserlicht

wird über einen polarisationserhaltenden LWL zum Interferometer übertragen.



Bild 51: Auswerte- und Versorgungseinheit

Nach einer optoelektronischen Wandlung in der Auswertegruppe des Interferometers im Messkopf sowie einer Differenzbildung in der Auswerte- und Versorgungseinheit lassen sich die interferometrischen Signale durch zwei sinusförmige Signale mit 90° Phasendifferenz $U_{\sin}(t_j)$ und $U_{\cos}(t_j)$ beschreiben, deren Phasen von der Messgröße $\Delta L(t_j) = L_{\text{mess}}(t_j) - L_{\text{ref}}(t_j)$ moduliert werden. Bei den interferometrischen Signalen stellt die Phase den aktuellen Gangunterschied zwischen dem Mess- und Referenzstrahl dar. Ein minimal detektierbarer Phasenunterschied der Interferometersignale stellt gleichzeitig die beste Auflösung dar (Gleichung (40), S. 73). Zur Signalregelung und Demodulation der Interferenzsignale dienen das EM-05 und das SM-05 (alternativ die DSP-Einheit der NMM-1). Die optoelektronisch gewandelten Interferenzsignale werden zuerst im Sensorkopf vorverstärkt und anschließend zum EM-05 zur Weiterverarbeitung geleitet. Die vier vorverstärkten Interferometersignale werden im EM-05 weiter verstärkt bzw. die Differenzen gebildet und in zwei normierte elektrische Signale umgewandelt. Die Schaltungen der beiden Kanäle sind identisch aufgebaut.

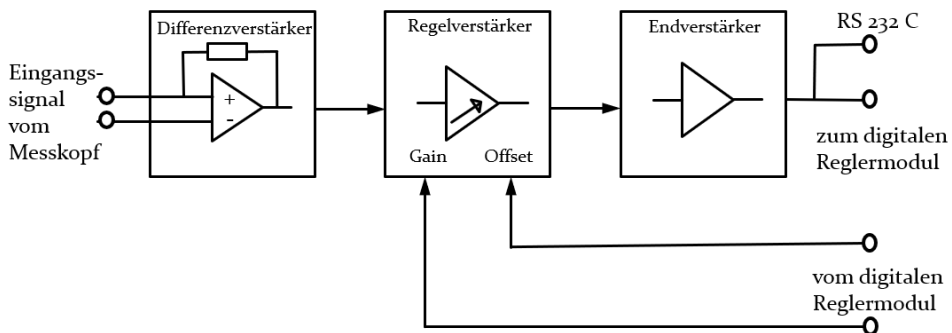


Bild 52: Blockschaltbild eines Kanals des Eingangsmoduls EM-05 [213]

Bild 52 stellt das Blockschaltbild eines Kanals des Eingangsmoduls EM-05 dar. Von diesem Modul werden die verarbeiteten Signale einerseits intern dem A/D-Wandler des Schwingungsmessmoduls zugeführt und andererseits können sie zusätzlich außen an der Schnittstelle des Eingangsmoduls abgegriffen werden. Diese zwei Analogsignale (sin/cos) können auf einem Oszilloskop eine Lissajousfigur bilden, die zur Justierung des Sensorkopfs sowie zur Überprüfung des Justagezustandes herangezogen werden kann. Entsprechend der Vakuumwellenlänge der Laser wird bei einer Messbewegung von ca. 316 nm (halbe Wellenlänge) eine Periode des sinusförmigen Signals (eine Kreisbahn) erzeugt. Die Auswertung der Messsignale basiert auf der Erfassung der Anzahl und Bruchteile der durchlaufenen Perioden der Interferenzordnung ab einem Referenzpunkt. Die Messwertgewinnung kann durch die nachfolgende Gleichung realisiert werden [174]:

$$\varphi(t_j) = \arctan\left(\frac{U_{\sin}(t_j)}{U_{\cos}(t_j)}\right) + N \cdot 2\pi \quad (62)$$

wobei N die Anzahl der ganzen Perioden ist. Damit ergibt sich der Längenswert:

$$\Delta L(t_j) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t_j) \quad (63)$$

Die Längenauflösung des Messsignals lässt sich aus der Auflösung der beiden verwendeten A/D-Wandler, der Signalamplitude und der Auflösung der arctan-Ausgabe ermitteln. Für 6 Bit A/D-Wandler und eine 8 Bit arctan-Ausgabe wird eine Periode (316 nm) in 256 Schritte unterteilt und es ergibt sich beispielsweise eine Längenauflösung von 1,234 nm. [174]

Das digitale Reglermodul (siehe auch Bild 51) berechnet die zur Ansteuerung der Regelverstärker notwendigen Parameter für Gain (Amplitude) und Offset [213]. Die Regelbetriebsarten können zwischen permanenter Regelung, manueller Regelung und automatischer Regelung gewechselt werden. Bei Wechsel des *Cantilevers* oder unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Messoberflächen können die Regelverstärker bzw. der Offset und das Gain für beide Kanäle getrennt parametrisiert werden.

Bei der Schwingungsmessung bewegt sich das Messobjekt (z. B. *Cantilever* oder Spiegel auf Rückseite eines Tastsensors) mit der Geschwindigkeit v in Richtung der Messachse des Interferometers. Die normierten Quadratursignale des Eingangsmoduls EM-05 werden durch zwei im Eingang des Schwingungsmessmoduls SM-05 befindliche 8 Bit Flash-A/D-Wandler digitalisiert. Dabei kann der zugehörige Phasenwinkel unter Verwendung der arctan-Funktion und daraus die Längeninformaton bestimmt werden. Das

wegproportionale Analogsignal kann an dem Ausgang des Schwingungsmessmoduls mit einem BNC-Kabel zur weiteren Verarbeitung oder zur Anzeige abgenommen werden. Alternativ können zur Berücksichtigung der Einflüsse von Temperatur, Druck und Feuchte die beiden normierten Quadratursignale zusätzlich an die DSP-Einheit der NMM-1 angeschlossen werden. Dies geschieht, da bei dieser Auswerte- und Versorgungseinheit Sensoren zur Messung sowie die Einheit zur Auswertung der zur Wellenlängenkorrektur notwendigen Umweltparameter fehlen. Aus diesem Grund können die Korrekturen anhand der gemessenen Umweltparameter der NMM-1 in der DSP-Einheit durchgeführt werden.

Die Quadrantenfotodiodensignale des Deflektionsmesssystems werden von dem Modul PSD-03 ausgewertet. Eingangsseitig erhält das Modul die vier Spannungssignale der vier Fotodioden der PSD-Einheit des Messkopfes. Die einzelnen Signale werden durch die Operationsverstärkerschaltungen in zwei Differenzsignale und ein Summensignal gewandelt. Danach werden die zwei Differenzsignale mit dem Summensignal normiert (Gleichung (52) und Gleichung (53), S. 76). Ausgangsseitig liefert das Modul zwei zur Biegung und Torsion proportionale Analogsignale, die zur weiteren Verarbeitung weitergeleitet werden können.

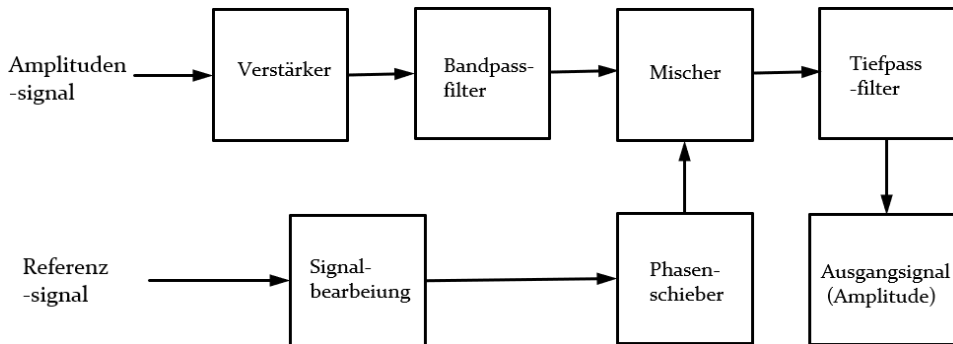


Bild 53: Blockdiagramm der Amplitudendemodulation [214]

Bei der Messung mit dem AFM im Schwingungsmodus wird das zur Schwingungsamplitude des *Cantilevers* proportionale Biegungssignal des Deflektionsmesssystems zur Regelung auf konstante Schwingungsamplitude des *Cantilevers* genutzt. Dazu wird ein *Lock-In-Amplifier* (LIA) zur Signalanalyse eingesetzt. Bild 53 zeigt das prinzipielle Schema eines LIA zur Modulation des Amplitudensignals des schwingenden *Cantilevers*. Mit dem LIA wird das Amplitudensignal bezüglich eines Referenzsignals gleicher Frequenz ermittelt. Im Vergleich dazu wird bei der Frequenzmodulation

die Verschiebung der Frequenz durch die Annäherung des *Cantilevers* an die zu messende Oberfläche direkt verfolgt. Das Referenzsignal kann intern im LIA generiert oder extern zugeführt werden [215].

5.5 Korrektur von Interferometersignalen

Ellipsenkorrektur

Die Demodulation von einem idealen Homodyninterferometer erfordert zwei elektrische Signale mit identischen Amplituden, ohne Offset und genau 90° Phasenunterschied für das bidirektionale Zählen. Jedoch werden durch Laserleistungsdrift, Ausrichtungsabweichungen des Laserstrahls und Unvollkommenheit von elektronischen Systemen die Lissajous-Figur der zwei Quadratursignale verzerrt und es entsteht kein idealer offsetfreier Kreis. Eine nachträglich durchgeführte Regression einer Ellipse und Korrektur der beiden sinusförmigen Quadratursignale auf einen offsetfreien Kreis, was als Heydemann-Korrektur bezeichnet wird [189], wird häufig verwendet. Diese Korrektur basiert auf der Ellipsengleichung (64). Die Koeffizienten werden durch die Methode der kleinsten Quadrate aus den Eingangsvektoren der zwei A/D-gewandelten Quadratursignale U_{\sin} und U_{\cos} ermittelt.

$$AU_{\sin}^2 + BU_{\cos}^2 + CU_{\sin}U_{\cos} + DU_{\sin} + EU_{\cos} = 1 \quad (64)$$

Aus den Koeffizienten der Ellipse können die Phasenabweichung, das Amplitudenverhältnis, die Amplituden und der Offset von den beiden Signalen bestimmt werden. Diese Parameter können benutzt werden, um die zwei Signale zu korrigieren, bevor sie mit der arctan-Funktion demoduliert werden (Gleichung (62), S. 89). Häufig wird die Ellipsenkorrektur aufgrund der fehlenden Rechenleistung oder der fehlenden Möglichkeit des Eingriffs in die Messgeräteelektronik nachträglich durchgeführt. [174]

Luftbrechzahl

Die Interferometersignale werden auf Basis der Gleichung (63) (S. 89) demoduliert. Die Wellenlänge λ ist von der Vakuumwellenlänge und den Brechzahlen n der Medien, die der Messstrahl und Referenzstrahl durchlaufen, abhängig [174]. In dem Schwingungsmessmodul SM-05 wird zur Demodulation der Interferometersignale eine feste Wellenlänge verwendet [199, 213]. Das heißt, dass die Veränderung der Luftbrechzahl aufgrund von Umwelteinflüssen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck nicht berücksichtigt wird.

Im Vergleich dazu können die Interferometersignale durch die DSP-Einheit der NMM-1 bestimmt werden. Durch die Erfassung der Umweltparameter mithilfe der Sensoren der NMM-1 kann die Luftbrechzahl ermittelt und zur Aktualisierung der Wellenlänge und Totstreckenkorrektur verwendet werden [174].

6 Integration des MAFM in die NMM-1

Heutzutage dienen AFMs sowohl der Bilddarstellung einer Oberfläche als auch der hochauflösenden Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen. Forciert durch die fortschreitenden Entwicklungen in Schlüsseltechnologien wie der Halbleiterindustrie, der Präzisionsfertigung und der Mikrosystemtechnik erfahren quantitative dimensionelle Messungen an Nano- und Mikrostrukturen mit Nanometerauflösung über große Messbereiche eine zunehmende Bedeutung. Um im Vergleich zu einem Piezoscantisch den Messbereich zu erweitern, wurde das MAFM in die NMM-1 als Antastsystem integriert. Die Kombination mit der NMM-1 ermöglicht die hochauflösenden Messungen für Mikrokomponenten mit praxistauglichen Arbeitsbereichen. Dieses Kapitel behandelt die Einmessstrategie für großflächige Messungen. Die mechanische und elektronische Verbindung des MAFM mit der NMM-1, die Kalibrierung und die messtechnischen Eigenschaften des MAFM und die Applikationsmessungen werden in diesem Kapitel dargestellt.

6.1 Systemaufbau

Ein für den Aufbau eines präzisen Mikro- und Nanokoordinatenmessgeräts einzusetzendes Positioniersystem sollte eine Positioniergenauigkeit von ca. 10 nm, ein Messvolumen größer als 1 cm³, eine hohe Dynamik und eine Rückführbarkeit auf die Meterdefinition besitzen. Die eingesetzte NMM-1 mit einem Positionier- und Messvolumen von 25 mm × 25 mm × 5 mm und einer zuverlässigen Messauflösung von kleiner 0,1 nm mit dem kleinsten Schritt von 0,02 nm kann diese Voraussetzungen problemlos erfüllen. Nach der Integration des MAFM in die NMM-1 wird das Messobjekt zusammen mit der Spiegelecke, die zum Tragen des zu messenden Objekts verwendet wird, bewegt. Der Arbeitspunkt des integrierten Messkopfes bzw. der Fokuspunkt des Laserstrahls auf der Rückseite des *Cantilevers* überlagert sich mit dem Abbe-Punkt der NMM-1, sodass das Abbe-Prinzip in allen drei Achsen realisiert ist. Dies wird durch eine selbst speziell für das System konstruierte Baugruppe mit einer Einschubplatte und einem Halter der Einschubplatte realisiert, die an der Zerodurplatte der NMM-1 befestigt wird. Die drei Interferometer der NMM-1 lesen die Position der Spiegelecke bzw. des Objekts in Echtzeit, so dass die Positioniersteuerung eine Bewegungsauflösung von 0,1 nm sicherstellen kann [175]. Die DSP-Einheit der NMM-1 bietet die Möglichkeit, die Interferometersignale des MAFM zu be-

stimmen. Damit können Umwelteinflüsse sowie deren Auswirkungen auf die Totstrecke unmittelbar korrigiert werden (Bild 55). Mit der NMM-1 ist das zusätzliche Aufnehmen der Quadratur-signale (\sin/\cos) möglich. Somit kann nachträglich eine Ellipsenkorrektur durchgeführt werden. Die gleichzeitige Messung von Position, Biegung und Torsion des *Cantilevers* ermöglicht die Bestimmung des Kraftvektors an der Spitze des *Cantilevers*. Aus der Position, den beiden Neigungswinkeln, der Federkonstante und den Abmessungen des *Cantilevers* kann der Kraftvektor berechnet werden. Die Integration in die NMM-1 ermöglicht einen Messbereich des MAFM von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$.

6.2 Einmessstrategie des MAFM-Systems

6.2.1 Einbindung des MAFM in die NMM-1

Um die Längenänderung durch temperaturbedingte Effekte zu minimieren, wurden die Verbindungselemente zwischen MAFM und NMM-1 sowie wichtige Bauteile, soweit im Messkreis, aus Invar gefertigt. Hierzu gehört die Einschubplatte und die Halterung der Einschubplatte, mithilfe derer das MAFM an der Zerodurplatte befestigt werden kann. Die Zerodurplatte wird auf drei Zerodurssäulen der NMM-1 aufgelegt und festgeschraubt. Einige Bauteile des MAFM wie der Grundkörper, in dem optische Elemente wie Teilerwürfel und Keilplatte platziert sind, sowie der Referenzarm und der Spiegeljustierträger des AFM-Vorsatzes bestehen ebenfalls aus Invar. Das nachfolgende Bild 54 zeigt das in die NMM-1 integrierte Messsystem.

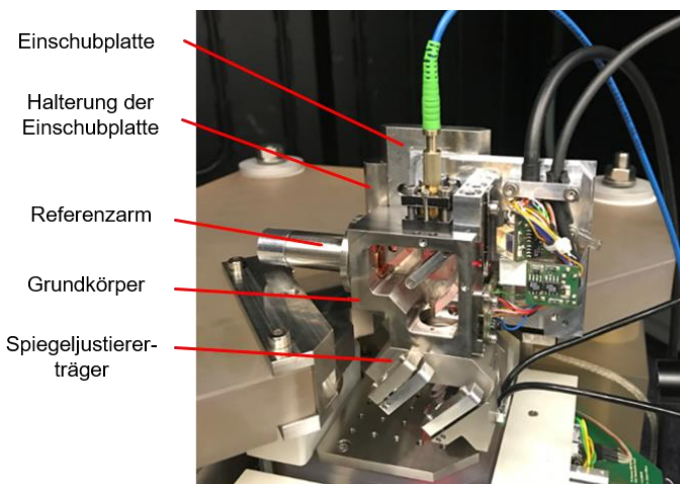


Bild 54: MAFM in der NMM-1

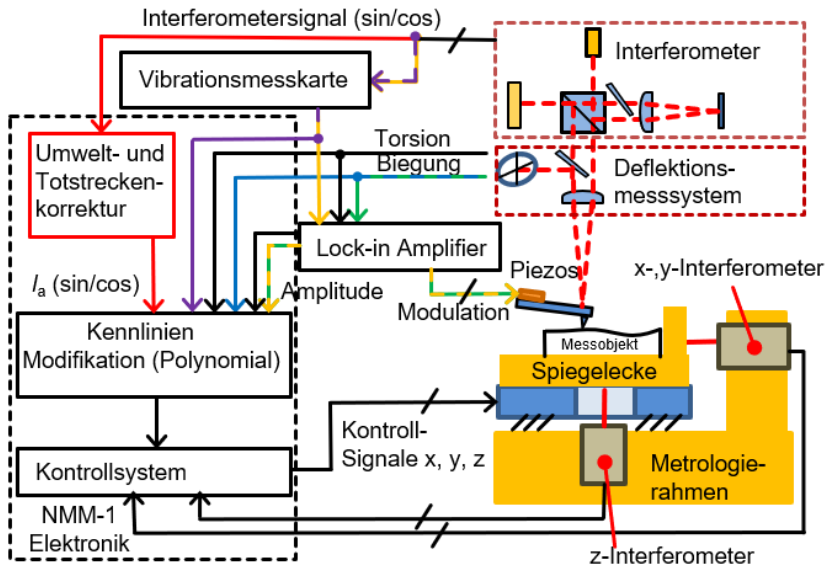
Neben der mechanischen Integration ist auch eine elektrische und informationstechnische Integration erforderlich. Dadurch können die Signale des MAFM in die NMM-1 eingespeist werden. Die DSP-Einheit der NMM-1 stellt für die Biegungs- und Torsionssignale mehrere Analogeingänge mit 16 Bit A/D-Wandlern, einem Spannungsbereich von $\pm 12,5$ V bzw. $\pm 2,5$ V und einer Abtastfrequenz von 6,25 kHz zur Verfügung. Für die Interferometersignale kommt ein zusätzlicher Demodulationskanal I_a der DSP-Einheit auf Basis des TMS320C6713B zum Einsatz [174]. Nach Erfassung der analogen Sensorsignale erfolgt die weitere Signalverarbeitung in der DSP-Einheit. Über ein Polynom dritter Ordnung werden die digitalisierten Signalwerte in eine Auslenkung für die x -, y - und z -Achse umgerechnet. Über die Federkonstanten des Antastsystems werden die Auslenkungen in den korrespondierenden Antastkraftvektor umgerechnet. Damit kann die Ablaufsteuerung der Messung durch Arbeitspunktregelung und Maximalwertüberwachung kontrolliert werden.

Die NMM-1 wird über einen PC gesteuert, welcher mit der DSP-Einheit über USB verbunden ist. Signale, die für die Positionierung der Spiegelecke in den drei Raumachsen x , y und z verantwortlich sind, werden von der DSP-Einheit zur NMM-1 gesendet und dort verarbeitet. Die Biegungs- und Torsionssignale des Messkopfes werden im PSD-Modul der Auswerte- und Versorgungseinheit verarbeitet und anschließend zur DSP-Einheit der NMM-1 weitergeleitet. Die Positionssignale des Messkopfes werden zuerst im EM-05 und später im SM-05 verarbeitet. Das Ausgangssignal des SM-05 ist ein wegproportionales Analogsignal. Alternativ kann aus den beiden Quadratursignalen des Interferometers das Positionssignal von der DSP-Einheit der NMM-1 bestimmt werden, so dass Einflüsse von der Totstrecke (12,9 mm bei dem MAFM-System) und der Umgebung direkt korrigiert werden können.

Das neue MAFM kann sowohl im statischen Modus als auch im dynamischen Modus betrieben werden. Die Position der Antastspitze des *Cantilevers* wird mit einem Interferometer direkt auf der reflektierenden Rückseite des *Cantilevers* nachvollziehbar gemessen. Die Vibrationsmesskarte berechnet ein Signal jeweils proportional zur Biegung des *Cantilevers* im CM und zur Schwingungsauslenkung des *Cantilevers* im IM (violette und gelbe Pfeile in Bild 55).

Im dynamischen Modus, wie dem Tapping-Modus (grüne und gelbe Pfeile in Bild 55, S. 96), wird der *Cantilever* in der Nähe seiner vertikalen Resonanzfrequenz angeregt. Die Schwingungsamplitude wird von dem LIA erfasst und ausgewertet. Das Ausgangssignal des LIA wird zur NMM-1 geführt

und zur Regelung der Schwingungsamplitude des *Cantilevers* und damit des Abstands zwischen dem Messobjekt und der Antastspitze des *Cantilevers* durch eine vertikale Bewegung des Messobjekts verwendet. Die vertikale Bewegung des Messobjekts wird durch die NMM-1 ausgeführt. Wie in Abschnitt 5.2 (S. 79) geschrieben, kann das neu entwickelte MAFM in vertikalen und torsionalen Schwingungsmodi betrieben werden. Verschiedene Modulationstechniken wie die AM und die FM können zur Analyse der Amplitude der Messsignale des vertikalen und torsionalen Modus angewendet werden.



Feedback Signale und Modi:

- Biegung, Tapping-Modus
- Biegung, Kontakt-Modus
- Interferometer (Vibrationsmesskarte), Tapping-Modus
- Interferometer (Vibrationsmesskarte), Kontakt-Modus
- Interferometer (NMM-1 I_a), Kontakt-Modus

Bild 55: Schematische Darstellung des neuen MAFM-Messkopfes im Zusammenspiel mit der NMM-1

Die Integration des MAFM in die NMM-1 bietet die Möglichkeit für hochgenaue, dimensionelle Messungen über große Bereiche von 25 mm × 25 mm × 5 mm. Die Messungen werden durch die metrologischen Eigenschaften des integrierten Messsystems beeinflusst. Die messtechnischen Eigenschaften können von vielen Faktoren und Komponenten des Messkopfes sowie der NMM-1 abhängig sein, wie beispielsweise der Ausrichtung des Messstrahls, der Defokussierung des Strahls, der Ausrichtung der

Quadrantenfotodiode und den dynamischen Eigenschaften des MAFM und der NMM-1. Nach Ausrichtung des Messkopfes müssen die messtechnischen Eigenschaften des MAFM entsprechend identifiziert und dieses kalibriert werden. Zur Kalibrierung des Systems und zur Identifizierung der messtechnischen Eigenschaften des Sensors müssen beispielsweise Auflösung, Rauschen und Reproduzierbarkeit bestimmt werden. Ebenfalls werden die Untersuchungen der messtechnischen Eigenschaften des in die NMM-1 integrierten MAFM für unterschiedliche Langstrecken- und skalenübergreifende Messungen, Stufenhöhen- und Gitterabstandsbestimmungen und Flächenmessungen durchgeführt.

6.2.2 Kalibrierung des MAFM

In der DSP-Einheit der NMM-1 wird die Berechnung der Auslenkungen aus den entsprechenden Signalen des Antastsystems nach den folgenden Polynomen (Gleichung (65)-Gleichung (67)) durchgeführt [216]:

$$\begin{aligned}
 d_x = & k_{dx0} + k_{dx1}a_0 + k_{dx2}a_0^2 + k_{dx3}a_0^3 + k_{dx4}a_1 + k_{dx5}a_1^2 & (65) \\
 & + k_{dx6}a_1^3 + k_{dx7}a_2 + k_{dx8}a_2^2 + k_{dx9}a_2^3 + k_{dx10}a_3 + k_{dx11}a_3^2 \\
 & + k_{dx12}a_3^3 + k_{dx13}a_4 + k_{dx14}a_4^2 + k_{dx15}a_4^3 + k_{dx16}a_5 + \\
 & k_{dx17}a_5^2 + k_{dx18}a_5^3 + k_{dx19}a_6 + k_{dx20}a_6^2 + k_{dx21}a_6^3 \\
 & + k_{dx22}a_7 + k_{dx23}a_7^2 + k_{dx24}a_7^3 + k_{dx25}l_a
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_y = & k_{dy0} + k_{dy1}a_0 + k_{dy2}a_0^2 + k_{dy3}a_0^3 + k_{dy4}a_1 + k_{dy5}a_1^2 & (66) \\
 & + k_{dy6}a_1^3 + k_{dy7}a_2 + k_{dy8}a_2^2 + k_{dy9}a_2^3 + k_{dy10}a_3 + k_{dy11}a_3^2 \\
 & + k_{dy12}a_3^3 + k_{dy13}a_4 + k_{dy14}a_4^2 + k_{dy15}a_4^3 + k_{dy16}a_5 + \\
 & k_{dy17}a_5^2 + k_{dy18}a_5^3 + k_{dy19}a_6 + k_{dy20}a_6^2 + k_{dy21}a_6^3 \\
 & + k_{dy22}a_7 + k_{dy23}a_7^2 + k_{dy24}a_7^3 + k_{dy25}l_a
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_z = & k_{dz0} + k_{dz1}a_0 + k_{dz2}a_0^2 + k_{dz3}a_0^3 + k_{dz4}a_1 + k_{dz5}a_1^2 & (67) \\
 & + k_{dz6}a_1^3 + k_{dz7}a_2 + k_{dz8}a_2^2 + k_{dz9}a_2^3 + k_{dz10}a_3 + k_{dz11}a_3^2 \\
 & + k_{dz12}a_3^3 + k_{dz13}a_4 + k_{dz14}a_4^2 + k_{dz15}a_4^3 + k_{dz16}a_5 + \\
 & k_{dz17}a_5^2 + k_{dz18}a_5^3 + k_{dz19}a_6 + k_{dz20}a_6^2 + k_{dz21}a_6^3 + k_{dz22}a_7 \\
 & + k_{dz23}a_7^2 + k_{dz24}a_7^3 + k_{dz25}l_a
 \end{aligned}$$

Nach Integration des MAFM in die NMM-1 muss das Messsystem kalibriert und die Kennlinie des Sensors bestimmt und in der DSP-Einheit hinterlegt

werden, um die Messungen bzw. Scans korrekt durchzuführen. Die Kennlinienberechnungen ordnen den Ausgangssignalen des MAFM Auslenkungswerte anhand von Polynomkoeffizienten zu. Dies wird über ein Polynom dritter Ordnung mit den entsprechenden A/D-Wandlerwerten realisiert. Dadurch werden die digitalisierten Ausgangswerte des MAFM in eine Auslenkung bzw. in einen Auslenkungsvektor für die x -, y - und z -Achse umgerechnet. Anschließend werden die Koeffizienten, mit denen die Auslenkungen des *Cantilevers* berechnet werden können, in der DSP-Einheit hinterlegt.

Bei der Kalibrierung im CM werden die Kennlinien aufgenommen, indem ein Messobjekt durch die Bewegung der Spiegelecke der NMM-1 in die Nähe der Antastspitze des *Cantilevers* gebracht und dann vertikal in Richtung der Antastspitze über eine definierte Messstrecke mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt wird. Die Ausgangsbasis für die Polynombeziehung ist die Aufzeichnung des Sensorsignals und des Weges der NMM-1 in z -Richtung während der Werkstückannäherung. In diesem Fall werden jeweils die ermittelten Parameter k_{dz0} und k_{dz4} bis k_{dz6} (das Biegunessignal wird an den A/D-Kanal a_i angeschlossen) in der DSP-Einheit abgespeichert. Die Spannungsverläufe des Biegunessignals und des Interferometersignals von einer Kalibrierung sind in Bild 56 (a) zu sehen. Weil der *Cantilever* leicht geneigt ist (bei diesem Messsystem 8°) bzw. der Messstrahl nicht parallel zu der z -Achse der NMM-1 verläuft, wird der Neigungswinkel des *Cantilevers* bei der Kalibrierung des Interferometersignals l_{SM-05} des Schwingungsmessmoduls SM-05 sowie des Interferometersignals l_a berücksichtigt.

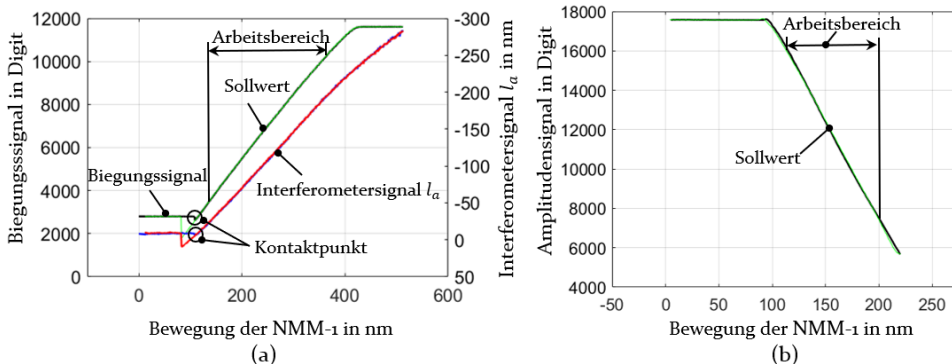


Bild 56: Signalverläufe des MAFM (a) im CM und (b) im IM (Überlagerung *approach* und *retract*)

Bei der Kalibrierung im IM wird die Dämpfung der Amplitude des Biegunessignals B_A anstatt des Biegunessignals kalibriert. Zuerst wird die Eig-

enfrequenz des *Cantilevers* mittels *Sweeper*-Funktion des LIA bestimmt. Für die Kalibrierung des Amplitudensignals B_A wird der *Cantilever* mit einer festen Frequenz unterhalb der Resonanzfrequenz zur Schwingung ange regt. Der Kalibrierablauf ist gleich wie im CM. Da die Anregungsfrequenz des *Cantilevers* für IM ca. 300 kHz beträgt, wird das Interferometersignal I_a stark unterabgetastet. Deswegen wird das Interferometersignal I_a in diesem Modus nicht für IM-Messungen verwendet. Bild 56 (b) stellt die Spannungsverläufe des Amplitudensignals B_A von einer Kalibrierung im IM dar.

Nach der Kalibrierung wird die Antastkurve sowie deren Parameter wie Untergrenze, Obergrenze, Sollwert und Umschalt punkt bestimmt. Während der Messung wird je nach Signalverläufen eine maximale Sensoraussteuerung bei 85 % bis 90 % des Signalbereiches und eine Untergrenze bei 10 % des Signalbereiches für die Messbereichsüberwachung festgelegt. Für die Berechnung der Kennlinien der Interferometersignale des MAFM werden nach den Signalverläufen eine Untergrenze bei 20 % des Signalbereiches ausgewählt.

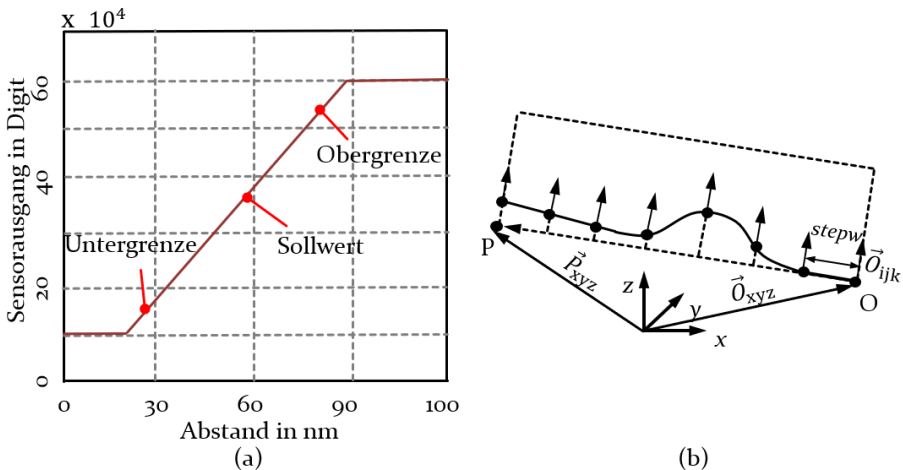


Bild 57: Typische Antastkurve (a) und Linien-Scan mit definierter Schrittweite $stepw$ (b) nach der MATLAB-toolbox [174]

Bei der Einzelpunktantastung wird der *Cantilever* an die Oberfläche mit definierter Geschwindigkeit angenähert bis die Wechselwirkung zwischen der *Cantilever*-Spitze und der Oberfläche einen vordefinierten Wert bzw. den Sollwert (Bild 57) erreicht hat. Danach wird ein einzelner Messwert oder eine vorgegebene Anzahl an Messwerten mit der Samplingfrequenz der NMM-1 erfasst. Bei dem Scan einer Linie wird nach der Antastung eine linienförmige Bewegung mit einer festgelegten Scangeschwindigkeit bis zu einem definierten Endpunkt ausgeführt und gleichzeitig werden im Ab-

stand *stepw* während der Bewegung Messpunkte erfasst. Dabei erfolgt eine permanente Antastregelung in Richtung des Normalenvektors der Oberfläche \vec{O}_{ijk} . Die aufgenommenen Datenpunkte können zu einem Linienprofil zusammengefügt werden.

Die Kalibrierungen wurden im CM und IM wiederholt durchgeführt. Die Linearität der Kennlinien, die Wiederholbarkeit der Koeffizienten hinsichtlich des Anstieges (k_{dz4}), des Offsets (k_{dzo}) sowie die Residuen wurden aus 150 nacheinander aufgenommenen Kennlinien analysiert. Die Residuen r bzw. die Abweichungen der Kalibrierung und die Unsicherheiten $u(r)$ der Residuen werden nach den in [174] vorgeschlagenen Gleichungen berechnet. Die berechneten Polynomkoeffizienten und deren Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Der Anstieg bzw. das Verhältnis von $-1,148$ zwischen dem Interferometersignal l_a und dem Signal des z -Interferometers der NMM-1 wird von der Position des Fokuspunktes des Laserstrahls verursacht, der justageabhängig nicht direkt über die Spitze des *Cantilevers*, sondern hin zum *Cantilever-Chip lag*.

Tabelle 8: Die Kalibrierergebnisse der Koeffizienten mit \bar{x} als Mittelwert und s als Standardabweichung (*für das Interferometersignal l_a ist der Anstieg ein Verhältnis ohne Maßeinheit)

Koeffizienten		Biegungssignal	l_a	l_{SM-05}	B_A
Offset in nm	\bar{x}	$3,6802 \cdot 10^6$	$3,6801 \cdot 10^6$	$3,6820 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^6$
	s	7,2527	11,290	23,687	6,253
Anstieg in nm/Digit	\bar{x}	0,0502	$-1,1481^*$	-0,4247	-0,0104
	s	$3,8569 \cdot 10^{-4}$	0,0118*	0,0041	$1,862 \cdot 10^{-4}$
Residuen in nm	\bar{x}	3,343	4,4474	4,7920	0,2465
	s	0,5291	0,3282	0,3204	0,0662

Bild 58 stellt die Linearität und Streuung der einzelnen Punkte der mehrfach aufgenommenen Kennlinie des Biegungssignals dar. Δz ist die Abweichung zwischen der Biegung des *Cantilevers* und den Positionsdaten der z -Achse der NMM-1. Die Residuen der zeitlich als erstes aufgenommenen Kennlinie sind in Rot dargestellt, während die Abweichungen zu den anderen 149 Kalibrierungen in Grün dargestellt sind. Die Standardabweichung von Δz aller Kennlinien ist 5,56 nm. Der Einfluss der Temperaturschwankung dominiert. Die Temperaturschwankung im gesamten Zeitraum der Kalibrierung betrug 0,19 K mit einer Standardabweichung von 0,05 K.

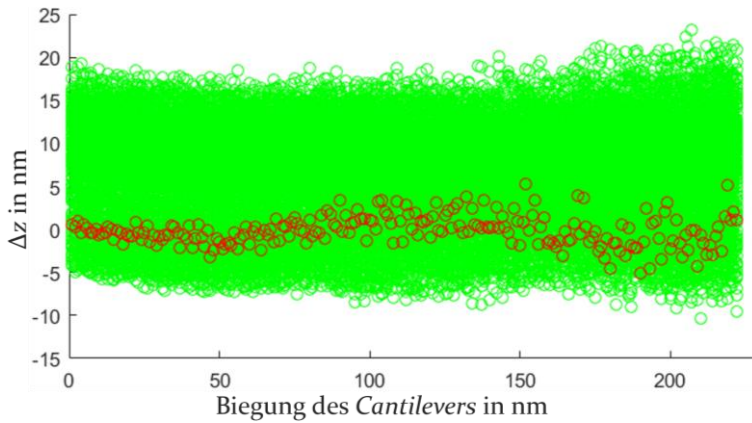


Bild 58: Linearität und Streuung der einzelnen Punkte der mehrfach aufgenommenen Kennlinien des Biegunssignals

6.3 Analyse der Unsicherheit des MAFM

Wie in Kapitel 5 beschrieben, ergeben sich die Messwerte der Interferometer durch die gezählten Interferenzordnungen bzw. durch die Phasendifferenz zwischen Mess- und Referenzstrahlen. Unter realen Bedingungen führen die begrenzte Genauigkeit der Algorithmen zur Bestimmung der Signalparameter wie die Amplituden, die Offsets, die Abweichung der Phasen und das mögliche umgebungsabhängige Driften im optischen System insgesamt zu nicht korrigierten Abweichungen. Außerdem beeinflussen die als Positioniersystem verwendete NMM-1 und das Messobjekt, abhängig von den Messbedingungen, auch die Messergebnisse. Die Messunsicherheit hängt von der gesamten Messkette ab und ist definiert als „Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können.“ [188]. Die Berechnung erfolgt hierbei nach den Vorgaben des GUM [190]. Wie in Abschnitt 4.2.1 geschrieben können die Einzelbeträge als Unsicherheitskomponenten vom Typ A und Typ B ermittelt werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Einflüsse detailliert analysiert.

Unsicherheit der Wellenlänge

Am Anfang der Messkette steht die Laserlichtquelle. Im MAFM wird ein unstabilisierter Einfrequenz-He-Ne-Laser verwendet. Die Wellenlängensstabilität des He-Ne-Lasers beträgt $\Delta\lambda_{\text{vac}}/\lambda_{\text{vac}} = \pm 10^{-6}$ [217]. Mit der Wellenlänge λ_{vac} und der Brechzahl n der Luft wird die Wellenlänge des He-Ne-Lasers in Luft entsprechend folgender Gleichung berechnet:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{n}. \quad (68)$$

Bei dem laserinterferometrischen Messverfahren wird die gemessene Wegdifferenz durch eine Funktion der Wellenlänge des He-Ne-Lasers dargestellt. Da die Messungen nicht im Vakuum stattfinden, muss der Einfluss der Brechzahl n des Mediums berücksichtigt werden. Umwelteinflüsse wie Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und CO_2 -Gehalt spielen in der Brechzahl- bzw. Messunsicherheitsbestimmung eine große Rolle. Auf eine Messung des CO_2 -Gehalts wird aufgrund des geringen Einflusses und der hohen Verlustleistung des Sensors verzichtet [174]. Die aktuelle Brechzahl n der Luft für die Wellenlänge kann mit bekannten Daten von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit berechnet werden und wird erst nach einer erneuten Erfassung von Umgebungsdaten durchgeführt.

Zunächst wird der Wasserdampfpartialdruck p_v in Pa aus dem Sättigungswasserdampfpartialdruck p_{sv} in Pa unter Verwendung der relativen Feuchte RH in % und der Lufttemperatur T in K aus der Lufttemperatur ϑ in $^\circ\text{C}$ berechnet ($T = \vartheta + 273,15$ K) nach der nachfolgenden Gleichung berechnet [174, 218, 219]:

$$p_v = 0,01RH p_{sv} = 0,01RH \exp(A_{\text{Dav}} T^2 + B_{\text{Dav}} T + C_{\text{Dav}} + D_{\text{Dav}}/T) \quad (69)$$

Mit den Koeffizienten der Davisgleichung:

- $A_{\text{Dav}} = 1,2378847 \cdot 10^{-5}$,
- $B_{\text{Dav}} = -1,9121316 \cdot 10^{-2}$,
- $C_{\text{Dav}} = 33,93711047$,
- $D_{\text{Dav}} = -6,3431645 \cdot 10^3$.

Die Korrektur mit den Messwerten für Luftdruck p in Pa und Lufttemperatur ϑ in $^\circ\text{C}$ erfolgt mit der nachfolgenden Gleichung [174, 218]:

$$(n(\vartheta, p) - 1) = \frac{c_1 p}{D_{\text{Boe}}} \frac{1 + (E_{\text{Boe}} - F_{\text{Boe}} \vartheta) p}{1 + G_{\text{Boe}} \vartheta} \quad (70)$$

Anschließend wird die Brechzahl mit einem vorgegebenen Wert für den CO_2 -Gehalt x (Standardwert 300 ppm) und dem berechneten Wasserdampfpartialdruck p_v nach Gleichungen (71) und (72) korrigiert [174, 218]:

$$(n(\vartheta, p, x) - 1) = (n(\vartheta, p) - 1)(1 + H_{\text{Boe}}(x - I_{\text{Boe}})) \quad (71)$$

$$n(\vartheta, p, p_v, x) = (n(\vartheta, p, x) - p_v c_2) \quad (72)$$

Mit den Koeffizienten der Bönschgleichungen:

- $D_{\text{Boe}} = 93214,6$,
- $E_{\text{Boe}} = 0,5953 \cdot 10^{-8}$,
- $F_{\text{Boe}} = 0,009876 \cdot 10^{-8}$,
- $G_{\text{Boe}} = 0,0036610$,
- $H_{\text{Boe}} = 0,5327 \cdot 10^{-6}$,
- $I_{\text{Boe}} = 400$,
- Substitutionskonstante $c_1 = 2,6822780908 \cdot 10^{-4}$ für $\lambda = 632,991234$ nm,
- Substitutionskonstante $c_2 = 3,7061624213 \cdot 10^{-10}$ für $\lambda = 632,991234$ nm.

Durch eine Bildung der partiellen Ableitungen für jede Umweltgröße lassen sich die relativen Empfindlichkeiten der Brechzahl der Luft pro Maßeinheit bestimmen. Der Einfluss von Umgebungstemperatur, Luftdruck und Wasserdampfpartialdruck auf die Brechzahl wird jeweils mit dem Koeffizienten $-0,903 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, $0,268 \cdot 10^{-8}/\text{Pa}$ und $-3,706 \cdot 10^{-10}/\text{Pa}$ beziffert. Anhand dieser Koeffizienten und unter Laborbedingungen am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) ohne spezielle Temperierung ($\vartheta = 20$ °C $\pm 0,2$ K, RH = 45 % ± 10 %, und $p = 100\,000$ Pa $\pm 1\,000$ Pa) beträgt die maximal mögliche durch die Schwankung der Temperatur verursachte Brechzahlschwankung $\Delta n/n = \pm 0,18 \cdot 10^{-6}$. Die maximal mögliche von der Schwankung des Luftdrucks verursachte Brechzahlschwankung beträgt $\Delta n/n = \pm 2,68 \cdot 10^{-6}$ aufgrund der großen Schwankungsmöglichkeit des Luftdrucks. Mit spezieller Temperierung ($\vartheta = 20$ °C ± 5 mK (Kurzzeit bis 1 Stunde)) beträgt die maximal mögliche durch die Schwankung der Temperatur verursachte Brechzahlschwankung $\Delta n/n = \pm 4,5 \cdot 10^{-9}$.

Da die Temperatur, Luftdruck und Wasserdampfpartialdruck mit den in der NMM-1 integrierten Sensoren gemessen werden, werden diese Angaben zur Korrektur genutzt. Die Unsicherheit der Luftbrechzahl leitet sich demzufolge aus der Unsicherheit der Korrektur also der Unsicherheit der Messung der Einflussgrößen sowie der Berechnungsformel ab. Eine kombinierte Unsicherheit der Luftbrechzahl mit einem unkalibrierten Pt100 von $u(n) = 1,3 \cdot 10^{-7}$ und einem kalibrierten Pt100 von $u(n) = 6,96 \cdot 10^{-8}$ wird in [174] angegeben.

Unsicherheit der Totstrecke

Als inkrementelles Messverfahren basiert die interferometrische Längmessung auf der Erfassung des Zählerstandes ab einem Referenzpunkt. Der Zähler muss vor einer Messung initialisiert werden, indem er an einer bestimmten Position genullt wird, bei der die Längendifferenz zwischen Mess- und Referenzarm bekannt sein muss. Diese Längendifferenz wird als

Totstrecke bezeichnet. Wenn bei der Messung an der Position der Totstrecke begonnen (Bild 59, Position o) wird, ergibt sich die Längendifferenz l_g von Mess- und Referenzarm aus der Messlänge l_m und der Totstrecke l_t . Für die Differenzmessung zwischen zwei Messpositionen kann das Messergebnis als Differenz der zwei Messlängen berechnet werden [174]:

$$l_d = l_{m2} - l_{m1} \quad (73)$$

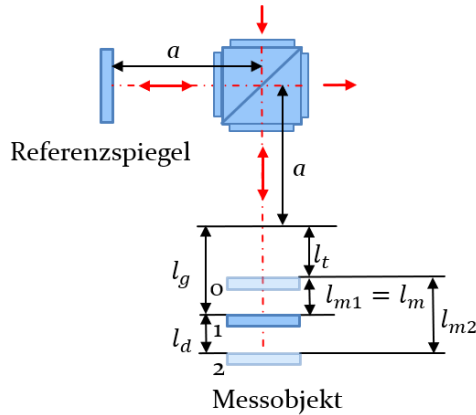


Bild 59: Schematische Darstellung der Totstrecke

Die Unsicherheit aus der Totstrecke $u(l_t)$ hängt von der Schwankung der Wellenlänge und somit von der Schwankung der Vakuumwellenlänge und der Brechzahl wegen der Änderung der Umgebungsbedingungen ab. Bei gleicher Länge a des Mess- und Referenzarms kompensieren sich bei gleichen Umgebungsbedingungen die beiden Arme [174]. Bei ungleichen optischen Wegen von Mess- und Referenzarm verursacht die Wellenlängenänderung eine Veränderung des Zählerstandes, obwohl sich die Position des Messobjektes und des Referenzspiegels nicht ändern. Konstruktiv bedingt beträgt die Totstrecke des MAFM 12,9 mm. Die Totstrecke ist ein konstanter Wert, der einmal bestimmt und nachfolgend für die Messwertberechnung verwendet werden kann. Die Unsicherheit aus der Totstrecke $u(l_t)$ kann durch ein besseres Bestimmungsverfahren der Totstrecke reduziert werden. Unter Berücksichtigung der Montage und der Justage der mechanischen und optischen Bauteile (Abschnitt 5.3) sowie deren Fertigungstoleranzen lässt sich die Totstrecke auf ± 1 mm abschätzen. Die Berechnung der Messlänge $l_m(t)$ zu einem beliebigen Zeitpunkt t unter Berücksichtigung der Längenabweichung durch die Totstrecke l_{mt} erfolgt nach der in [174] hergeleiteten Gleichung:

$$l_m(t) = \frac{\lambda_{\text{vac}}(t)}{k_{\text{IF}}k_{\text{TF}}n(t)}N(t) + \underbrace{\left(\frac{n(0)\lambda_{\text{vac}}(t)}{n(t)\lambda_{\text{vac}}(0)} - 1\right)}_{l_{\text{mt}}}l_t \quad (74)$$

Dabei ist $n(0)$ die Brechzahl beim Nullen des Zählers und $n(t)$ die aktuelle Brechzahl bei der Messung. $\lambda_{\text{vac}}(t)$ und $\lambda_{\text{vac}}(0)$ sind jeweils die aktuelle Vakuumwellenlänge und die Vakuumwellenlänge beim Nullen. Aufgrund des zweimaligen Strahldurchlaufs des Messarms wird ein Interferometerfaktor k_{IF} von 2 verwendet. Der Teilungsfaktor k_{TF} ist von der eingesetzten Elektronik der NMM-1 zur Demodulation der Interferometersignale abhängig und ergibt sich zu $k_{\text{TF}} = 16384$ (14-Bit-arctan-Register). Unter Laborbedingungen am FMT ohne spezielle Temperierung ($\vartheta = 20 \text{ °C} \pm 0,2 \text{ K}$, $\text{RH} = 45 \% \pm 10 \%$, und $p = 100 \text{ 000 Pa} \pm 1 \text{ 000 Pa}$) beträgt die maximal mögliche durch die Totstrecke wegen Schwankung der Temperatur verursachte Abweichung 2,3994 nm. Aufgrund der großen Schwankungsmöglichkeit des Luftdrucks beträgt die maximal mögliche von der Schwankung des Luftdrucks verursachte Abweichung 34,83 nm. Mit spezieller Temperierung ($\vartheta = 20 \text{ °C} \pm 5 \text{ mK}$ (Kurzzeit bis 1 Stunde)) beträgt die maximal mögliche durch die Totstrecke wegen Schwankung der Temperatur verursachte Abweichung 0,06 nm.

Positionierungsunsicherheit der NMM-1

Die Positionierungsunsicherheit der NMM-1 sollte ebenfalls nicht vernachlässigt werden. Die Unsicherheit der Positionsmessung der NMM-1 wurde ausführlich in [34, 174] behandelt.

Um diese Unsicherheit möglichst gering zu halten, wurde die NMM-1 möglichst von ihrer Umgebung isoliert. Unter Laborbedingungen am FMT befindet sich die NMM-1 auf einer schwingungsgedämpften Granitplatte und unter einer speziell entworfenen Haube, welche durch ein Gestell von der Granitplatte getrennt ist. Durch Kühlplatten innerhalb der Haube und ein Julabo Kälteumwälzthermostat kann die Schwankung der Temperatur beträchtlich reduziert werden. Zusätzlich verringert die Schall- und Wärmeisolierung an den Außenseiten der Haube die Übertragung von Schall-schwingungen an die NMM-1. [220]

Aufgrund dieser Umgebungsisolation wird von dem von Jäger et al. in [35] gegebenen Unsicherheitswert von 3 nm ($k = 2$) für den genutzten Revisionsstand der NMM-1 ausgegangen.

Kombinierte Unsicherheit

Zusammenfassend kann für die Messgröße des Werkstücks eine Über-

lagerung der dargestellten Unsicherheitsbeiträge für eine Einzelpunktanastastung angenommen werden. Für die Angabe der kombinierten Messunsicherheit des Messergebnisses ist der Term der Standardunsicherheit jeder Unsicherheitskomponente $u(x_j)$ sowie deren Empfindlichkeitskoeffizient c_j notwendig [190]. Die Empfindlichkeitskoeffizienten werden durch die Differentialquotienten aus der Messgleichung bestimmt und beschreiben die Abhängigkeit des Messergebnisses von den Eingangsgrößen [221].

$$\begin{aligned} u^2(y) &= \sum_1^N u_j^2(y) = \sum_1^N (c_j \cdot u_j(x_j))^2 \\ &= \sum_1^N \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_j} \cdot u_j(x_j) \right)^2 \end{aligned} \quad (75)$$

Die Messungen mittels AFM können als einfache Differenzmessungen zwischen jeweils zwei Messpunkten betrachtet werden. Im CM wird beispielsweise die Höheninformation H des Messergebnisses als Differenz zwischen den kalibrierten Biegungssignalen des MAFM $d_z(t)$ und den Positionsdaten der z-Achse der NMM-1 $l_z(t)$ von zwei Messpunkten zu den Zeitpunkten t_j und t_{j-1} berechnet:

$$\begin{aligned} H(t_j) &= d_z(t_j) - d_z(t_{j-1}) - [l_z(t_j) - l_z(t_{j-1})] \\ &= k_{dz4} [a_1(t_j) - a_1(t_{j-1})] - [l_z(t_j) - l_z(t_{j-1})] \end{aligned} \quad (76)$$

Mit $j \geq 1$ und $a_1(t)$ als A/D-Wandlerwert (das Biegungssignal wird an den A/D-Kanal a_1 angeschlossen).

Die wesentlichen Standardmessunsicherheiten $u(x_j)$, Empfindlichkeitskoeffizienten c_j und Messunsicherheitsbeiträge $u_j(H)$ der Eingangsgrößen x_j sind in der Tabelle 9 zusammengefasst.

Die Änderungen der Umweltdaten zwischen den zwei Zeitpunkten t_j und t_{j-1} werden jeweils als Differenzwerte eingeführt [174], um eine Entkopplung der Einflussgrößen für die Unsicherheitsberechnung zu erreichen. Die anhand der Messungen (bis 3 Stunden, Temperaturstabilität: ± 40 mK, Druck: ± 50 Pa und Feuchteschwankungen: $\pm 0,9\%$) im Labor am FMT berechneten Standardabweichungen, Empfindlichkeiten und Unsicherheitsbeiträge sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Standardunsicherheit der Totstrecke l_t ($12,9 \pm 1$) mm und die Standardunsicherheit der Drift der Kennlinie zwischen den beiden Messpunkten Δd wurden nach Methode Typ B des GUM ermittelt. Dabei werden die Standardmessunsicherheiten der Umweltdaten und Δa_1 aus [174] entnommen. Die kombinierte Standardunsicher-

heit $u(H)$ während eines Zeitraums von bis zu 2,5 Stunden beträgt 4,68 nm. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Messunsicherheitsbeiträge der Residuen r der Kalibrierung, der Drift der Kennlinie und der Wegdifferenz der NMM-1 dominieren.

Tabelle 9: Wesentliche Standardabweichungen, Empfindlichkeitskoeffizienten und Messunsicherheiten

Eingangsgröße j	Schätzwert x_j	Standardmessunsicherheit $u(x_j)$	Empfindlichkeitskoeffizient $ c_j = \left \frac{\partial H}{\partial x_j} \right $	Unsicherheitsbeitrag $u_j(H) = c_j u(x_j)$, m
k_{dz4}	$0,05 \cdot 10^{-9}$	$3,86 \cdot 10^{-13}$	500	$1,9 \cdot 10^{-10}$
r		$2,35 \cdot 10^{-9}$		$2,35 \cdot 10^{-9}$
Δd	0,04 K	$0,04/3^{0,5}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$
Δa_1	500	5,63	$6,76 \cdot 10^{-13}$	$3,81 \cdot 10^{-12}$
Δt	0,04 K	0,0087	$1,35 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-13}$
Δp	100 Pa	2,9	$3,71 \cdot 10^{-11}$	$1,08 \cdot 10^{-10}$
l_t	$12,9 \cdot 10^{-3}$ m	$1 \cdot 10^{-3}/3^{0,5}$	$2,33 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-10}$
Δl_z		$3 \cdot 10^{-9}$	1	$3 \cdot 10^{-9}$

6.4 Applikationsmessungen

Eine Reihe von Proben wurde untersucht, um die messtechnischen Eigenschaften des Messkopfes zu charakterisieren. Das MAFM wurde für unterschiedliche Langstrecken- und skalenübergreifende Messungen von Stufenhöhen, Gitterabstandsbestimmungen sowie Flächenmessungen eingesetzt. Die Messungen wurden im CM sowie im IM durchgeführt. Bei der Messung im CM wurde das Messergebnis als Differenz zwischen den kalibrierten Biegungssignalen d_z und den Positionsdaten der NMM-1 (z -Achsen, l_z) berechnet. Bei der Messung im IM wurde das Messergebnis als Differenz zwischen den kalibrierten Amplitudensignalen, die in die Auslenkung des *Cantilevers* umgerechnet werden, und den Positionsdaten der NMM-1 angegeben. Zum Vergleich wurden im CM die Messergebnisse als Differenz jeweils zwischen dem umgerechneten Interferometersignal l_{SM-05} und l_z sowie als Differenz zwischen umgerechneten Interferometersignal l_a und l_z berechnet. Im IM wurde der Vergleich aufgrund der Unterabtastung des Interferometersignals l_{SM-05} und l_a nicht gemacht. Im Folgenden werden die Applikationsmessungen dargestellt.

6.4.1 Messungen von Stufenhöhennormalen

Stufenhöhennormale werden zur Kalibrierung der vertikalen Achse von AFMs verwendet. Die Kalibrierung von Stufenhöhennormalen ist eine sehr wichtige Messaufgabe in der dimensionellen Nanometrologie. Ein Satz von Stufenhöhennormalen TGZ (Bild 60) von NT-MDT Spectrum Instruments wurde mit dem MAFM im CM und IM in Scanrichtungen vorwärts (F) und rückwärts (B) gemessen.

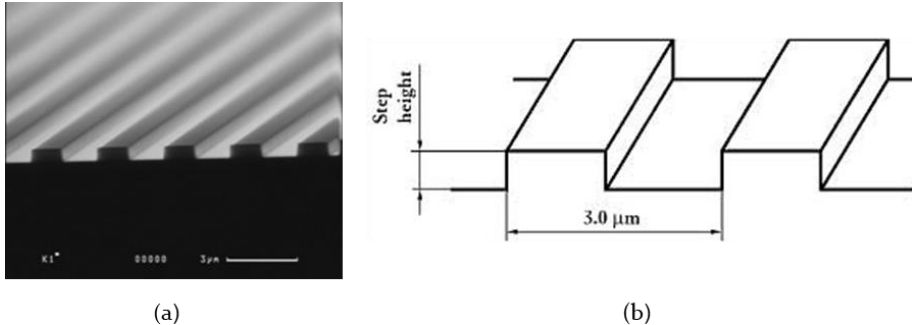


Bild 60: Gitternormal TGZ₁ (a) SEM Bild, (b) Abmessung des Gitternormal [222]

Beispielhafte Messungen im CM und IM am Stufenhöhennormal TGZ₁ (Nennwerte der Stufenhöhe von $(21,4 \pm 1,5)$ nm und der Periode von $(3 \pm 0,01)$ µm) und TGZ₂ (Nennwerte der Stufenhöhe von (108 ± 2) nm und der Periode von $(3 \pm 0,01)$ µm) wurden durchgeführt.

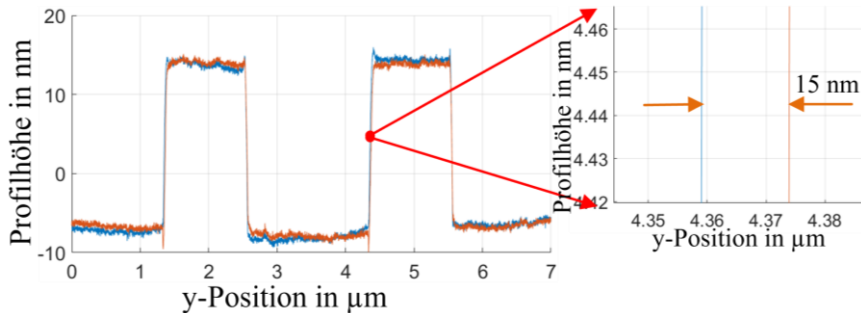


Bild 61 Messung an dem TGZ₁ mit einer Stufenhöhe von $(21,4 \pm 1,5)$ nm im CM (eine gescannte Linie)

Bild 61 zeigt eine Messung im CM an dem TGZ₁ in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung. Die Topografie des Normals wurde entlang eines Scans in y-Richtung der NMM-1 (relativ, y-Achse) aufgenommen. Die Profilhöhe (z-Achse) ist die Differenz zwischen den kalibrierten Biegungssignalen des MAFM und den Positionsdaten der z-Achse der NMM-1. Mit einer Scangeschwindigkeit von 1,5 µm/s und einem Punktabstand von 1 nm beträgt die

mittlere laterale Diskrepanz zwischen Vorwärts- (blau) und Rückwärtsscan (orange) ungefähr 15 nm. Bei der Messung im IM mit gleichem Punktabstand und einer Scangeschwindigkeit von $0,3 \mu\text{m/s}$ beträgt die mittlere laterale Diskrepanz zwischen Vorwärts- und Rückwärtsscan ungefähr 12 nm. Die Diskrepanz wurde nicht geklärt und kann durch die unterschiedlichen Latenzzeiten des Biegungssignals und der Signale der Interferometer der NMM-1 verursacht werden. Zusätzlich existiert ein Unterschied bei den beiden Flanken (Bild (61)). Die Ursache hierfür wurde nicht weiter untersucht, könnte aber eine mechanische Deformation des *Cantilevers* sein. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung s) der Stufenhöhen. Die Stufenhöhen von den gemessenen Normalen wurden nach DIN EN ISO 5436-1:2000-11 Typ A1 berechnet (siehe Abschnitt 4.2.1 Gleichung (19), S. 51). Der Neigungswinkel des *Cantilevers* wurde bei der Kalibrierung des Interferometersignals l_{SM-05} des Schwingungsmessmoduls SM-05 sowie des Interferometersignals l_a berücksichtigt (Abschnitt 6.2.2).

Tabelle 10: Ergebnisse der Stufenhöhenmessungen

Normal	Berechnungstyp	\bar{x} in nm		s in nm	
		F	B	F	B
CM					
TGZ1	d_z-l_z	21,51	21,64	0,34	0,60
	l_a-l_z	21,67	21,71	0,53	0,61
	$l_{SM-05}-l_z$	21,84	21,77	0,64	0,68
TGZ2	d_z-l_z	104,45	104,15	0,29	0,25
	l_a-l_z	105	103,86	0,31	0,24
	$l_{SM-05}-l_z$	105,46	103,66	0,35	0,25
IM					
TGZ1	d_z-l_z	22,67	22,77	1,26	1,49
TGZ2	d_z-l_z	102,35	102,54	1,51	1,2

Die aus den drei Berechnungsweisen ermittelten Messwerte von TGZ1 im CM sowie die ermittelten Messwerte im IM sind nicht identisch. Trotzdem stimmen die Messwerte mit dem Nennwert überein. Die bestimmten absoluten E_n -Scores [223] der Ergebnisse von dem TGZ1 sind geringer als 0,35 (Tabelle 11). Allerdings sind die Messwerte von TGZ2 in beiden Modi kleiner als der gegebene Nennwert, aber die ermittelten Messwerte von TGZ2 in beiden Modi (nicht an derselben Stelle) stimmen miteinander überein. Die absoluten E_n -Scores von TGZ2, die im Bereich zwischen 0,63 und 1,17 liegen, sind relativ größer als die von TGZ1. Dies kann durch die Normale

verursacht sein. Als Beispiel zeigt Bild 62 die Messergebnisse von dem TGZ2 im CM an drei verschiedenen Positionen (dargestellt sind nur die Ergebnisse der Vorwärtsscans). Es ist offensichtlich, dass, obwohl die Messergebnisse von TGZ2 kleiner als der Nennwert sind, eine gute Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen gezeigt wird.

Tabelle 11: E_n -Scores der Ergebnisse der Stufenhöhenmessungen

Normal	Berechnungstyp	\bar{x} in nm	
		F	B
CM			
TGZ1	d_z-l_z	0,04	0,07
	l_a-l_z	0,08	0,1
	$l_{SM-05}-l_z$	-0,1	0,13
TGZ2	d_z-l_z	-0,88	-0,96
	l_a-l_z	-0,74	-1,03
	$l_{SM-05}-l_z$	-0,63	-1,08
IM			
TGZ1	d_z-l_z	0,32	0,32
TGZ2	d_z-l_z	-1,13	-1,17

Die wiederholten Stufenhöhenmessungen für ein Normal wurden innerhalb einer Stunde durchgeführt. Mit Temperierung von ± 5 mK verursachte die Temperatur keinen bemerkenswerten Einfluss auf die Messergebnisse (Abschnitt 6.3). Der größte Einfluss stammt von der Sauberkeit und den Unregelmäßigkeiten der Normale sowie der periodischen Nichtlinearität des z-Interferometers der NMM-1.

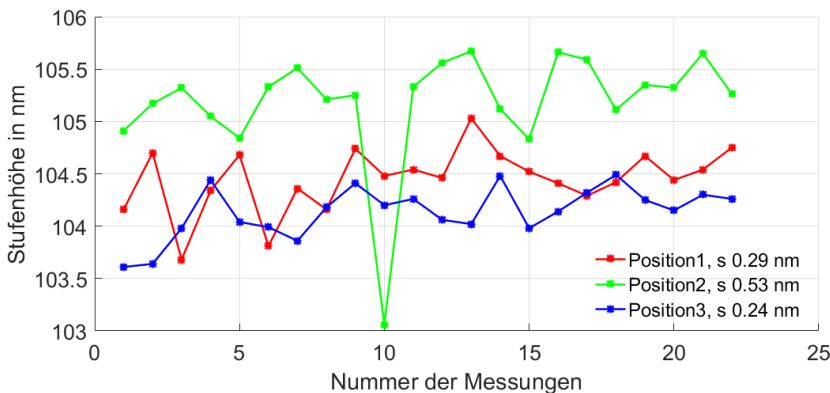


Bild 62: Messergebnisse der Stufenhöhe an drei unterschiedlichen Positionen

6.4.2 Gitterabstandsbestimmungen

Zusätzlich zu Stufenhöhenmessungen wurde das MAFM auch zur Bestimmung des Gitterabstands eingesetzt. Eindimensionale Gitter werden oft als laterale Normale zur Identifizierung von Bildverzerrungen, Kalibrierung der Vergrößerung von Mikroskopen sowie Bestimmung der Nichtlinearität des Piezoscanners eines AFM verwendet.

Das Ergebnis der Gitterabstandsbestimmung wird als mittlerer Gitterabstand senkrecht zu den Gitterlinien ermittelt. Da beim Auflegen des Gitternormals auf die Spiegelecke der NMM-1 keine exakte Ausrichtung der Gitterlinien zu den Achsen des Gerätekoordinatensystems möglich ist, muss die Ausrichtung des Gitters zunächst bestimmt werden. Die NMM-1 kann Scans in beliebiger Richtung durchführen. Dies ermöglicht die Ermittlung der Ausrichtung des Gitters durch zwei Scanlinien (siehe Bild 63).

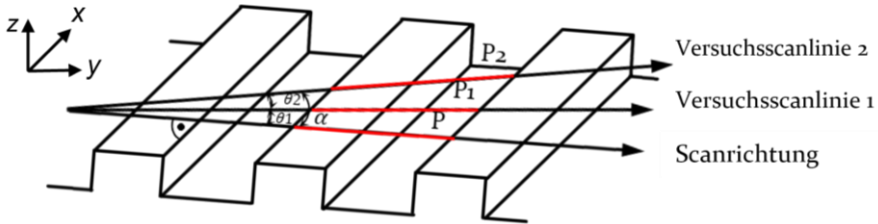


Bild 63: Bestimmung der Scanrichtung

Das Gitter wird zuerst entlang der Versuchsscanlinie 1 bzw. y -Achse gescannt, um die Periode P_1 bestimmen zu können. Der Winkel α kann mithilfe der Periode P_2 von der zweiten Versuchsscanlinie und dem definierten Drehungswinkel θ_2 ermittelt werden. Der unbekannte Winkel θ_1 zwischen der Scanrichtung, die senkrecht zu den Gitterlinien ist, und der ersten Versuchsscanlinie kann mit der berechneten Periode P_1 der ersten Versuchsscanlinie und dem Winkel α bestimmt werden [224, 225].

Danach ist es möglich die Scanrichtung an die Ausrichtung des Normals anzupassen. Die Messungen wurden dann senkrecht zum Gitter TGZ₁ und TGZ₂ in Scanrichtungen vorwärts und rückwärts durchgeführt. Eine lange Scanstrecke, um über eine große Anzahl von Gitterlinien zu messen, ist wichtig, um ein besseres Ergebnis zu erzielen [226]. Eine Scanlänge von 600 μm mit einem Punktabstand von 1 nm wurde auf der gleichen Linie 10-mal wiederholt gemessen. Die gescannten Profile (Bild 64 (a)) sind gekoppelt mit der Form und Welligkeit, die zu einer falschen Erkennung der Grenze von Strukturen und folglich einer nachteiligen Berechnungsgenauigkeit führen können. Ein Hochpassfilter wurde daher zur Filterung der interessierenden hochfrequenten Anteile der Topografie verwendet. Bild 64

zeigt das ursprüngliche Profil der wiederholt im CM gescannten Profile von dem TGZ2 und das Profil nach Anwendung des Hochpassfilters und ein Ausschnitt des Profils.

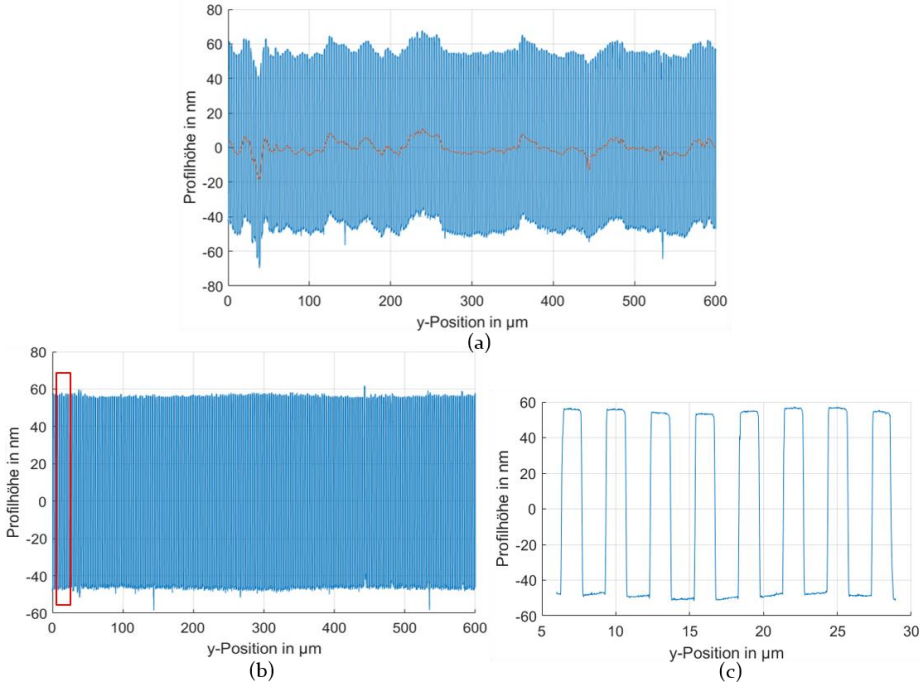


Bild 64: Ursprünglich gemessenes Profil am TGZ2 (a), gemessenes Profil von TGZ2 nach Filterung (b) und ein Ausschnitt des Profils nach Filterung (c)

Die mittleren Gitterabstände wurden mittels der FFT-Methode berechnet [227]. Die berechneten mittleren Gitterabstände \bar{x} sowie die zugehörigen Standardabweichungen s sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Ergebnisse der Gitterabstandmessung

Normal	CM				IM			
	\bar{x} in nm		s in pm		\bar{x} in nm		s in pm	
	F	B	F	B	F	B	F	B
TGZ1	3000,058	3000,053	82,09	84,03	3000,030	3000,038	38,5	65,3
TGZ2	3000,011	3000,056	16,85	74,16	3000,037	3000,023	41,3	24,3

6.4.3 Großflächige Messungen

Im Vergleich zum Tastschnittgerät bzw. Profilometer oder Interferenzmikroskop sind konventionelle AFMs aufgrund der kleineren Scanbereiche für

Anwendungen im Bereich der Messung der Oberflächenrauheit nicht anwendbar.

Die Messbereiche der Rauheitsmessungen, die mittels AFMs durchgeführt wurden [228, 78], betragen mehrere zehn Mikrometer. Die Messergebnisse können jedoch nicht mit den mittels Profilometer oder Interferenzmikroskop erhaltenen Ergebnissen verglichen werden, da die für Bewertung nach Norm notwendigen Messlängen fehlen. Für die Bestimmung der Rauheit ist nach der Norm DIN EN ISO 4288:1998-04 [229] für die Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit eine minimale Scanlänge l_f von $400\ \mu\text{m}$ erforderlich. Außerdem wird nach der Norm DIN EN ISO 11562:1998-09 [230] für phasenkorrekte Filtern eine Scanlänge von $7 \times \lambda_c$ (λ_c ist die Grenzwellenlänge, die typischerweise als $\lambda_c = l_f$ von $0,08\ \text{mm}$, $0,25\ \text{mm}$... $2,5\ \text{mm}$, $8\ \text{mm}$ ausgewählt.) benötigt. Diese Länge ist zu lang für kommerzielle AFMs, deren Scanbereiche meist auf weniger als $200\ \mu\text{m}$ begrenzt sind. Durch die Integration des MAFM in die NMM-1 können diese Scanlängen problemlos für $\lambda_c \leq 2,5\ \text{mm}$ und die Standardvorgabe von 5 Einzelmessstrecken gemessen werden.

Ein beispielhafter Topografiescan im makroskopischen Bereich wurde durchgeführt, um die Fähigkeit des MAFM zu den großflächigen Messungen zu verifizieren. Eine $1\ \text{mm} \times 70\ \mu\text{m}$ Fläche von TGZz wurde mit 10001 Punkten/Scanlinie und 14 Scans im CM gemessen. Bild 65 zeigt einen Ausschnitt aus dem gescannten Bereich.

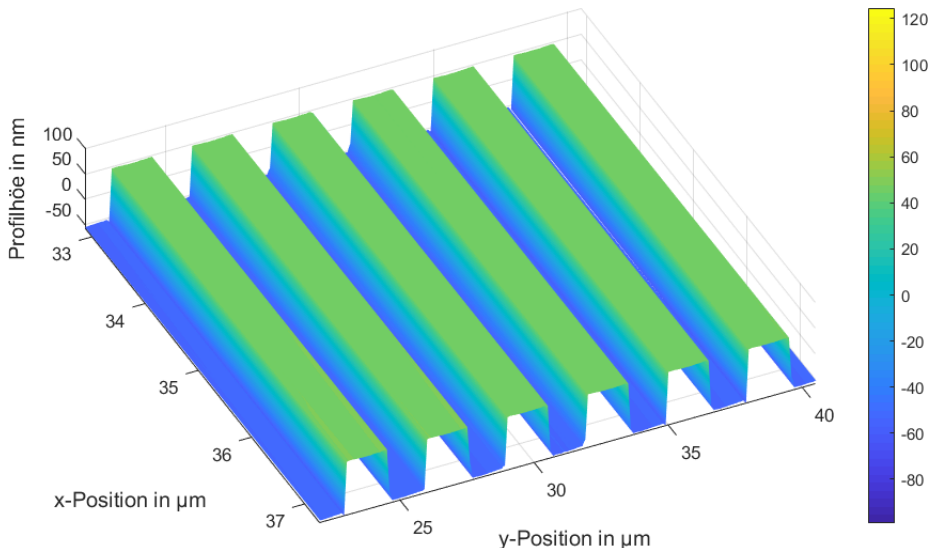


Bild 65: Ausschnitt aus dem gescannten Bereich von dem TGZz

Der mittlere Gitterabstand und die Stufenhöhe der 14 gescannten Linien betragen jeweils $3,003\ 273\ \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $114\ \text{pm}$ und $102,95\ \text{nm}$ mit einer Standardabweichung von $0,55\ \text{nm}$. Diese Messergebnisse werden nicht nur vom MAFM selbst, sondern auch von den lokalen Abweichungen des Gitters beeinflusst. Im Vergleich dazu betragen der gemessene mittlere Gitterabstand und die Stufenhöhe der 10 wiederholt gescannten Profile einer Linie jeweils $3,000\ 011\ \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $17\ \text{pm}$ und $103,86\ \text{nm}$ mit Standardabweichung von $0,25\ \text{nm}$. Ein Ausschnitt der gescannten 14 Linien und der wiederholt gescannten Profile einer Linie ist jeweils in Bild 66 (a) bzw. Bild 66 (b) gezeigt. Die mittlere Drift der 10 wiederholt gescannten Profil einer Linie ist $6,82\ \text{nm}$.

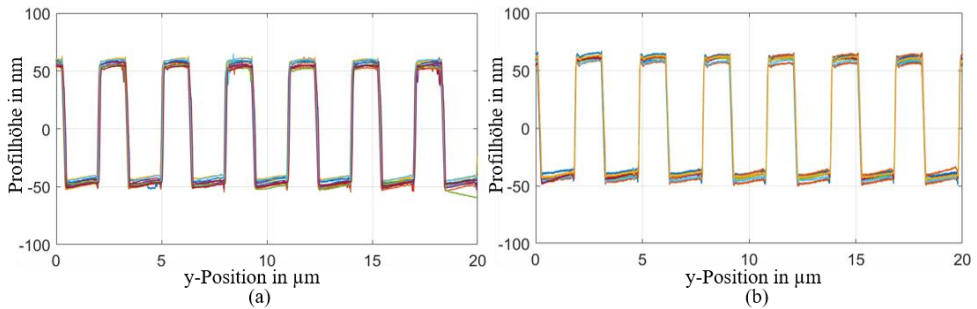


Bild 66: Ausschnitt der gescannten 14 Linien (a) und der wiederholt 10-mal gescannten Profil einer Linie (b)

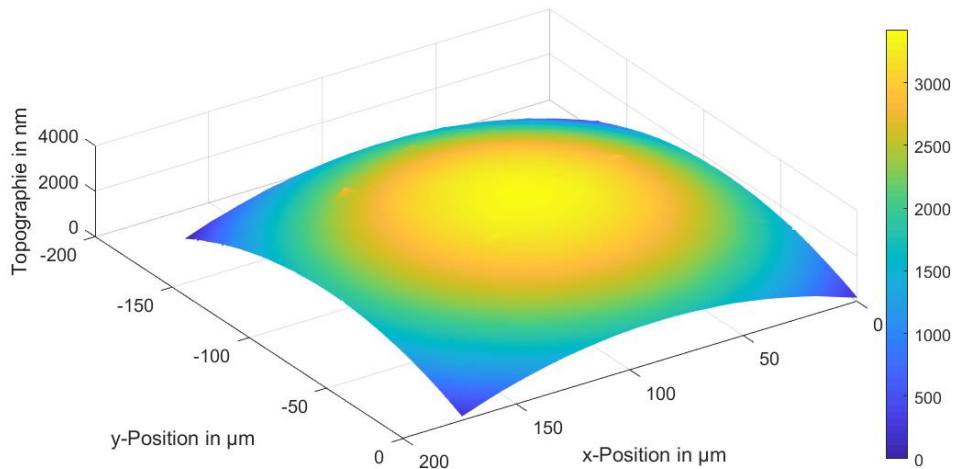


Bild 67: Gemessene Topografie einer Edelstahlkugel

Eine weitere Applikation des MAFM ist die Messung von Oberflächen von Kugeln. Da der Messbereich durch die Wölbung der Kugeloberfläche und die Länge sowie den Neigungswinkel des *Cantilevers* beschränkt wird, wird

vor der Messung der maximal erlaubte Scanbereich berechnet, um eine Beschädigung des *Cantilevers* zu vermeiden. Für eine Kugel mit Durchmesser von 5 mm sollte die Scanfläche $700\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$ nicht überschreiten (der Pol der Kugel befindet sich in der Mitte der Messfläche).

Eine Fläche von $180\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m}$ einer Edelmessingkugel mit einem Durchmesser von 5 mm und 180001 Punkten/Scanlinie und 60 Scans wurde im CM gemessen (Bild 67). Das MAFM eignet sich für skalenübergreifende Messaufgaben einzelner Scanlinien in beliebiger lateraler Orientierung. Die Messung dauerte ungefähr 2 Stunden. Bei gleicher Punktdichte von 1 nm und gleichem Scanlinienabstand von $3\ \mu\text{m}$ würde die Messung einer Oberfläche von $732\ \mu\text{m} \times 732\ \mu\text{m}$ ungefähr 33 Stunden dauern. Bei gleicher Auflösung wie die des WLI (20-fache Vergrößerung, $0,37\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$) würde die Messung einer Oberfläche von $732\ \mu\text{m} \times 732\ \mu\text{m}$ mit dem MAFM 268 Stunden dauern. Aus den gemessenen Profilen lässt sich die Position des Mittelpunktes der Kugel bestimmen. Die Standardabweichungen der y- und z-Position des Mittelpunktes betragen jeweils 124,5 nm und 515,2 nm (Bild 68). Der berechnete arithmetische Mittenrauwert R_a der Kugeloberfläche beträgt 5,46 nm.

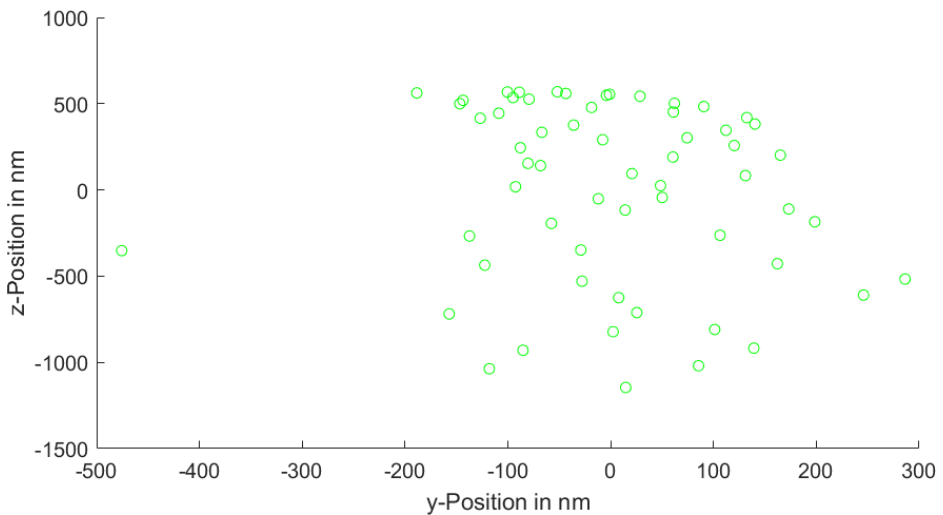


Bild 68: Berechneter Mittelpunkt

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurden ein WLI-System sowie ein MAFM-System vorgestellt. Diese beiden Systeme wurden für großflächige Topografiemessungen bzw. für skalenübergreifende Profilmessungen entlang einzelner Scanlinien beliebiger lateraler Orientierung in die NMM-1 integriert. Die Entwicklung, der Systemaufbau, Analyse und Identifikation der metrologischen Eigenschaften der integrierten Messsysteme und die Analyse von Applikationsmessungen wurden dargestellt.

Ein WLI kann einen flächigen Messbereich mit einer vertikalen Auflösung im Subnanometerbereich und einer lateralen Auflösung im Submikrometerbereich und mit der Punktzahl der Pixelanzahl des Kamerasensors innerhalb einer kurzen Zeit von ungefähr 50 Sekunden erfassen. Um den Messbereich des WLI zu erweitern, wurde ein WLI-Sensorsystem in die NMM-1 integriert. Dadurch werden hochpräzise Messungen mit großen Messbereichen ohne überlappende Felder möglich. Die messtechnischen Eigenschaften des mit der NMM-1 kombinierten WLI-Sensors hinsichtlich Messrauschen, Ebenheitsabweichung, Skalierung und Linearitätsfehler, Verstärkungskoeffizient, Rechtwinkligkeit der Achsen und Messunsicherheit wurden für das Sichtfeld unter Verwendung der flächenhaften Kalibriergitter des NPL und eines Planglases identifiziert. Damit wurden die maximale kombinierte Unsicherheit für drei Achsen jeweils (mit einer 20-fachen Vergrößerung) gemäß des Good Practice Guide No. 127 bestimmt: u_x von 590,3 nm, u_y von 476,3 nm und u_z von 5,6 nm.

Anschließend erfolgte die Kalibrierung und Korrektur der Sensorkippung. Die Kalibrierergebnisse der Orientierung des WLI-Sensors wurden bei der Fusion der Messdaten berücksichtigt und somit ist eine Datenfusion unter Verwendung der Maschinenkoordinaten ohne Überlappungsbereiche möglich. Diese entwickelte Methode wurde beispielhaft durch Fusion der Messdaten benachbarter Bereiche von einer Kugeloberfläche zu einer einzigen Topografie von $732 \mu\text{m} \times 732 \mu\text{m}$ mit einem Pixelabstand von $0,3663 \mu\text{m}$ gezeigt.

Ein neues MAFM mit einstellbarer Position und Richtung des fokussierten Messstrahls auf der Rückseite eines *Cantilevers* wurde entwickelt. Die Kombination von einem Homodyninterferometer zur Detektion der Position und einem Deflektionsmesssystem zum Messen der Biegung und Torsion ermöglicht die gleichzeitige Erfassung von 3D-Informationen. Zwei kippbare Planspiegel wurden als Justiereinheit verwendet, um die Richtung

und die Position des fokussierten Strahls auf der Rückseite des *Cantilevers* einzustellen. Zwei Keilplatten wurden integriert, um die Störinterferenzen zu reduzieren. Die Funktionalität wurde durch die Messergebnisse nachgewiesen. Das MAFM wurde in die NMM-1 integriert, damit großflächige Messungen über einen Bereich von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ realisiert werden können. Eine große Anzahl von Messungen wie z. B. Messungen von Stufenhöhen, Bestimmungen von Gitterabstände, sowie flächige Messungen wurden mittels des MAFM in Kombination mit der NMM-1 durchgeführt. Ein Bereich von $180\text{ }\mu\text{m} \times 180\text{ }\mu\text{m}$ einer Edelmetallkugel mit einem Durchmesser von 5 mm wurde mit 180001 Punkten pro Scanlinie und 60 Scanlinien gemessen. Aus den gemessenen Profilen ergab sich die y - und z -Position des Mittelpunktes der Kugel. Der berechnete arithmetische Mittenrauwert R_a beträgt $5,46\text{ nm}$. Die Standardabweichungen der y - und z -Position des Mittelpunktes betragen jeweils $124,5\text{ nm}$ und $515,2\text{ nm}$.

Heutzutage gewinnt die Messung mit hohen Scangeschwindigkeit zunehmend an Bedeutung. Ein WLI kann flächige Bereiche entsprechend der Bildsensorgöße und der Vergrößerung des Objektivs von mehreren zehn bis zu mehreren hundert Mikrometern innerhalb einer kurzen Zeit von einigen Sekunden erfassen. Dahingegen können nur speziell entwickelte AFM-Systeme mit z. B. kleinen *Cantilevern*, *Cantilever*-Arrays, Regelkreisen mit großer Bandbreite, Dämpfung der mechanischen Schwingungen und speziell entwickeltem Controller Messungen mit hohen Scangeschwindigkeiten erzielen. Allerdings wurden solche Messungen bisher nur mit kleinen Bewegungsbereichen im Bereich von wenigen Mikrometern realisiert [231, 232]. Im Rahmen dieser Dissertation wurde das MAFM nur als passives Antastsystem verwendet. Aufgrund der hohen Masse der Spiegelecke und Halterung (ungefähr 1 kg) ist die Dynamik der NMM-1 begrenzt für schnelle Regelungen. Eine Messung mit wesentlich höherer Geschwindigkeit würde erst durch den Einsatz des MAFM als aktives Antastsystem realisierbar [233].

Allerdings haben das WLI und das MAFM jeweils ihre eigenen prinzipbedingten Nachteile. Die laterale Auflösung des WLI ist wie bei anderen optisch Messverfahren durch die Beugungsgrenze eingeschränkt und liegt im Bereich von hundert Nanometern bis zu Mikrometern. Bei Messungen mittels AFM ist die Messgeschwindigkeit durch die punktförmige Aufnahme der Messpunkte begrenzt. Die Kombination eines WLI-Systems mit einem AFM kann eine Lösung bieten. Dadurch könnte die Übersichtsmessung [234] mittels WLI durchgeführt werden. Danach könnten die interessanten Messbereiche nach Bedarf selektiert und mittels AFM mit hoher Auflösung gemessen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Feynmann, „Plenty of Room at the Bottom,“ Annual meeting of the American Physical Society at Caltech, California Institute of Technology, 1959.
- [2] J. Corbett, P. Mckeown, G. Peggs und R. Whatmore, „International Developments and Emerging Products,“ *Nanotechnology*, S. 523-545, 2000.
- [3] H.-U. Danzebrink, T. Dziomba, M. Xu, A. Pidduck, R. Leach, A. Yaccot und L. Koenders, „Scanning Probe Microscopy, Scanning Electron Microscopy and Critical Dimension: Nanometrology Status and Future Needs within Europe,“ *Nanometrology Discussion Papers Co-Nanomet*, S. 55-57, 2009.
- [4] G. Berndt, E. Hultsch und H. Winhold, „Funktionstoleranz und Meßunsicherheit,“ *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 17, S. 465-471, 1968.
- [5] H. N. Hansen, K. Carneiro, H. Haitjema und L. De Chiffere, „Dimensional Micro and Nano Metrology,“ *Annals of CIRP* 55, S. 721-743, 2006.
- [6] M. Bienias, S. Gao, K. K. Hasche, R. Seemann und K. Thiele, „A metrological scanning force microscope used for coating thickness and other topographical measurements,“ *Applied Physica A*, S. 837-842, March 1998.
- [7] „Mikrooptik,“ GD Optical Competence GmbH, [Online]. Available: <https://www.gdoptics.de/produkte/mikrooptik/?L=0>. [Zugriff am 28 06 2021].
- [8] „Refractive Microlenses,“ SUSS MicroOptics SA, [Online]. Available: <https://www.suss-microoptics.com/en/products>. [Zugriff am 28 06 2021].
- [9] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Haggmann, A. Maner und D. Münchmeyer, „Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation

- lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process),“ *Microelectronic Engineering* 1/4, S. 35-56, 1986.
- [10] DIN ISO 1328-1:2018-03, Zylinderräder-ISO-Toleranzsystem - Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken (ISO 1328-1:2013).
- [11] M. Gronle, W. Lyda und W. Osten, „Model-based, active inspection of three-dimensional objects using a multi-sensor measurement system,“ *SPIE Optical Metrology, Vol. 8788*, S. 8788oY1-8, 2013.
- [12] „DLP3010,“ Texas Instruments, [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/DLP3010?keyMatch=&tisearch=search-everything&usecase=partmatches#product-details##features>. [Zugriff am 28 06 2021].
- [13] F. M. Serry, P. J. Nagy, J. Horwitz, P. I. Oden und M. Heaton, „3D MEMS Metrology with Atomic Force Microscope,“ Veeco Metrology Group, Santa Barbara, 2002.
- [14] W. Barthlott und C. Neinhuis, „Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces,“ *Planta* 202, S. 1-8, 1997.
- [15] F. Müller und P. Winter, „Clean surfaces with the lotus-effect,“ *Jornadas comite espanol de la detergencia* 34, S. 103-111, 2004.
- [16] M. Stedman, „Mapping the performance of surface-measuring instruments,“ *Fourth International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Sciences and Engineering*, S. 138-142, 1987.
- [17] S. Rosén, T. R. Thomas und B.-G. Rosén, „The Stedman diagram revisited,“ *Surface Topography: Metrology and Properties*, S. 014005, 2013.
- [18] L. D. Chiffre, H. Kunzmann, G. N. Peggs und D. A. Lucca, „Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology,“ *CIRP Annals, Volume 52, Issue 2*, S. 561-577, 2007.
- [19] „MarSurf LD 130 / LD 260,“ Carl Mahr Holding GmbH, [Online]. Available: <https://www.mahr.de/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Produkte/MarSurf---PC-basierende-Rauheitsmessger%C3%A4te/>. [Zugriff am 28 06 2021].

- [20] „Form Talysurf PGI 1240,“ Taylor Hobson, Ltd., [Online]. Available: <http://pdf.directindustry.de/pdf/taylor-hobson/form-talysurf-pgi-1240/7159-75669.html>. [Zugriff am 28.06.2021].
- [21] R. Erlandsson, G. McClelland und C. M. Mate, „Atomic force microscopy using optical interferometry,“ *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, S. 266-270, 1988.
- [22] M. Ichiko, G. Satoshi und K. Tomizo, „Uncertainty in pitch measurements of one-dimensional grating standards using a nanometrological atomic force microscope,“ *Measurement Science and Technology*, S. 463-471, 2003.
- [23] F. Gao, R. Leach, J. Petzing und J. Coupland, „Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers,“ *Measurement Science and Technology*, S. 015303, 2008.
- [24] V. L. Mironov, *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*, Russian: The Russian Academy of Sciences, 2014, S. 5.
- [25] G. Binnig, C. Gerber und C. Quate, „Atomic Force Microscope,“ *Physical Review Letters*, S. 933, 1986.
- [26] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber und E. Weibel, „Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy,“ *Physical Review Letters* 49, 5 July 1982.
- [27] S. Reed, *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*, Cambridge CB2 2RU, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [28] R. F. Egerton, P. Li und M. Malac, „Radiation damage in the TEM and SEM,“ *Micron* 35, S. 399-409, 2004.
- [29] K. D. Vernon-Parry, „Scanning Electron Microscopy: an introduction,“ *III-Vs Review, Vol. 13*, S. 40-44, 2000.
- [30] DIN EN ISO 10360-1:2003-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe (ISO 10360-1:2000 + Corr 1:2002) (enthält Berichtigung AC:2002).

- [31] VDI/VDE 2617 Blatt 12.1:2011-03. Annahme- und Bestätigungsprüfungen für Koordinatenmessgeräte zum taktilen Messen von Mikrogeometrien; Acceptance and reverification tests for tactile CMMs measuring microgeometries, 2011.
- [32] T. A. Ruijl, Ultra Precision Coordinate Measuring Machine - Design, Calibration and Error Compensation, Wageningen: Ponsen & Looijen, 2001.
- [33] H. Spaan und I. Widdershoven, „Isara 400 Ultra-precision CMM,“ *VDI-Berichte 2133*, S. 41-50, 2011.
- [34] T. Hausotte, Nanopositionier- und Nanomessmaschine, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2002.
- [35] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte und H.-J. Büchner, „Metrologische Grundlagen und Wirkungsweise der Nanopositionier- und Messmaschine NMM-1,“ *Technisches Messen 76/5*, S. 227-234, 2009.
- [36] VDI/VDE 2617 Blatt 12.2:2020-10-Entwurf. Annahme- und Bestätigungsprüfungen von Koordinatenmessgeräten zum optischen Messen von Mikrogeometrien in Anlehnung an DIN EN ISO 10360-8 und VDI/VDE 2617 Blatt 6.2, 2020.
- [37] R. Campbell und P. Flynn, „A Survey Of Free-Form Object Representation And Recognition Techniques,“ *Computer Vision and Image Understanding 81*, S. 166-210, 2001.
- [38] L. Shaw, Methode zur automatischen Registrierung und Fusion von Multisensordaten zur Charakterisierung von mehrskaligen Werkstücken, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2012.
- [39] B. Zitova', „Image registration methods: a survey,“ *Image and Vision Computing 21*, S. 977-1000, 2003.
- [40] C. Harris und M. Stephens, „A combined corner and edge detector,“ *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference*, S. 147-151, 1988.
- [41] T. Lindeberg, „Feature Detection with Automatic Scale Selection,“ *International Journal of Computer Vision 30*, S. 77-116, 1998.

- [42] K. Mikolajczyk und C. Schmid, „Indexing based on scale invariant interest points,“ *International Conference on Computer Vision*, S. 525-531, 2001.
- [43] K. Mikolajczyk und C. Schmid, „An affine invariant interest point detector,“ *7th European Conference on Computer Vision*, S. 128-142, 2002.
- [44] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8*, S. 679-697, 1986.
- [45] N. R. Pal und S. K. Pal, „A review on image segmentation techniques,“ *Pattern Recognition* 26, S. 1277-1294, 1993.
- [46] H. Barrow, J. Tenenbaum, R. Bolle und H. Wolf, „Parametric correspondence and chamfer matching: Two new techniques for image matching,“ *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, S. 659-663, 1977.
- [47] A. W. Fitzibbon, „Robust registration of 2D and 3D point sets,“ *Image and Vision Computing* 21, S. 1145-1153, 2003.
- [48] D. Lowe, „Distinctive image features from scale-invariant keypoints,“ *International Journal of Computer Vision* 60, S. 91-100, 2004.
- [49] J. Bauer, N. Sünderhauf und P. Protzel, „Comparing several Implementations of two recently published Feature Detectors,“ *Proc. of the International Conference on Intelligent and Autonomous Systems*, S. 143-148, 2007.
- [50] R. S. Mitra und N. N. Murthy, „Elastic maximal matching,“ *Pattern Recognition, Vol. 24, No. 8*, S. 747-753, 1991.
- [51] C. Ó. S. Sorzano, P. Thévenaz und M. Unser, „Elastic Registration of Biological Images Using Vector-Spline Regularization,“ *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, S. 652-663, 2005.
- [52] J. Le Moigne, „Parallel registration of multisensor remotely sensed imagery using wavelet coefficients,“ *SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace*

- Sensing, Proceedings Vol. 2242, Wavelet Applications*, S. 432-443, 1994.
- [53] C. Studholme, D. L. G. Hill und D. J. Hawkes, „Automated 3D Registration of Truncated MRand CT Images of the Head,“ *Proceedings of the Sixth British Machine Vision Conference*, S. 27-36, 1995.
- [54] Z. Zhang, „On Local Matching of Free-Form Curves,“ *Proceedings of British Machine Vision Conferences*, S. 347-356, 1992.
- [55] P. J. Besl und N. D. McKay, „A method for registration of 3D shapes,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intellingce, Volume 14, Issue 2*, S. 239-256, 1992.
- [56] L. Lucchese, G. Doretto und G. Cortelazzo, „A frequency domain technique for range data registration,“ *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, S. 1468-1484, 2002.
- [57] VDI/VDE 2617 Blatt 6.2:2021-02. Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-8 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Abstandssensoren, 2021.
- [58] R. Christoph, „Koordinatenmessgeräte mit Multisensorik – Flexibilität und Präzision für Messraum und Fertigung,“ *VDI-Berichte 1618*, S. 49-59, 2001.
- [59] C. Keferstein, R. Züst, M. Marxer und O. Gächter, „Optische Sensoren auf Koordinatenmessgeräten,“ *VDI-Berichte 1618*, S. 181-192, 2001.
- [60] G. Dai, S. Bütetisch, F. Pohlenz und H.-U. Danzebrink, „A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes,“ *Measurement Science and Technology, Vol. 20*, S. 084001, 30 June 2009.
- [61] „Koordinatenmessgeraete mit Multisensorik,“ Werth Messtechnik GmbH, [Online]. Available: <https://www.werth.de/de/navigation/presse/fachartikel/multisensorik/koordinatenmessgeraete-mit-multisensorik.html>. [Zugriff am 28 06 2021].

- [62] M. Kujawinska, R. Sitnik und J. Woznicki, „Digital fringe projection system for large-volume 360° shape measurement,“ *Optical Engineering*, S. 443-449, 2002.
- [63] A. Gräper, A. Kraft, J. Seewig und E. Reithmeier, „Development of Multifunctional Standards for Optical 3D Microscopy,“ *Technisches Messen*, S. 19-25, 2006.
- [64] J. Wang, J. Shi und X. Wu, „Survey of image mosaics,“ *Application Research of Computers*, S. 1940-1943, 2008.
- [65] M. Viottia, A. Albertazzia, A. Dal Pont und A. Fantina, „Evaluation of a novel algorithm to align and stitch adjacent measurements of long inner cylindrical surfaces with white light interferometry,“ *Optics and Lasers in Engineering*, S. 852-859, 2007.
- [66] T. Y. Chen und L. C. Yeh, „Large surface profil measurement of microstructures by white light phase- shifting interferometer and image stitching,“ *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2009*, S. 2382-2384, 2009.
- [67] T. H. Kim, B. C. Kim, S. H. Kim, T. J. Park, D. H. Go und M. S. Choi, „Stitching Method using White Light Scanning Interferometry,“ *Proceedings of the 3rd World Congress on Recent Advances in Nanotechnology*, S. 1291-1293, 10-12 4 2018.
- [68] A. Olszak, „Improved fast white-light scanning profilometer,“ *Laser Interferometry X: Techniques and Analysis, SPIE Proceedings*, S. 173-184, 2006.
- [69] A. Olszak, „Lateral scanning white-light interferometer,“ *Optical Society of America, Volume 39, Issue 22*, S. 3906-3913, 2000.
- [70] T. Guo und L. Ma, „A nanomeasuring machine based white light tilt scanning interferometer for large scale optical array structure measurement,“ *Optics and Lasers in Engineering*, S. 1124-1130, 2011.
- [71] L.-C. Chen und M.-T. Le, „3-D micro surface profilometry employing novel Mirau-based lateral scanning interferometry,“ *Measurement Science and Technology*, S. 94004, 2014.
- [72] F. Munteanu, „Self-calibrating lateral scanning white-light interferometry,“ *Applied Optics*, S. 2371-2375, 2010.

- [73] T. Machleidt, E. Sparrer, E. Manske, D. Kapusi und K.-H. Franke, „Area-based optical 2.5D sensors of a nanopositioning and nanomeasuring machine,“ *Meas. Sci. Technol.* 23, S. 074010, 2012.
- [74] „NaioAFM,“ Nanosurf AG, [Online]. Available: <https://www.nanosurf.com/downloads/Nanosurf--NaioAFM-Brochure.pdf>. [Zugriff am 28.06.2021].
- [75] T. Dziomba, G. Dai, M. Ritter und M. Shaleev, „Turning Scanning Probe Microscopy into a more quantitative method,“ *COOMET Symposium*, S. 1-4, 2007.
- [76] S. Gonda, T. Doi, T. Kurosawa und Y. Tanimura, „Real-time, interferometrically measuring atomic force microscope for direct calibration of standards,“ *Review of Scientific Instruments* 70, S. 3362, 1999.
- [77] R. Dixon, R. Köning, J. Fu und T. Vorburger, „Accurate dimensional metrology with atomic force microscopy,“ *SPIE Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIV*, S. 362-368, 2000.
- [78] J. Garnaes, N. Kofod, A. Kühle, C. Nielsen, K. Dirscherl und L. Blunt, „Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscopes,“ *Precision Engineering*, S. 91-98, January 2003.
- [79] J. Haycocks und K. Jackson, „Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy,“ *Precision Engineering* 29, S. 168-175, 2005.
- [80] F. Meli und R. Thalmann, „Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements,“ *Measurement Science and Technology*, S. 1087, 1998.
- [81] G. Picotto und M. Pisani, „A sample scanning system with nanometric accuracy for quantitative SPM measurements,“ *Ultramicroscopy* 86, S. 247-254, 18 July 2000.
- [82] J. Schneir, T. McWaid, J. Alexander und B. Wilfley, „Design of an atomic force microscope with interferometric position control,“ *Journal of Vacuum Science & Technology B*, S. 3561-3566, 1994.

- [83] G. Dai, F. Pohlenz, H.-U. Danzebrink, M. Xu, K. Hasche und G. Wilkening, „Metrological large range scanning probe microscope,“ *Review of Scientific Instruments* 75, S. 962-969, 15 March 2004.
- [84] D. Schulz, „Rasterkraftmikroskop mit erweitertem Messbereich,“ [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-52/ag-525/rastersonden525.html>. [Zugriff am 05 12 2018].
- [85] G. Dai, L. Jung, F. Pohlenz, H.-U. Danzebrink, R. Krüger-Sehm, K. Hasche und G. Wilkening, „Measurement of micro-roughness using a metrological large range scanning force microscope,“ *Measurement Science and Technology* 15, S. 2039-2046, 2004.
- [86] A. J. Kramar, „Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine,“ *Measurement Science and Technology*, S. 2121-2128, 2005.
- [87] J. Li, Y. Shen, J. Jeong, F. E. Scire und J. A. Kramar, „A compact, compound actuator for the molecular measuring machine,“ *American Society for Precision Engineering, Annual Meeting, 23rd, Proceedings of ASPE 23rd Annual Meeting*, 2008.
- [88] A. D. Mazzeo, A. J. Stein, D. L. Trumper und R. J. Hocken, „Atomic force microscope for accurate dimensional metrology,“ *Precision Engineering*, S. 135-149, 2009.
- [89] B. J. Eves, „Design of a large measurement-volume metrological atomic force microscope (AFM),“ *Measurement Science and Technology*, S. 084003, 30 6 2009.
- [90] N. Vorbringer-Dorozhovets, Laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2019.
- [91] H.-U. Danzebrink, L. Koenders, G. Wilkening, A. Yacoot und H. Kunzmann, „Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology,“ *CIRP Annals*, Vol. 55, S. 841-878, 2006.
- [92] A. A. Michelson und E. W. Morley, „On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether,“ *American Journal of Science* 34, S. 333-345, 1887.
- [93] E. Hering, M. Rolf und M. Stohner, Physik für Ingenieure, Berlin: Springer, 2016.

- [94] M. Nioi, P. E. Napoli, S. M. Mayerson, M. Fossarello und E. d'Aloja, „Optical coherence tomography in forensic sciences: a review of the literature,“ *Forensic Science, Medicine and Pathology*, S. 445-452, 2019.
- [95] H. Haferkorn, *Optik: physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*, Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [96] J. Eichler und H. J. Eichler, *Laser*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [97] D. Dontsov, *Homodyninterferometer zur berührungslosen Schwingungsanalyse*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2003.
- [98] R. C. Jones, „A new calculus for the treatment of optical systems: I. Description and discussion of the calculus,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 488-493, 1941.
- [99] K. Leonhardt, *Optische Interferenzen*, Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1981.
- [100] R. C. Jones und J. H. Hurwitz, „A new calculus for the treatment of optical systems: II. Proof of three general equivalence theorems,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 493-500, 1941.
- [101] R. C. Jones, „New calculus for the treatment of optical systems. III. The Sohncke theory of optical activity,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 500-503, 1941.
- [102] R. C. Jones, „New calculus for the treatment of optical systems. IV,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 486-493, 1942.
- [103] R. C. Jones, „A new calculus for the treatment of optical systems. V. More general formulation and description of another calculus,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 107-110, 1947.
- [104] R. C. Jones, „New calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrices,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 110-112, 1947.
- [105] D. Lopez-Mago, A. Canales-Benavides, R. I. Hernandez-Aranda und J. C. Gutiérrez-Vega, „Geometric phase morphology of Jones matrices,“ *Optics Letters*, S. 2667-2670, 2017.

- [106] PTB, „Grundprinzip der Interferenz und Einsatz im Bereich der Mikrotopographiemesstechnik,“ [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-51/ag-514/interferenzmikroskopie1.html>. [Zugriff am 12 2018].
- [107] DIN EN ISO 25178-6:2010-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 6: Klassifizierung von Methoden zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-6:2010).
- [108] R. Leach, *Optical Measurement of Surface Topography*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [109] P. Carré, „Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures,“ *Metrologia* 2, S. 13-23, 1966.
- [110] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White und D. J. Brangaccio, „Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses,“ *Appl. Opt.*, S. 2693-2703, 1974.
- [111] M. Servin, R. Rodriguez-Verar und A. J. Moore, „A Robust Cellular Processor for Phase Unwrapping,“ *Journal of modern optics*, S. 119-127, 1994.
- [112] A. Baldi, F. Bertolino und F. Ginesu, „On the performance of some unwrapping algorithms,“ *Optics and Lasers in Engineering* 37, S. 313-330, 2002.
- [113] R. v. d. D. Lennert und J. v. V. Lucas, „Temporal phase-unwrapping algorithm for dynamic interference pattern analysis in interference-contrast microscopy,“ *Applied optics*, S. 4487-4500, 9 2001.
- [114] A. Harasaki und J. C. Wyant, „Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry,“ *Optical Society of America*, S. 2101-2106, 2000.
- [115] J. C. Wyant und K. Creath, „Advances in interferometric optical profiling,“ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 32, Issues 1-2, S. 5-10, 1992.

- [116] K. Creath, „Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry,“ *Applied Optics Vol. 26, Issue 14*, S. 2810-2816, 1987.
- [117] Y.-Y. Cheng und J. C. Wyant, „Multiple-wavelength phase-shifting interferometry,“ *Applied Optics Vol. 24, Issue 6*, S. 804-807, 1985.
- [118] A. H. Mirau, „Interferometer: französisches Patent Nr. 152151,“ 3 3 1949.
- [119] G. S. Kino und S. S. C. Chim, „Mirau correlation microscope,“ *Applied Optics*, S. 3775-3783, 1990.
- [120] S. S. C. Chim und G. S. Kino, „Phase measurements using the Mirau correlation microscope,“ *Applied Optics*, S. 2197-2201, 1991.
- [121] J.-P. Perez, Optik, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996.
- [122] J. C. Wyant, „Advances in Interferometric Metrology,“ *Proceedings of SPIE*, S. 154-162, 2002.
- [123] B. Bharat, C. W. James und M. John, „A new three-dimensional non-contact digital optical profiler,“ *Wear*, S. 301-312, 15 3 1988.
- [124] D. Bimberg, Messtechniken mit Laser, Engelsberg: expert-Verlag, 1993.
- [125] „MarSurf WS1,“ Carl Mahr Holding GmbH, [Online]. Available: <https://willrich.com/wp-content/uploads/2014/07/Mahr-Marsurf-WS1-High-Precision-Non-Contact.pdf>. [Zugriff am 28 06 2021].
- [126] A. Dubois, J. Selb, L. Vabre und A. C. Boccara, „Phase measurements with wide-aperture interferometers,“ *Optical Society of America*, S. 2326-2331, 2000.
- [127] P. Kühnhold, W. Xie und P. Lehmann, „Comparison of Michelson and Linnik interference microscopes with respect to measurement capabilities and adjustment efforts,“ *Proceedings of SPIE Volume 8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, S. 87882G, 2013.

- [128] E. P. Goodwin und J. C. Wyant, *Field Guide to Interferometric Optical Testing*, Bellingham: SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2006.
- [129] S. Bandyopadhyay, „White light Interferometer: Applications in Research and Industry,“ *Proc. of SPIE Vol. 9654*, S. 965402-1, 2015.
- [130] Y. Bian, T. Guo, F. Li und S. Wang, „Large step structure measurement by using white light interferometry based on adaptive scanning,“ *Proc. of SPIE Vol. 8759*, S. 87594T-1, 2013.
- [131] P. Lehmann, S. Tereschenko, B. Allendorf, S. Hagemeyer und L. Hüser, „Spectral composition of low-coherence interferograms at high numerical apertures,“ *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2019.
- [132] P. Caber, „Interferometric profiler for rough surfaces,“ *Applied Optics*, S. 3438-3441, 1993.
- [133] H. Haneishi, Abschlussarbeit, Signal processing for film thickness measurements by white light interferometry., Department of Communications and Systems Engineering, University of Electcommunications, Chofu, Tokyo, 1984.
- [134] K. Creath, „V Phase Measurement Interferometry Techniques,“ *Progress in Optics*, S. 349-393, 1988.
- [135] W. Osten, *Digital Processing and Evaluation of Interference Images*, Berlin: Akademie Verlag, 1991.
- [136] D. Robinson und G. Reid, „Interferogram Analysis,“ *Physics Today*, *Volume 47*, S. 66, 1993.
- [137] J. Schwider, „Advanced Evaluation Techniques in Interferometry,“ *Progress in Optics*, S. 271-359, 1990.
- [138] K.-H. Laermann, *Optical Methods in Experimental Solid Mechanics*, Springer, Vienna, 2000.
- [139] K. Qian, F. Shu und X. Wu, „Determination of the best phase step of the Carré algorithm in phase shifting interferometry,“ *Measurement Science and Technology*, S. 1220-1223, 2000.

- [140] A. Harasaki, J. Schmit und J. C. Wyant, „Improved vertical-scanning interferometry,“ *Applied Optics*, S. 2107-2115, 2000.
- [141] K. A. Goldberg und J. Bokor, „Fourier-transform method of Phase-shift determination,“ *Applied optics* 40, S. 2886-2894, 6 2001.
- [142] C. Quan, S. Wang und C. Tay, „Nanoscale surface deformation inspection using FFT and phase-shifting combined interferometry,“ *Precision Engineering*, S. 23-31, 1 2006.
- [143] C. Ai und E. L. Novak, „Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry“. United State Patent 5633715, 1997.
- [144] M.-C. Park, „Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms,“ *Optical Engineering*, S. 952-959, 1 4 2000.
- [145] S. Chen, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan und B. T. Meggitt, „Digital signal-processing techniques for electronically scanned optical-fiber white-lightinterferometry,“ *Applied Optics*, S. 6003-6010, 1992.
- [146] S. S. Chim und G. S. Kino, „Three-dimensional image realization in interference microscopy,“ *Applied Optics*, S. 2550-2553, 1992.
- [147] L. Deck und P. d. Groot, „High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry,“ *Applied Optics*, S. 7334-7338, 1994.
- [148] M. Hart, V. D. G. und M. L. Begbie, „Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with Fourier transform spectroscopy,“ *Applied Optics*, S. 1764-1769, 1998.
- [149] Z. Sarac, D. Ali, Y. Sündüs und F. N. Ecevit, „Wavelet phase evaluation of white light interferograms,“ *Measurement Science and Technology*, S. 1878-1882, 8 2005.
- [150] M. Li, C. Quan und C. J. Tay, „Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry,“ *Optics & Laser Technology*, S. 920-929, 2008.

- [151] P. d. Groot, X. C. d. Lega und J. Kramer, „Determination of fringe order in white-lightinterference microscopy,“ *Applied Optics*, S. 4571-4578, 2002.
- [152] P. d. Groot und L. Deck, „surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain,“ *Journal of Modern Optics*, S. 389-401, 1995.
- [153] P. d. Groot und X. C. d. Lega, „Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy,“ *Applied Optics*, S. 4821-4830, 2004.
- [154] P. Sandoz, R. Devillers und A. Plata, „Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry,“ *Journal of Modern Optics*, S. 519-534, 1997.
- [155] K. G. Larkin, „Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry,“ *Journal of the Optical Society of America*, S. 832-843, 1996.
- [156] B. Bhushan, Springer Handbook of Nanotechnology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [157] H.-J. Butt, B. Cappella und M. KAPPL, „Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications,“ *Surface Science Reports* 59, S. 1-152, 2005.
- [158] J. F. Gonzalez-Martinez, E. Kakar, S. Erkselius, N. Rehnberg und J. Sotres, „Effect of Relative Humidity on the Viscoelasticity of Thin Organic Films Studied by Contact Thermal Noise AFM,“ *Langmuir*, S. 6015-6023, 2019.
- [159] F. J. Giessibl, „Advances in atomic force microscopy,“ *Reviews of Modern Physics*, S. 949-983, 2003.
- [160] A. Yacoot und L. Koenders, „Aspects of scanning force microscope probes and their effects on dimensional measurements,“ *Journal of Physics D: Applied Physics* 41, S. 103001, 2008.
- [161] Y. Leng, Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods, Singapore: John Wiley & Sons, 2009.
- [162] T. R. Albrecht, S. Akamine, T. E. Carver und C. F. Quate, „Microfabrication of cantilever styli for the atomic force

- microscope," *Journal of Vacuum Science and Technology*, S. 3386, 1990.
- [163] J. J. Roa, G. Oncins, J. Diaz, F. Sanz und M. Segarra, „Calculation of Young's Modulus Value by Means of AFM," *Recent Patents on Nanotechnology 2011*, Vol. 5, S. 27-36, 2011.
- [164] E. Meyer, H. J. Hug und R. Bennewitz, *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [165] M. Kopycinska-Müller, R. H. Geiss und D. C. Hurley, „Contact mechanics and tip shape in AFM-based nanomechanical measurements," *Ultramicroscopy 106*, S. 466-474, 2006.
- [166] U. Maver, T. Velnar, M. Gaberšček, O. Planinšek und M. Finšgar, „Recent progressive use of atomic force microscopy in biomedical applications," *Trends in Analytical Chemistry*, S. 96-111, 2016.
- [167] K. Yamasue, K. Kobayashib, H. Yamada, K. Matsushige und T. Hikihara, „Controlling chaos in dynamic-mode atomic force microscope," *Physics Letters A 373*, S. 3140-3144, 2009.
- [168] R. Howland, L. Benatar und J. Leckenby, „A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy," *ThermoMicroscopes*, 2000. [Online].
- [169] M. G. Ruppert und S. O. R. Moheimani, „Multimode Q Control in Tapping-Mode AFM: Enabling Imaging on Higher Flexural Eigenmodes," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 24, Issue 4, S. 1149-1159, 2016.
- [170] T. Ando, T. Uchihashi und T. Fukum, „High-speed atomic force microscopy for nano-visualization of dynamic biomolecular processes," *Progress in Surface Science, Volume 83, Issues 7-9*, S. 337-437, 2008.
- [171] A. Yacoot und L. Koenders, „Recent developments in dimensional nanometrology using AFMs," *Measurement Science and Technology*, Vol. 22, Bd. Volume 22, S. 122001, 2011.
- [172] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte und H.-J. Büchner, „Nanomeßmaschinen zur abbefehlerfreien Koordinatenmessung," *Technisches Messen*, S. 319-323, 2000.

- [173] T. Hausotte, „Skalenübergreifende Koordinatenmesstechnik,“ in *Tagungsband DIN-TAGUNG T-334 - Koordinatenmesstechnik 2018 - Technologie und Anwendung*, 2018.
- [174] T. Hausotte, *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen – Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*, Technische Universität Ilmenau: Habilitationsschrift, Pro Business, 2011.
- [175] T. Hausotte, B. Perde und G. Jäger, „Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine,“ *Measurement Science and Technology*, S. 084004, 2009.
- [176] F. Carlo, F. Julian und B. Emmanuel, „Calibration of a white light interferometer for the measurement of micro-scale dimensions,“ *Advanced Manufacturing Technology*, S. 125-135, 2010.
- [177] C. Giusca und R. Leach, Good Practice Guide No. 127 Calibration of the metrological characteristics of Coherence Scanning Interferometers (CSI) and Phase Shifting Interferometers PSI, United Kingdom: National Physical Laboratory, 2013.
- [178] G. Maculotti, X. Feng, R. Su, M. Galetto und R. Leach, „Residual flatness and scale calibration for a point autofocus surface topography measuring instrument,“ *Measurement Science and Technology* 30, S. 075005, 2019.
- [179] „Katalog ZERODUR,“ SCHOTT, [Online]. Available: <https://pdf.directindustry.de/pdf/schott-glas/katalog-zerodur/22716-56789.html>. [Zugriff am 21.10.2021].
- [180] B. Deng, Y. Shi und F. Yuan, „Investigation on the structural origin of low thermal expansion coefficient of fused silica,“ *Materialia*, S. 100752, 2020.
- [181] DIN EN ISO 25178-604:2013-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 604: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Weißlicht-Interferometrie) (ISO 25178-604:2013).
- [182] DIN EN ISO 25178-2:2012-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012).

- [183] VDI/VDE 2655. Blatt 1.1/ Part 1.1, Optische Messtechnik an Mikrotopographien - Kalibrieren von Interferenzmikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung, 2008.
- [184] DIN EN ISO 5436-1:2000-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale - Teil 1: Maßverkörperungen (ISO 5436-1:2000).
- [185] *Certificate of Calibration, Areal Calibration Set NPL-BNT 020, National Physical Laboratory*, 2015.
- [186] DIN EN ISO 25178-70:2014-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 70: Maßverkörperungen (ISO 25178-70:2014).
- [187] L. C. Giusca, R. K. Leach und F. Helery, „Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 2. Amplification, linearity and squareness,“ *Measurement Science and Technology* 23, S. 065005, 2012.
- [188] B. Brinkmann, Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) - Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, Beuth, 2012.
- [189] P. L. Heydemann, „Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers,“ *Applied Optics Vol. 20, Issue 19*, S. 3382-3384, 1981.
- [190] *JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) 100: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 2008.
- [191] C. L. Giusca und I. M. Smith, „Areal Lateral Calibration Software: User Manual,“ Teddington, Middlesex, United Kingdom.
- [192] M. M. Elhabiby, Y. Gao und M. G. Sideris, „Comparison and Analysis of Non-Linear Least Squares Methods for 3-D Coordinates Transformation,“ *Survey Review*, 41, S. 26-43, 2009.
- [193] Y. Wu, Z. Sun und T. Hausotte, „Precise measurement of large scale surfaces with micro-topographies without overlapping fields of

- view by white light interferometry," *Laser Metrology and Machine Performance XII*, S. 144-153, 2017.
- [194] „Euramet,“ [Online]. Available: <https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/traceable-three-dimensional-nanometrology/>. [Zugriff am 20.01.2020].
- [195] N. Dorozhovets, T. Hausotte, N. Hofmann, E. Manske und G. Jäger, „Development of the interferometrical scanning probe microscope,“ *Proc. SPIE 6293, Interferometry XIII: Applications*, S. 629311, 2006.
- [196] T. Hausotte, H.-J. Büchner, E. Manske und G. Jäger, „Verfahren und Vorrichtung zur Messung der Translation und der Kippung einer Oberfläche“. Deutschland Patent DE102005056467A1, 06.06.2007.
- [197] G. F. Balzer, T. Hausotte, N. Dorozhovets, M. Manske und G. Jäger, „Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli,“ *Measurement Science and Technology*, S. 094018, 8.8.2011.
- [198] T. Hausotte, F.-G. Balzer, N. Vorbringer-Dorozhovets und E. Manske, „Surface and coordinate measurements with nanomeasuring machines,“ *International Journal of Nanomanufacturing*, S. 467-483, 2012.
- [199] SIOS Meßtechnik GmbH, *SM-05 Schwingungsmessmodul: Benutzerhandbuch*, 2008.
- [200] J. Kwon, S. Y. Kim und S.-i. Park, „Scanning probe microscope with improved probe head mount“. United States Patent US20040140426A1, 22.07.2004.
- [201] G. Roy, X. Cao, R. Bernier und S. Roy, „Enhanced scanning agility using a doublepair of Risley prisms,“ *Applied Optics Vol. 54, No. 34*, S. 10213-10226, 2015.
- [202] I. Rahneberg, Untersuchungen zu optischen Mehrkomponentenmesssystemen, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2013.
- [203] J. Hofmann, Taschenbuch der Messtechnik, Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2000.

- [204] A. Vera-Marquina, A. D. Sanchez, J. M. Rocha-Pérez, D. Berman-Mendoza und I. Padilla , „Quadrant photodiode for electronic processing,“ *Proc. SPIE 7419, Infrared Systems and Photoelectronic Technology IV*, S. 74190Z1-74190Z7, 2009.
- [205] L. C. Hale und A. H. Slocumb, „Optimal design techniques for kinematic couplings,“ *Precision Engineering, Volume 25, Issue 2*, S. 114-127, 2001.
- [206] G. Dai, W. Häßler-Grohne, D. Hüser, H. Wolff, H.-U. Danzebrink, L. Ludger Koenders und H. Bosse, „Development of a 3D-AFM for true 3D measurements of nanostructures,“ *Meas. Sci. Technol.* 22, S. 094009, 2011.
- [207] C. Su, K. L. Babcock und L. Huang, „Torsional resonance mode probe-based instrument and method“. United States Patent US6945099B1, 20 09 2005.
- [208] [Online]. Available: <https://www.nanosensors.com>. [Zugriff am 14 01 2019].
- [209] Q. Huang, Y. Fei, S. Gonda, I. Misumi, O. Sato, T. Keem und T. Kurosawa, „The interference effect in an optical beam deflection detection system of a dynamic mode AFM,“ *Meas. Sci. Technol. Vol.17*, S. 1417-1423, 2006.
- [210] C. . A. J. Putman, B. G. D. Grooth, V. Hulst und J. Greve, „A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic,“ *Journal of Applied Physics* 72, 6, S. 6-12, 1992.
- [211] DIAMOND GmbH, *Lichtwellenleiter Komponenten: Optische Schnittstelle*, Datenblatt.
- [212] M. E. Riley und M. A. Gusinow, „Laser beam divergence utilizing a lateral shearing interferometer,“ *Applied Optics, Vol. 16, Issue 10*, S. 2753-2756, 1977.
- [213] SIOS Meßtechnik GmbH, *Anwenderdokumentation zum Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor SP 120/500/2000*, 1999.
- [214] G. Ferri, P. De Laurentiis, A. D'Amico und C. Di Natale, „A low-voltage integrated CMOS analog lock-in amplifier prototype for

- LAPS applications,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 92, Issues 1-3, S. 263-272, 2001.
- [215] Zurich Instruments AG, *HF2 User Manual*, 2014.
- [216] T. Hausotte, „Design and Operation of the Nanomeasuring Machine, Part D - Probe System Integration,“ Ilmenau.
- [217] G. Jäger, „Lasernanomeßtechnik-Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungen in der modernen Gerätetechnik,“ 44. *International Scientific Colloquium*, 20-23 September 1999.
- [218] G. Bönsch und E. Potulski, „Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae,“ *metrologia*, S. 133-139, 1998.
- [219] R. S. Davis, „Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91),“ *metrologia*, S. 67-70, 1992.
- [220] A. C. Gröschl, J. Schaude und T. Hausotte, „Evaluation und Korrektur thermischer Driften eines hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten konfokalen Punktsensors,“ *Technisches Messen*, S. 117-121, 2019.
- [221] K.-D. Sommer und B. R. Siebert, „Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM,“ *Technisches Messen* 71, S. 52-66, 2004.
- [222] „TGS1,“ NT-MDT Co., 2019. [Online]. Available: <https://www.ntmdt-tips.com/products/view/tgs1>. [Zugriff am 25 03 2019].
- [223] DIN EN ISO 13528:2018-01, Entwurf-Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche (ISO 13528:2015).
- [224] G. Dai, F. Pohlenz, T. Dziomba, M. Xu, A. Diener, L. Koenders und H.-U. Danzebrink, „Accurate and traceable calibration of two-dimensional gratings,“ *Meas. Sci. Technol.* 18, S. 415-421, 2007.
- [225] J. Schaude, J. Albrecht, U. Klöpzig, A. C. Gröschl und T. Hausotte, „Atomic force microscope with an adjustable probe direction and piezoresistive cantilevers operated in tapping-mode,“ *Technisches Messen*, S. 12-16, 2019.

- [226] T. Hausotte, N. Vorbringer-Dorozhovets, J. C. Shen, E. Manske und G. Jäger, „Dimensional metrology in the macroscopic range with sub-nanometre resolution,“ *Journal of Engineering Manufacture* 227(5), S. 657-661, 2013.
- [227] G. Dai, L. Koenders, F. Pohlenz, T. Dziomba und H. U. Danzebrink, „Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings,“ *Measurement Science and Technology*, S. 1241-1249, 2005.
- [228] F. F. Farshad, T. C. Pesacreta, J. D. Garber und S. R. Bikki, „A Comparison of Surface Roughness of Pipes as Measured by Two Profilometers and Atomic Force Microscopy,“ *Scanning Vol. 23*, S. 241-248.
- [229] DIN EN ISO 4288:1998-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1996).
- [230] DIN EN ISO 11562:1998-09, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Meßtechnische Eigenschaften (ISO 11562:1996).
- [231] Y. Wang, X. Hu, L. Xu und X. Hu, „Improving the scanning speed of atomic force microscopy at the scanning range of several tens of micrometers,“ *Ultramicroscopy*, S. 102-107, 2012.
- [232] T. Ando, „High-speed atomic force microscopy coming of age,“ *Nanotechnology*, S. 062001, 2012.
- [233] N. Vorbringer-Dorozhovets, T. Hausotte, E. Manske, J. C. Shen und G. Jäger, „Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope,“ *Measurement Science and Technology*, 2011.
- [234] T. Machleidt, E. Sparrer, N. Dorozhovets, E. Manske, K.-H. Franke und D. Kapusi, „Navigation in a Large Measurement Volume by Using AFM Technology as a Sensor System in the NPMM,“ *Technisches Messen, Volume 76*, S. 274-277, 2009.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Y. Wu, Z. Sun, T. Hausotte: *Precise measurement of large scale surfaces with micro-topographies without overlapping fields of view by white light interferometry*. In: *Laser Metrology and Machine Performance XII* (2017), S. 144–153
- [P2] Y. Wu, E. Wirthmann, U. Klöpzig, T. Hausotte: *Investigation of a metrological atomic force microscope system with a combined cantilever position, bending and torsion detection system*. In: *Sensor and Measurement Science International 2020*, S. 191–192
- [P3] Y. Wu, E. Wirthmann, U. Klöpzig, T. Hausotte: *Development of a metrological atomic force microscope system with improved signal quality*. In: *Engineering Proceedings* (2021), Volume 6, Issue 1
- [P4] Y. Wu, E. Wirthmann, U. Klöpzig, T. Hausotte: *A metrological atomic force microscope system*. In: *Nano Express* (2021), Volume 2, 010035
- [P5] Y. Wu, E. Wirthmann, U. Klöpzig, T. Hausotte: *A metrological atomic force microscope for large range measurements with sub-nanometre resolution*. In: *Sensor and Measurement Science International 2021*, S. 61–62
- [P6] Y. Wu, E. Wirthmann, U. Klöpzig, T. Hausotte: *Investigation of a metrological atomic force microscope system with a combined cantilever position, bending and torsion detection system*. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* (2021), S. 171-177

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] Student, Qian Gao: *Kalibrierung und Ermittlung der messtechnischen Eigenschaften eines Weißlichtinterferometers mit Objektiven unterschiedlicher Vergrößerung in einem Nanopositionier- und Nanomesssystem*. Projektarbeit (2016), Erlangen
- [S2] Student, Qian Gao: *Entwicklung eines Rasterkraftmikroskopsystems mit interferometrischer Auswertung für Hochgeschwindigkeits-Mikrotopografiemessungen*. Masterarbeit (2017), Erlangen
- [S3] Studentin, Shupeng He: *Konzipierung und Konstruktion eines Krafterzeugungssystems für mikrotaktile 3-D-Taster*. Masterarbeit (2018), Erlangen
- [S4] Student, Fei Su: *Optische Kohärenztomografie zur Bestimmung von Porengeometrien in Glasbauteilen*. Masterarbeit (2019), Erlangen
- [S5] Studentin, Wenting Tang: *Recherche zu und Vergleich von großflächigen und schnellen Messungen mit Rasterkraftmikroskopen und Weißlichtinterferometern*. Projektarbeit (2019), Erlangen
- [S6] Student, Guan Xi: *Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften eines interferometrischen Rasterkraftmikroskops*. Masterarbeit (2020), Erlangen

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozeßkette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur
impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile – Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth
Regelung der Fokusslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und
Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissenschaftliche Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozessebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und der mechanischen
Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßler
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendandck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Lötten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsatzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahliefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüssler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozess-
simulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-
technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für
den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahr-
zeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösler
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebau-
teile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahliefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LFT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für
diskret ereignisorientierte Simulationen
in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großorientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeuoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskeletalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder.
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels
Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported Hybrid Compensation System for
Improving the Power Quality in Medium
Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger
Additive Fertigung polymerer optischer
Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der
virtuellen Realität mit natürlicher
Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer
Oberflächenmodifizierung und Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker
Qualifizierung laser-additiv gefertigter
Komponenten für den Einsatz im Werk-
zeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied
Totally Integrated Ecology Management
for Resource Efficient and Eco-Friendly
Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine
Analysestrategie zur Bestimmung des
Reibungs-, Axialschub- und Temperatur-
verhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.
2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann
Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechanische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel
Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen
Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider
Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering

KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpuls

LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design

KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems

LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit

LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik

LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen

FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle

LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Abstract

Micro- and nano measuring technology is driven by the continuous advances in manufacturing technology. The measurement tasks for micro- and nanomeasuring systems are characterized by continually decreasing structure sizes and miniaturization of the features with simultaneously increasing dimensions. Measuring instruments and technologies with high-resolution for quality assurance in the micro- and nanometer range require both quantitative, dimensional measurements with nanometer accuracy and measurements over large measuring ranges for the application of the nanotechnology in industry.

White light interferometry and atomic force microscopy are two important measuring methods in micro- and nano measuring technology. However, their measuring ranges are limited. It is very important that the measuring ranges are extended up to several millimeters in order to meet current metrological challenges. The present work shows the methods for large-area topography measurement with high structural resolution using white light interferometry and atomic force microscopy.

A white light interferometric microscope was integrated into the nanopositioning and nanomeasuring machine (NMM-1) for large-area topography measurements even without overlapping fields. The measurement setup, the measuring strategy, the characterization of the metrological properties, the correction of sensor tilts or rotation about the lateral axes and the vertical axis and an experimental investigation to verify the measurement strategy are presented.

A new metrological atomic force microscope for simultaneous measurement of bending, torsion and position of the cantilever with improved signal quality that was also integrated into the NMM-1 for large-area topography measurements is presented. The measurement setup, the measuring strategy, the characterization, the measurement uncertainty and applications of measurement such as step height measurement, pitch determination and large-area measurements are shown.

Die Mikro- und Nanomesstechnik wird vorangetrieben durch die stetigen Fortschritte der Fertigungstechnik. Die Messaufgaben für Mikro- und Nanomesssysteme sind geprägt von zunehmend sinkenden Strukturgrößen und Miniaturisierung der Merkmale bei zugleich zunehmender Dimensionalität. Hochauflösende Messinstrumente und Techniken zur Qualitätssicherung im Mikro- und Nanometerbereich erfordern sowohl quantitative, dimensionale Messungen mit Nanometergenauigkeit als auch Messungen über große Messbereiche, um die Nanotechnologie zu einer industriellen Nutzung zu führen.

Weißlichtinterferometrie und Rasterkraftmikroskopie sind zwei wichtige Messverfahren der Mikro- und Nanomesstechnik. Allerdings sind ihre Messbereiche begrenzt. Es ist von großer Bedeutung, dass die Messbereiche bis zu mehreren Millimetern erweitert werden, um die heutigen metrologischen Herausforderungen zu erfüllen. Die vorliegende Arbeit zeigt das Vorgehen für die großflächige Topografiemessung mit hoher Strukturauflösung mittels Weißlichtinterferometrie und Rasterkraftmikroskopie.

Ein Weißlichtinterferenzmikroskop wurde in die Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM-1) zur großflächigen Topografiemessung auch ohne Überlappungsfelder integriert. Der Messaufbau, die Einmessstrategie, die Charakterisierung der metrologischen Eigenschaften, die Korrektur von Kippungen bzw. Drehung des Sensors um die lateralen Achsen und die vertikale Achse und eine experimentelle Untersuchung zur Verifizierung der Messstrategie werden aufgezeigt.

Ein neues metrologisches Rasterkraftmikroskop für gleichzeitige Messung der Biegung, Torsion und Position des Cantilevers mit verbesserter Signalqualität, welches ebenfalls in die NMM-1 für großflächige Topografiemessungen integriert wurde, wird vorgestellt. Dabei werden der Messaufbau, die Einmessstrategie, die Charakterisierung, die Messunsicherheit und Applikationsmessungen wie Stufenhöhenmessung, Gitterabstandsbestimmung und großflächige Messungen gezeigt.

