

FAU Studien aus dem Maschinenbau 370

Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte
Konfokalsensoren für die
Nanokoordinatenmesstechnik

FAU
UNIVERSITY
P R E S S

Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die
Nanokoordinatenmesstechnik

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 370

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

Andreas Gröschl

**Hochfrequent fokusabstandsmodulierte
Konfokalsensoren für die
Nanokoordinatenmesstechnik**

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

Erlangen
FAU University Press
2021

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

Gröschl, Andreas. 2021. *Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 370. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-436-3

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: 978-3-96147-435-6 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-436-3 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-436-3

**Hochfrequent fokusabstandsmodulierte
Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Gröschl

aus Nürnberg

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

Tag der mündlichen
Prüfung: 25.03.2021

Vorsitzender des
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte
Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber des Lehrstuhls und Entwickler der in dieser Arbeit genutzten Nanomess- und Positioniermaschine, für die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske, Leiter des Fachbereichs Fertigungs- und Präzisionsmesstechnik des Instituts für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau, danke ich für die Unterstützung sowie die Übernahme des Koreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Inhaber des Lehrstuhls für Photonische Technologien der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauss, Professor für Optische Hochfrequenztechnik und Photonik am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls – meinen Kolleginnen und Kollegen – danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die sehr konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Janik Schauder für die Unterstützung bei der Integration des Sensors in die Nanomessmaschine, bei der Durchführung von Messungen, bei der Auswertung der Messergebnisse sowie bei der Optimierung der Hardwarebeschreibung in VHDL zur Signalverarbeitung.

Die Zuarbeiten der von mir betreuten Seminar-, Bachelor- und Masterarbeiten leisteten einen wertvollen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Besonderer Dank obliegt in diesem Zusammenhang Herrn Stephan Köhnen für die Unterstützung bei der Hardwarebeschreibung der Signalverarbeitung in VHDL, Herrn Benedikt Ressel für die Unterstützung bei der Konstruktion der Sensoraufnahme, Herrn Matthäus Wimmer für die Simulationen zur Kollimationsmodulation sowie Herrn Alexander Schönemann für den Beitrag zur Optimierung der Lock-in-Signalverarbeitung.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für ihr Verständnis und die Unterstützung im privaten Bereich während der gesamten Zeit. Besonders großer Dank gilt dabei meinen Eltern, die mir ermöglichten, diesen Weg zu beschreiten.

Nürnberg, im Mai 2021

Andreas Gröschl

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Positioniersysteme	3
2.2 Taktile Sensoren	5
2.2.1 Taktile Tastsysteme	5
2.2.2 Tastschnittverfahren	7
2.3 Rastersondenmikroskopie	9
2.3.1 Rastertunnelmikroskopie	9
2.3.2 Rasterkraftmikroskopie	11
2.4 Optische Sensoren	14
2.4.1 Fokusvariation	14
2.4.2 Laserfokussensor	15
2.4.3 Interferenzmikroskopie	17
2.4.4 Konfokalsensor	20
2.5 Akustisch modulierbare Gradientenoptiken	28
3 Fokusmodulierte Konfokalsensoren	31
3.1 Zielsetzung	31
3.2 Mess- und Umgebungsbedingungen	32
3.3 Wirkweise der axialen Nachführung	34
3.4 Optische Anordnung und Messprinzip	36
3.5 Technische Realisierung	41
3.6 Signalanalyse und -verarbeitung	45
3.6.1 Signalanalyse	45
3.6.2 Signalverarbeitung	57
3.7 Abweichungen der Kennlinie	74
3.7.1 Amplitudeneinfluss und thermische Driften	74
3.7.2 Störinterferenzen und Rauschen	76
3.7.3 Monte-Carlo-Simulation	78
3.8 Justierung	83
3.9 Constant distance scanning	93
3.10 Gittermessungen	101

3.11	Kollimationsmodulation	105
3.11.1	Signalentstehung Kollimationsmodulation	107
3.11.2	Piezobiegeschwinger	111
3.11.3	Tauchspulenschwinger	118
3.11.4	Amplitudenermittlung	120
4	Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	129

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A		Parameter zur Faserbeschreibung
A_I		Amplitude der Störinterferenz
A_K		Amplitude der Kollimationsmodulation
A_T		Amplitude der Brechkraftmodulation der TAG-Linse
A_F		Amplitude der Fokusmodulation
a_o	m	Radius des Objektivs
B	$N \cdot m^2$	Biegesteifigkeit
b		Zähler der Integrationsordnung
b_K	m	Bildweite der Kollimationslinse
b_O	m	Bildweite des Objektivs
b_T	m	Bildweite der TAG-Linse
c_i		imaginärer Anteil der kohärenten Transferfunktion
c_r		realer Anteil der kohärenten Transferfunktion
D_G	m^{-1}	Gesamtbrechkraft (TAG-Linse und Objektiv)
D_O	m^{-1}	Brechkraft des Objektivs
D_T	m^{-1}	Brechkraft der TAG-Linse
d_{KT}	m	Abstand zwischen Kollimationslinse und TAG-Linse
d_{TO}	m	Abstand zwischen TAG-Linse und Objektiv
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
f_K	m	Brennweite der Kollimationslinse
f_O	m	Brennweite des Objektivs
G	m	Gitterabstand
g_K	m	Gegenstandsweite der Kollimationslinse
g_O	m	Gegenstandsweite des Objektivs
g_T	m	Gegenstandsweite der TAG-Linse
h	m	Stufenhöhe

Symbol	Einheit	Beschreibung
h_P	m	Dicke der Piezoscheibe
h_S	m	Dicke der Messingscheibe
I		normierte Intensität
K		Kennlinie
k		Ordnung der Harmonischen
L		Ortsfrequenz
m	kg	Masse
N_{AWGN}		Rauschen
N_I		Störinterferenz
n		ganzzahliges Vielfaches
n_i		Brechzahl des Immersionsmediums
P		faserspezifischer Parameter
Q		Quotientensignal
R		Reflexionseigenschaft
r	m	Residuum
r_o	m	Modenradius
S		Verstärkungsfaktor
s		Standardabweichung
T	s	Periodendauer
t	s	Zeit
u		optische, axiale Koordinate
V	m ³	Volumen
V_A		Ausgangssignal
V_E		Eingangssignal
V_R		Referenzsignal
W	m	Spotgröße
w		Konstante der elektrischen Wandlung
z	m	Messobjekt-Fokus-Abstand
z_F	m	modulierte Fokusposition
z_{MO}	m	axiale Messobjektposition
z_O	m	axiale Position der Fokusebene des Objektiv

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	rad	halber Öffnungswinkel des Objektivs
ϑ	K	Temperatur
λ	m	Wellenlänge der Lichtquelle
ν_K	s ⁻¹	Frequenz der Kollimationsmodulation
ν_T	s ⁻¹	Grundfrequenz der TAG-Linse
ϕ_R	rad	Phase des Referenzsignals
ρ	m	Kernradius der Faser
ζ	m	axiale Verschiebung der Fokusebene des Objektivs

Abk.	Beschreibung
AFM	Rasterkraftmikroskopie (engl. <i>atomic force microscopy</i>)
CLSM	konfokale Laserscanningmikroskopie (engl. <i>confocal laser scanning microscopy</i>)
CTF	kohärente Transferfunktion (engl. <i>coherent transfer function</i>)
CWL	chromatisch-konfokale Mikroskopie (engl. <i>chromatic white light</i>)
DM	deformierbare Spiegel (engl. <i>deformable mirrors</i>)
DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Finite-Elemente-Methoden
FFT	schnelle Fourier-Transformation (engl. <i>fast Fourier transformation</i>)
FPGA	programmierbare (Logik-)Gatter-Anordnung (engl. <i>field programmable gate array</i>)
FWHM	Halbwertbreite (engl. <i>full width at half maximum</i>)
GRIN	Gradientenoptiken (engl. <i>gradient-index optics</i>)
KMS	Koordinatenmesssystem
LGDU	<i>laser diode grating units</i>
LCL	Flüssigkristalllinsen (engl. <i>liquid crystal lenses</i>)

Abk.	Beschreibung
LL	modulierbare flüssigkeitsgefüllte Linsen (engl. <i>liquid lenses</i>)
LPPM	Linienpaaren pro Millimeter
LUT	Umsetzungstabellen (engl. <i>lookup table</i>)
LWL	Lichtwellenleiter
NA	numerische Apertur
MA	Messabweichung
MTF	Modulationstransferfunktion
NCO	numerisch gesteuerten Oszillator (engl. <i>numerically controlled oscillator</i>)
NMM	Nanomess- und Positioniermaschine
OTF	optische Transferfunktion
PSI	phasenverschiebende interferometrische Mikroskopie
SLM	räumlicher Lichtmodulator (engl. <i>spatial light modulator</i>)
SNOM	Rasternahfeldmikroskopie (engl. <i>scanning nearfield optical microscopy</i>)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SPM	Rastersondenmikroskopie (engl. <i>scanning probe microscopy</i>)
STM	Rastertunnelmikroskopie (engl. <i>scanning tunneling microscopy</i>)
TAG	akustisch modulierbare Gradientenoptik (engl. <i>tuneable acoustic gradient lens</i>)
TSM	Tandem-Scanning-Mikroskop
WLI	Weißlichtinterferometrie

1 Einleitung

In einer Marktumgebung zunehmender Miniaturisierung und stetig wachsender Qualitätsansprüche liegt die Maxime häufig in der Reduktion zulässiger Fertigungstoleranzen. Insbesondere die Verifikation mikrostrukturierter und komplexer mikroskopischer Bauteile stellt dabei die Messtechnik vor gänzlich neue Herausforderungen. Weiterhin spielen Geschwindigkeit und damit Kosten der Messungen eine entscheidende Rolle. Die Forderung nach neuen Messsystemen, die diesen Aufgaben gewachsen sind, ist daher immens und die Schaffung innovativer Messverfahren von entsprechender Relevanz.

Mit speziellen Mikro- und Nanopositioniersystemen ist es seit einigen Jahren bereits möglich, hochgenaue, dreidimensionale Relativbewegungen zwischen Sensor und Messobjekt in Bereichen von einigen Millimetern und mit Auflösungen im Nano- oder Sub-Nanometerbereich zu realisieren [1–3]. Der Bedarf an hochgenauen und schnellen Sensoren zur Antastung der Messobjekte, die solchen herausfordernden Messaufgaben gewachsen sind, scheint jedoch nicht gedeckt und erst die Kombination eines Positionier- und Messkopfsystems ergibt letztlich ein Koordinatenmesssystem (Abk. KMS) [4].

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung und Untersuchung eines rückwirkungsfreien Sensors, der den Anforderungen der Oberflächenmesstechnik und der Nutzung als Antastsystem in einem Nanopositionier- und Messgerät gerecht wird.

Ein seit den 1960er Jahren bewährtes optisches Verfahren stellt die Konfokalmikroskopie dar [5]. Durch die Kombination einer konfokal angeordneten Beleuchtungs- und Detektionsblende wird das von einer Oberfläche reflektierte Licht nur detektiert, wenn sich diese im Fokus befindet. Dadurch wird eine sehr gute Tiefendiskriminierung, respektive eine hohe axiale Auflösung ermöglicht. Um mit einem solchen eindimensionalen Punktsensor eine Topografie des zu messenden Objektes zu erhalten, muss dieses sowohl axial als auch lateral abgetastet werden. In konventionellen Systemen werden dabei häufig lateral flächenhafte Abtastungen auf diskreten axialen Höhen durchgeführt, wobei dann für jeden lateralen Messpunkt die axiale Position der maximal detektierten Intensität bestimmt wird. Im Gegensatz dazu sind auch Verfahren bekannt, bei denen ein axialer Messbereich zur Verfügung steht, welcher zur aktiven Regelung der z-Position durch ein Positioniersystem bei einer lateralen Abtastung genutzt werden kann. Neben der chromatisch konfokalen Mikroskopie sind in Kapitel 2.4.4 verschiedenen Beispiele solcher Verfahren beschrieben.

Durch die Kombination einer akustisch getriebenen Gradientenindex-Flüssigkeitslinse (TAG-Linse) [6] sowie verschiedenen Varianten zur Modulation der axialen Position der Kollimationslinse mit Piezobiegeaktuatoren und

Tauchspulenantrieben und einer Signalverarbeitung auf Basis einer Lock-in-Verstärkung wurden konfokale Systeme geschaffen, bei denen alle bekannten Vorteile der Konfokaltechnik beibehalten werden und gleichzeitig eine approximativ lineare und von den Oberflächeneigenschaften und der Neigung des Messobjektes unabhängige Kennlinie für eine axiale Nachführung durch das Positioniersystem bereitgestellt wird [P1–P7, S1–S4]. Die theoretischen Grundlagen der Signalentstehung und -verarbeitung, die technischen Realisierungen sowie die Validierung durch Messungen in Kombination mit einem Nanokoordinatenmessgerät sind Gegenstand dieser Arbeit und werden im Folgenden dargestellt.

2 Stand der Forschung

Um die speziellen Anforderungen der Mikro- und Nanokoordinatenmesstechnik an Positionier- und Tastsysteme zu verdeutlichen, werden im Folgenden verschiedene bekannte technische Realisierungen betrachtet. Zunächst werden in Kapitel 2.1 verschiedene Nanopositioniersysteme sowie insbesondere, die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1 [1–3] vorgestellt. Dem folgt eine Darstellung verschiedener Tastsysteme in den Kapiteln 2.2–2.4.

Es werden zunächst taktile Tastsysteme der konventionellen Koordinatenmesstechnik sowie daraus abgeleitet, miniaturisierte Varianten für die Mikro- und Nanokoordinatenmesstechnik in Kapitel 2.2.1 betrachtet. Dem folgt eine Darstellung von Tastschnittverfahren zur Oberflächenmessung in Kapitel 2.2.2. Anschließend wird in Kapitel 2.3 auf Verfahren der Rastersondenmikroskopie eingegangen, gefolgt von den gängigen optischen Verfahren in Kapitel 2.4 sowie insbesondere konfokalen Systemen in Kapitel 2.4.4.

Ein weiterer Überblick bekannter Mikro- und Nanokoordinatenmesssysteme ist beispielsweise in [1] sowie für Tastsysteme für die Nanokoordinatenmesstechnik summarisch in [7–10] zu finden.

2.1 Positioniersysteme

Im Gegensatz zu konventionellen Koordinatenmesssystemen muss bei Nanokoordinatenmesssystemen in besonderem Maß auf die Antriebs-, Führungs- und Längenmesssysteme, den metrologischen Rahmen sowie die Messumgebung und die Umgebungsbedingungen geachtet werden. Bezüglich der Anordnung der Längenmesssysteme formulierte Ernst Abbe bereits 1890 das nach ihm benannte Abbe'sche Komparatorprinzip wie folgt: *„Der Messapparat ist stets so anzuordnen, dass die zu messende Strecke die geradlinige Fortsetzung der als Maasstab dienenden Theilung bildet“* [11]. Ein Vorschlag für die Realisierung des Komparatorprinzips für mehrere Messachsen wurde erstmals 1979 von James Bryan formuliert [12]. Unter den bekannten Nanokoordinatenmesssystemen, welche die genannten Anforderungen und insbesondere die Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzip in allen drei Raumachsen erfüllt, sind insbesondere die Systeme der „Molecular Measuring Machine“ [13], der „Sub-atomic Measuring Machine“ [14], der „Ultraprecision CMM Isara 400“ [15] sowie der „Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM-1)“ [1] und deren Weiterentwicklung mit vergrößertem Messbereich NPMM-200 [16] zu nennen.

Das Koordinatenmesssystem NMM-1 dient auch als Basis für die Untersu-

chungen des im Rahmen der Promotion entwickelten Sensors. Das von Abbe geforderte Kriterium wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, durch die Kombination einer quaderförmigen Spiegelecke (1) und drei orthogonal auf diese ausgerichtete Laserinterferometer (2-4) realisiert, wobei die Messachsen der Interferometer so angeordnet sind, dass diese einen gemeinsamen Schnittpunkt (8) besitzen, im Folgenden auch als Abbe-Punkt bezeichnet. Der Sensor wird dabei so positioniert, dass die Antastung in eben diesem Punkt erfolgt. Zusätzlich wird in der NMM-1 die Neigung der Spiegelecke durch zwei Winkelsensoren (5 u. 6) kontinuierlich gemessen und aktiv geregelt. Der metrologische Rahmen (7) der NMM besteht aus Zerodur [17], einer Glaskeramik mit besonders niedrigem Ausdehnungskoeffizient, sodass thermisch bedingte Messabweichungen minimiert werden. [vgl. 1]

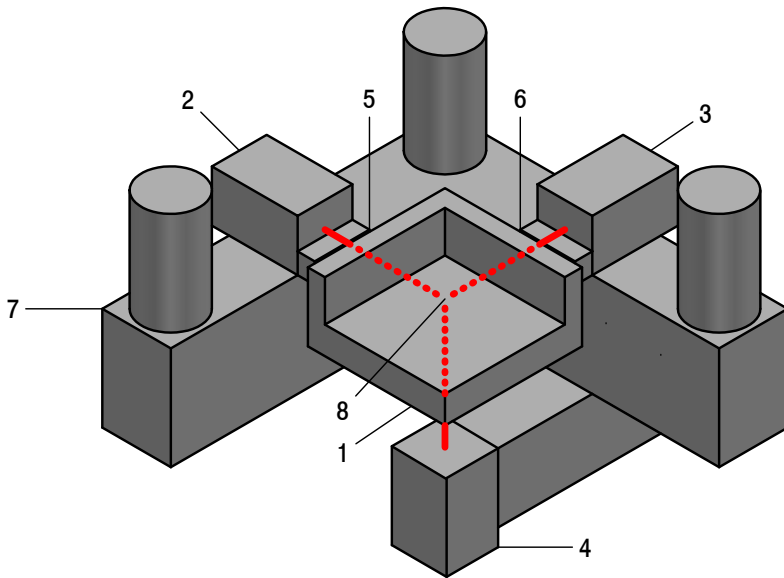


Bild 1: Schematische Darstellung der Nanopositionier- und Nanomessmaschine mit: 1. Spiegelecke; 2. y -Interferometer; 3. x -Interferometer; 4. z -Interferometer; 5. Winkelsensor; Autokollimator zur Erfassung der Neigung um die x -Achse; 6. Winkelsensor, Autokollimator zur Erfassung der Neigung um die y -Achse; 7. metrologischer Rahmen und 8. Schnittpunkt der Messachsen der Interferometer. [in Anlehnung an 1]

2.2 Taktile Sensoren

Taktile Sensoren basieren auf der Erfassung eines mechanischen Kontaktes mit definierter Kraft und Geometrie eines Tastelements mit der zu messenden Oberfläche. Neben Tastsystemen für konventionelle Koordinatenmessgeräte mit vergleichsweise großen Messbereichen und Tastelementen sind wie im Folgenden gezeigt einige Systeme bekannt, die den Anforderungen der Mikro- und Nanomesstechnik gerecht werden [7, 8, 16, 18–27].

2.2.1 Taktile Tastsysteme

In der konventionellen Koordinatenmesstechnik und insbesondere bei großen Koordinatenmesssystemen werden häufig wie in Abbildung 2 gezeigte taktile Tastsysteme verwendet.

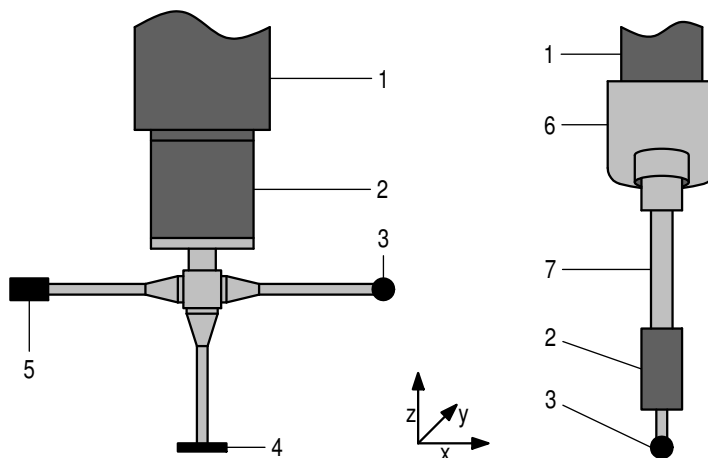


Bild 2: Typische taktile Tastsysteme in der konventionellen Koordinatenmesstechnik mit: links: Pinole mit starrem Tastsystem mit zentralem Taster und in $+x$ und $-x$ auskragenden Tastern sowie unterschiedlichen Tastelementen (3-5) sowie rechts: Pinole mit Dreh-Schwenk-Einrichtung mit: 1. Pinole; 2. Messkopf; 3. kugelförmiges Tastelement; 4. scheibenförmiges Tastelement; 5. zylinderförmiges Tastelement; 6. Halterung für Dreh-Schwenk-Messkopf und 7. Messkopfverlängerung [in Anlehnung an 28].

Im Einzelnen detektiert ein, an einer Pinole (1) oder einer anderen Tastsystemaufnahme (z -Achse des KMS) befindlicher Messkopf (2) einen mechanischen Kontakt eines Tastelements (3-5) mit dem Werkstück. Bei den Messköpfen sind generell schaltende und messende sowie passive und aktive zu unterscheiden. Schaltende detektieren lediglich eine Antastung, womit nur einzelne Punkte aufgenommen werden können. Messende hingegen detektieren zusätzlich den Betrag sowie teilweise die Richtung der Auslenkung, womit

eine scannende Messung, d. h. ein kontinuierliches Führen des Tastelementes entlang einer Kurve auf der zu messenden Oberfläche möglich ist. [29]

Das Tastsystem kann wie in Abbildung 2 links dargestellt, aus einem starren System mit ein oder mehreren Tastelementen bestehen oder es befindet sich ein Tastelement an einer Dreh-Schwenk-Einrichtung, um so die Antastung aus unterschiedlichen Richtungen zu ermöglichen (s. Abbildung 2 rechts) [28]. Die Tastelemente sind meist kugel-, zylinder- oder scheibenförmig ausgeführt und besitzen bei konventionellen Tastsystemen geometrische Abmessungen im Millimeter- und Submillimeterbereich [4]. Insbesondere bei der Verwendung von kugelförmigen Tastelementen besteht ein großer Vorteil darin, dass eine dreidimensionale Antastung ermöglicht wird. Generell muss für eine Antastung eine definierte und möglichst genau bestimmbare Antastkraft aufgebracht werden, die bei konventionellen Systemen im 2- oder 3-stelligen Millinewtonbereich liegt. Unter anderem kann aufgrund der Trägheit des Tastsystems bei bewegtem Tastsystem die Antastkraft nicht beliebig reduziert werden. Zwar sind Verfahren bekannt, mit denen die Antastkraft durch Variation auf null extrapoliert werden kann, jedoch verbleiben hierbei erfahrungsgemäß unter anderem aufgrund Nichtlinearitäten stets unbekannt systematische und/oder zufällige Messabweichungen. Weiterhin erfolgt in Abhängigkeit der Geometrie des verwendeten Tastelementes eine Überlagerung der Tastelementform mit der zu erfassenden Oberfläche, welche auch als morphologische Filterung bezeichnet wird. Diese kann bei bekannter Tastelementgeometrie im Vergleich zu optischen Verfahren jedoch relativ einfach, beispielsweise nach [30] bestimmt werden, da sich diese direkt aus der Tastergeometrie ergibt. Zur Veranschaulichung ist eine solche Filterung in Abbildung 3 für zwei beispielhafte Tastelemente mit unterschiedlichen Radien (r_1 und r_2) illustriert.

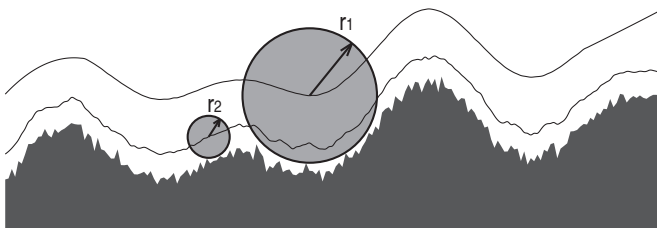


Bild 3: Morphologische Filterung durch die Geometrie des verwendeten Tastelements mit: r_1 und r_2 Radien der Tasterkugeln. [in Anlehnung an 31]

Neben den genannten konventionellen Tastsystemen sind miniaturisierte Mikrotastsysteme bekannt. Nach der Theorie von Hertz [32] ist aufgrund

des überproportionalen Anstiegs der Flächenpressung bei Verringerung der Tastelementdurchmesser jedoch keine lineare Reduktion der Antastkraft möglich [33]. Daher sind gänzlich neue Kinematiken sowie Kraft- und Wegsensoren erforderlich. Ein weiteres Problem stellt der zunehmende Einfluss von Oberflächenkräften bei der Antastung dar [34, 35].

Es sind jedoch einige miniaturisierte taktile Tastsysteme bekannt, welche den genannten Anforderungen der Mikro- und Nanokoordinatenmesstechnik gerecht werden. Ein in diesem Zusammenhang zu nennendes Tastsystem weist einen speziellen Messkopf auf, der die axiale Auslenkung interferometrisch erfasst und die Verkipfung mithilfe des gleichen Laserstrahls über eine Vier-Quadranten-Diode detektiert [16, 18].

Weiterhin ist ein mikrotaktiler Tastsystem mit optischer Detektion durch *Laser Diode Grating Units* (Abk. LGDU) bekannt [36], welche auch bei der Abtastung von CD's eingesetzt werden. Durch die Verwendung solcher integrierter Bauelemente ist hierbei eine sehr kompakte Bauweise möglich [19, 20].

Ferner gibt es mikrotaktile Tastsysteme mit interferometrischer Erfassung der Auslenkung und einer speziellen Tripodaufhängung des Tastsystems, mit dem Antastkräfte von 0, 1 mN möglich sind [23], sowie dessen Weiterentwicklungen [22] mit piezoelektrischer Auslenkungsmessung und hochfrequent oszillierendem Taster, bei denen die Amplitudendämpfung der Schwingung bei Annäherung an die Oberfläche als Antastsignal detektiert wird. Weiterhin wurde ein piezoresistives, mikrotaktiler Tastsystem vorgestellt, bei dem durch eine gestapelte Anordnung zweier Membranen die Anisotropie der Steifigkeit zwischen axialer und lateraler Auslenkung weitgehend eliminiert werden kann [21]. Dies wurde auch in einem weiteren Tastsystem mit Siliziummembranen und integrierter piezoresistiver Detektion umgesetzt [24]. Ein anderes Tastsystem basiert auf einer speziellen Kinematik mit Festkörpergelenken [25], dessen Weiterentwicklungen [26] Antastkräfte von unter 0,5 mN ermöglichen.

Auch sind optotaktile Tastsysteme bekannt, bei denen optische Fasern mit sehr kleinen Tastelementdurchmessern ($<50 \mu\text{m}$) beleuchtet werden und die Auslenkung über eine separate Optik mit Bildsensor erfasst wird [27]. Ein Überblick mikrotaktile Tastsysteme ist beispielsweise in [7–9] zu finden. Die Limitierung der Antastunsicherheit aller genannten Systemen stellen derzeit neben der Unsicherheit der Geometrie der Antastelemente die Rückführung und exakte Bestimmung der Antastkräfte dar [7].

2.2.2 Tastschnittverfahren

Beim Tastschnittverfahren wird eine Tastnadel mit einer Diamantspitze senkrecht zur größten zu erwartenden Rauheit mit konstanter Geschwindigkeit

über die zu prüfende Oberfläche geführt. Die Auslenkung der Tastnadel, die sich infolge der Oberflächengestalt des Messobjektes und der Vorschubbewegung ergibt, wird von einem Messumformer in ein elektrisches Signal umgewandelt und mit einem Messverstärker verstärkt. Die morphologische Filterung ergibt sich auch hier aus der Tastergeometrie, d. h. dem Taster Spitzenradius r und dem Tastkegelwinkel γ (s. Abb. 4). [37]

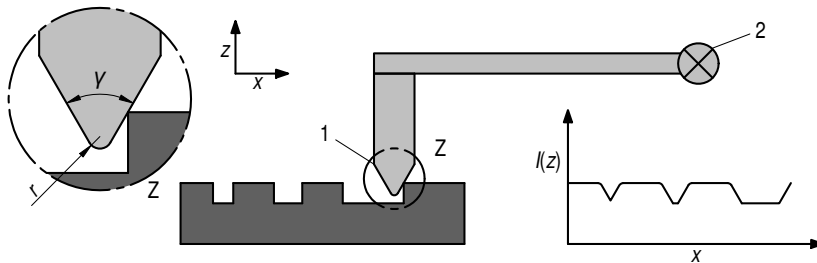


Bild 4: links: Typischer Aufbau eines Tasters mit: 1. Tastspitze; 2. Drehachse; γ Kegelwinkel der Tastspitze; r Radius der Tastspitze sowie rechts: Detektiertes Signal $I(z)$ als Funktion der Auslenkung z über eine laterale Abtastung in x -Richtung [in Anlehnung an 28].

Aufgrund unterschiedlicher Einflüsse durch Tastspitzengeometrien, dynamischer Eigenschaften der Tastersysteme sowie Digitalisierungsverfahren unterschiedlicher Geräte werden nach [38] vom gemessenen Signal $I(z)$ zunächst durch ein lineares λ_s -Profilfilter (Gauß-Tiefpassfilter) gemäß [39] kürzere Wellenlängen heraus gefiltert, die nicht der Rauheit zuzuordnen sind. Weiterhin werden durch ein λ_c -Profilfilter (Hochpassfilter) die Rauheiten von den Welligkeiten sowie gegebenenfalls durch ein weiteres λ_f -Profilfilter, Welligkeiten von Formabweichungen getrennt [40]. Um aus dem so erzeugten Primärprofil gängige Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit, wie beispielsweise der größten Höhendifferenz des Profils Rz , dem arithmetischen Mittelwert der Profildordinaten Ra oder der mittleren Rillenbreite der Profilelemente RSm abzuleiten [38], müssen weiterhin die Längen der Gesamt- und Einzelmessstrecken nach [41] beachtet werden. Aufgrund der eindeutigen Normung und daher der guten Vergleichbarkeit werden Tastschnittmessungen häufig als Referenz für den Vergleich mit anderen Messverfahren herangezogen. Jedoch sind flächenhafte Messungen nur durch Aneinanderreihen einzelner Tastschnitte möglich und aufgrund langsamer Vorschubbewegungen sehr zeitaufwendig. Weiterhin ist die laterale Auflösung durch die mechanische Filterung aufgrund der Tastergeometrie limitiert (s. Abb. 4). Da es sich beim Tastschnittverfahren um ein taktiles und damit nicht rückwirkungsfreies

Verfahren handelt, besteht zudem die Gefahr der Beschädigung der zu messenden Oberfläche (insbesondere bei weichen Werkstoffen wie Kunststoffen) sowie der Tastnadel selbst bei zu steilen Flanken auf der Messfläche. Andererseits ist das Verfahren robust gegenüber leichten Verschmutzungen wie Staub, der von der Tastnadel gegebenenfalls weggeschoben wird.

Konventionelle Tastsysteme, wie in Abbildung 4 skizziert, wurden bereits erfolgreich in Nanopositioniersystemen eingesetzt [42]. Weiterhin ist ein spezielles Tastschnittsystem in Kombination mit Nanopositioniersystemen bekannt, bei welchem die Tastspitze durch eine spielfreie, axiale Membranaufhängung geführt und die Auslenkung über einen Laserfokussensor (s. a. Kap. 2.4.2) detektiert wird [43].

2.3 Rastersondenmikroskopie

Unter Rastersondenmikroskopie (engl. *scanning probe microscopy*, Abk. SPM) wird eine Gruppe mikroskopischer Techniken verstanden, bei denen verschiedene Wechselwirkungen einer mikroskopischen Sonde mit der zu messenden Oberfläche detektiert werden [44]. Für die Nanokoordinatentechnik sind dabei insbesondere die Verfahren der Rastertunnelmikroskopie (engl. *scanning tunneling microscopy*, Abk. STM) [45–47] sowie die Rasterkraftmikroskopie (engl. *atomic force microscopy*, Abk. AFM) [48] relevant und werden in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 diskutiert. Weitere bekannte Rastersondenverfahren sind beispielsweise die optische Rasternahfeldmikroskopie (engl. *scanning nearfield optical microscopy*, Abk. SNOM) [49, 50] sowie die Magnetkraftmikroskopie (engl. *magnetic force microscopy*, Abk. MFM) [51, 52].

2.3.1 Rastertunnelmikroskopie

Wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt, wird bei der Rastertunnelmikroskopie eine spitze, elektrisch leitende Sonde (2) sehr nahe (ca. 1 nm) an die zu messende, ebenfalls elektrisch leitende Oberfläche (3) herangeführt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen dem Messobjekt (3) und der Sonde (2) fließt dabei aufgrund des quantenmechanischen Tunneleffektes ein sehr kleiner Tunnelstrom I_T (typ. 1 pA - 1 nA), der durch einen Transimpedanzwandler (4) in ein proportionales Spannungssignal U_T umgewandelt und durch eine Signalverstärkung messbar wird. Die Größe der angelegten Spannung kann von wenigen Millivolt bis ca. 100 Volt betragen. Die untere Grenze stellt die Temperatur bzw. das thermischen Rauschen dar und bei hohen Spannungen über 100 V kann Feldemissionsstrom auftreten. [45–47, 53, 54]

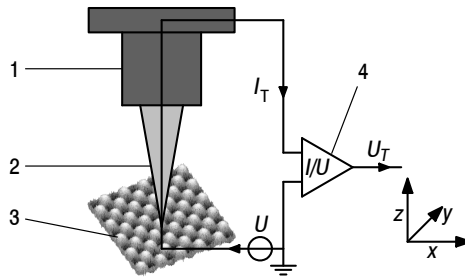


Bild 5: Typischer Aufbau eines Tunnelstrom-Sensors mit: 1. Piezopositionierer; 2. Messspitze; 3. elektrisch leitfähiges Messobjekt; 4. Transimpedanzwandler; Tunnelstrom I_T ; Spannungssignal U_T und Vorspannung U [in Anlehnung an 54, 55].

Indem der Strom zwischen der Sonde (2) und der zu messenden Oberfläche (3) durch eine Abstandsregelung mithilfe eines hochdynamischen Piezopositionierers (1) konstant gehalten wird, kann durch eine gleichzeitige laterale Abtastung ein dreidimensionales Abbild der elektrischen Wechselwirkung erzeugt werden [45–47, 53]. Da dieser Abstand in einem sehr kleinen Bereich konstant gehalten werden muss (ca. 0,5 nm – 1 nm), scheint das Verfahren für den Einsatz in Nanokoordinatensystemen ungeeignet.

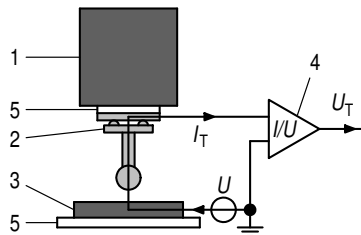


Bild 6: Aufbau des 3D-Tunnelstromsensors mit: 1. 3D-Piezopositionierer; 2. tauschbarem Taster; 3. elektrisch leitfähigem Messobjekt; 4. Transimpedanzwandler; 5. Isolator; Tunnelstrom I_T ; Spannungssignal U_T und Vorspannung U [nach 55].

Ein für eine NMM geeignete Applikation wurde jedoch in [56–58] (s. Abb. 6) gezeigt, indem anstatt einer dünnen Spitze eine Kugel verwendet wurde, wodurch aufgrund der Vergrößerung der effektiven Wechselwirkungsfläche und unter Luftatmosphäre durch den barrieresenkenden Schottky-Effekt, Ströme bei wesentlich größeren Abständen gemessen werden können (10 – 400 nm). Um eine dreidimensionale Antastung zu ermöglichen, wurde das System weiterhin um eine dynamische Sensornachführung [31] sowie eine

Schwingungsanregung zur Ermittlung des Antastvektors erweitert [55]. Nachteilig bei den genannten Verfahren ist, dass das Messobjekt stets elektrisch leitfähig sein muss. Bei dem in Abbildung 6 gezeigten Verfahren ist weiterhin nicht bekannt, inwieweit der Radius und die Geometrie der verwendeten Tastkugel zu einer morphologischen Filterung führt.

2.3.2 Rasterkraftmikroskopie

Ein Rasterkraftsensor ähnelt prinzipiell dem in Kapitel 2.2.2 gezeigten Tastschnittverfahren, wobei neben einem kontaktierenden Modus auch eine kontaktlose und damit rückwirkungsfreie Abtastung möglich ist [48].

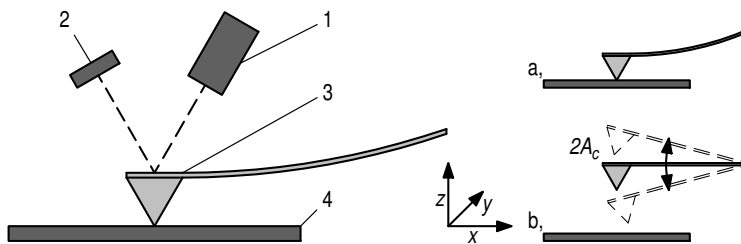


Bild 7: Typischer Aufbau eines Rasterkraft-Sensors mit: 1. Laserquelle; 2. Vier-Quadranten-Diode; 3. Cantilever mit Tastspitze; 4. Messobjekt; a, Kontaktmodus; b, kontaktloser Modus oder intermittierender Modus sowie Amplitude der Schwingungsanregung A_c [in Anlehnung an 59].

Generell befindet sich bei einem AFM eine sehr feine Spitze (typische, effektive Spitzenradien 4 nm-30 nm [60]) an einem Balken, dem sogenannten Cantilever (3). Die Wechselwirkung der Spitze mit der Oberfläche kann dabei beispielsweise wie in Abbildung 7 links gezeigt, über die Winkeländerung eines auf der Oberseite des Cantilevers fokussierten und auf eine Vierquadrantendiode (2) reflektierten Laserstrahls detektiert werden. Neben dem kontaktierenden Modus (s. Abb. 7; rechts: a), bei dem die Spitze wie bei Tastschnittverfahren über die Oberfläche gezogen wird, gibt es die beiden Modi der intermittierenden und kontaktlosen Messung (s. Abb. 7; rechts: b). Bei beiden wird der Cantilever zur Schwingung mit einer Amplitude A_c angeregt. Im intermittierenden Modus wird jedoch meist eine höhere Schwingungsamplitude verwendet und der Cantilever so weit an die Oberfläche herangeführt bis er diese antippt (engl. *tapping mode*), wodurch die Amplitude der Schwingung gedämpft wird. Die Dämpfung dient dabei als Maß für den mittleren Abstand des Cantilevers zum Messobjekt. Die Anregung erfolgt meist bei einer festen Frequenz nahe der Resonanzfrequenz des Cantilevers.

Im Gegensatz dazu wird im kontaktlosen Modus der Cantilever meist knapp oberhalb der Resonanzfrequenz angeregt. Bei Annäherung an die Oberfläche führen anziehende Oberflächenkräfte wie Van-der-Waals-Kräfte zu einer Frequenzänderung. Da diese Oberflächenkräfte nur wenige Nanometer reichen, muss die Amplitude ebenfalls in diesem Bereich liegen. Mithilfe einer Regelung kann somit der Abstand konstant gehalten werden. [vgl. 59]

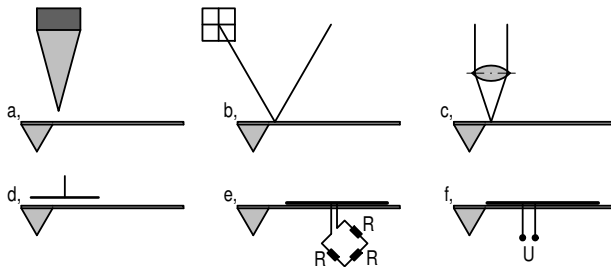


Bild 8: Rasterkraft-Sensoren mit unterschiedlichen Detektionsverfahren der Auslenkung des Cantilevers: a, mit STM; b, mit Vier-Quadranten-Diode; c, interferometrisch oder konfokal; d, kapazitiv; e, piezoresistiv bzw. mit DMS und f, piezoelektrisch [nach 61].

Die Erfassung der Cantilerverauslenkung kann neben der in Abbildung 7 links gezeigten Methode, wie in Abbildung 8 dargestellt, durch Kombination mit einem STM, interferometrisch, konfokal, kapazitiv, piezoresistiv, mit Dehnmessstreifen (Abk. DMS) oder piezoelektrisch erfolgen. Ist die Sensorik für die Detektion der Auslenkung des Cantilevers direkt auf diesem appliziert wird dieser auch als selbstsensierend (engl. *self-sensing*) bezeichnet und als selbstanregend (engl. *self-actuating*), wenn sich auf dem Cantilever ein Aktuator zur Schwingungsanregung befindet, wobei es auch Cantilever gibt, die beides beherrschen [s. bspw. 62]. Piezoresistive Cantilever haben den großen Vorteil, dass diese wesentlich kompakter sind und keine optische Zugänglichkeit in axialer Richtung notwendig ist, womit diese nicht durch lichtempfindliche und lichtundurchlässige Umgebungen eingeschränkt werden. Jedoch war die Auflösung aufgrund des schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses (Abk. SNR) gegenüber optischen Verfahren lange Zeit im Nachteil. Dieser konnte jedoch durch eine Miniaturisierung und damit Verringerung des SNR behoben werden. [63]

Weiterhin ist ein spezielles Verfahren mit konfokaler Erfassung der Cantilerverauslenkung sowie einer speziellen Anordnung aus zwei axial zueinander versetzten Konfokalblenden bekannt, wobei durch Differenzbildung der beiden Signale die Richtung der Auslenkung bestimmt werden kann [64]. Die Rasterkraftmikroskopie ist derzeit das Referenzverfahren in der Oberflächenmesstechnik hinsichtlich der lateralen Auflösung. Aufgrund der sehr kleinen

Tastspitzradien kann eine sehr hohe Strukturauflösung erreicht werden. Im Zusammenhang mit Nanokoordinatenmessgeräten ist insbesondere ein AFM zu nennen, bei dem die axiale Auslenkung interferometrisch und die Torsion und Biegung des Sensors mit dem gleichen Beleuchtungsstrahl deflektometrisch mit einer Vier-Quadranten-Diode erfasst wird [65, 66]. Dies stellt damit eine innovative Kombination der in Abbildung 8 dargestellten Varianten b und c dar. Weiterhin wurde ein AFM mit vergrößertem axialen Messbereich mit einer NMM-1 genutzt [67, 68] sowie ein selbstsensierender Rasterkraftsensor mit großem axialen Messbereich durch die Kombination mit einem zusätzlichen Piezo und einem Festkörpergelenk entwickelt, der neben der Schwingungsanregung des Cantilevers eine schnelle Abstandsregelung ermöglicht. Durch zwei gestapelt angeordneter Rotationsachsen ist zudem eine Anpassung der Antastrichtung auf einer kompletten Hemisphäre möglich (vgl. Abb. 9) [P8].

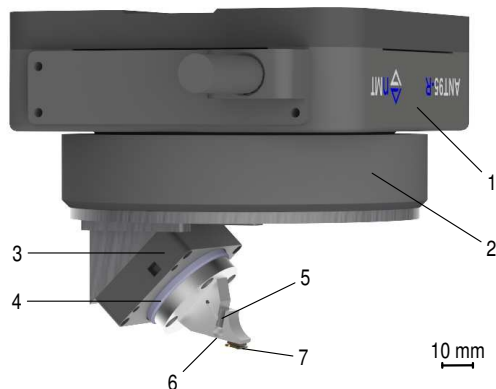


Bild 9: Rasterkraftsensor mit variabler Antastrichtung mit: 1. festende Sensoraufnahme; 2. beweglicher Teil der Rotationsachse um z-Achse; 3. Aufnahme der zweiten Rotationsachse; 4. beweglicher Teil der zweiten Rotationsachse; 5. Piezokeramik; 6. Festkörpergelenk und 7. selbstsensierender Cantilever [nach P8].

Ein solches System ist damit ideal geeignet mikrotaktile Tastelemente zu charakterisieren (s. a. Kap. 2.2.1). Ein Überblick der historischen Entwicklung und gängiger AFM-Applikationen ist beispielsweise in [69] zu finden.

2.4 Optische Sensoren

2.4.1 Fokusvariation

Die Fokusvariation stellt eine Methode zur flächenhaften Messung der Oberflächentopographie dar, bei der die Schärfe des Bildes der Oberfläche in einem optischen Mikroskop dazu verwendet wird, die Höhe des Messobjektes zu ermitteln [vgl. 70, 71].

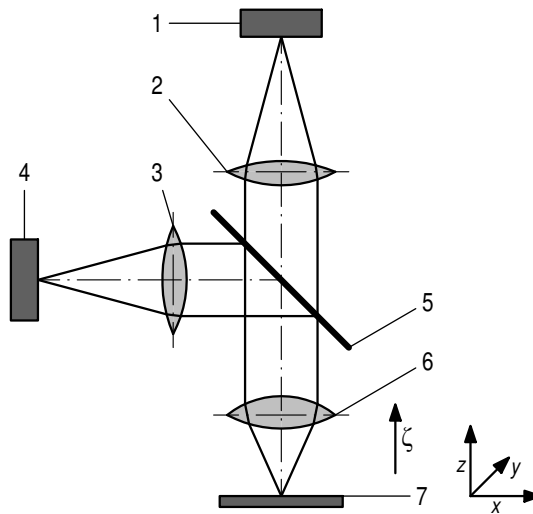


Bild 10: Typischer Aufbau eines Mikroskops zur Fokusvariation mit: 1. Detektor; 2. Tubuslinse; 3. Kondensatorlinse; 4. Lichtquelle; 5. Strahlteiler; 6. Objektiv und 7. Messobjekt mit Messfläche [in Anlehnung an 70].

Typischerweise wird für die Fokusvariation die in Abbildung 10 gezeigte Mikroskopanordnung verwendet, indem Licht einer Weißlichtquelle (4) koaxial über einen Strahlteiler (5) auf die Oberfläche (7) projiziert und mithilfe eines Sensors (1) detektiert wird. Statt der hier gezeigten einfachen kritischen Beleuchtung kann auch eine wie in Abbildung 12 skizzierte Köhler'sche Beleuchtung genutzt werden. In Abhängigkeit der Topografie und Reflexionseigenschaften der zu messenden Oberfläche wird das Licht diffus gestreut oder reflektiert. Daher können weiterhin auch zusätzliche polarisierende Elemente oder separate, beispielsweise ringförmige Beleuchtungen implementiert werden. Zur Ermittlung der Topografie wird die Oberfläche durch vertikale Verschiebung des Messobjektes oder des Objektivs (bei Verwendung auf unendlich korrigierter Mikroskopobjektive) in axialer Richtung abgetastet, wobei aufgrund der geringen Fokustiefe des optischen Systems

nur ein kleiner axialer Bereich scharf dargestellt wird. Mit geeigneten Bildverarbeitungsalgorithmen kann dieser scharfe Bereich bestimmt werden, um die Höhe des Messobjektes zu ermitteln. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass mit einem geeigneten Sensor auch Farbinformationen der gemessenen Oberfläche detektiert werden können. Reflektierende glatte Oberflächen sind mit diesem Verfahren jedoch nicht erfassbar, da die Schärfestimmung auf Bildkontraste (z. B. Kanten) angewiesen ist. Weiterhin ist die beugungsbegrenzte laterale und insbesondere axiale Auflösung im Vergleich zur Konfokalmikroskopie (s. Kap. 2.4.4) deutlich schlechter. [vgl. 70, 71]

2.4.2 Laserfokussensor

Bei Laserfokus-Sensoren wird, wie in Abbildung 11 dargestellt, ein Laserstrahl (3) auf die zu messende Oberfläche (6) fokussiert. Mit axialer Verschiebung der Oberfläche von der Fokusposition um dz ändert sich die Größe W der von einem Detektor (1) über einen Strahlteiler (5) erfassten Abbildung des Lasers. [72]

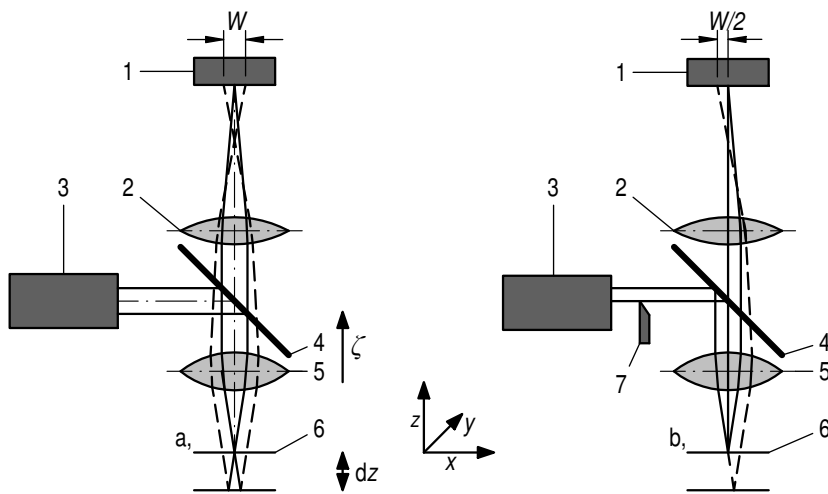


Bild 11: Typische optische Applikationen von Laserfokus-Sensoren: a, ohne Foucault'sche Schneide und koaxialer Anordnung der Laserquelle (links); b, Anordnung mit Foucault'scher Schneide sowie (rechts); 1. Detektor; 2. Tubuslinse; 3. Laser; 4. Strahlteiler; 5. Objektiv; 6. Messobjekt mit Messfläche; 7. Foucault'sche Schneide und Spotdurchmesser W . [in Anlehnung an 72]

Die in Abbildung 11 links dargestellte Applikation wird in dieser Form eher selten verwendet, da in dieser koaxialen Anordnung unabhängig von der

axialen Verschiebungsrichtung lediglich die Größe des Spots variiert. Damit ist keine Information über die Richtung, d. h. ob sich die Oberfläche ober- oder unterhalb der Fokusebene befindet, gegeben. Dennoch sei diese Anordnung hier erwähnt, da diese die Fokusfindung, der in Kapitel 3 gezeigten Anordnung, gravierend erleichtert.

Als eigenständiger Sensor häufiger anzufinden, ist die in Abbildung 10 rechts dargestellte Variante, bei der eine zusätzliche Foucault'sche Schneide [73] (7) und/oder ein lateral versetzter Laserstrahl dafür sorgt, dass auf dem Sensor (1) ein halbkreisförmiges Bild des Laserstrahls links der optischen Achse bei negativer z -Verschiebung entsteht und analog dazu ein spiegelsymmetrisches Abbild auf der rechten Seite der optischen Achse bei positiver z -Verschiebung. Die Schneide kann dabei, wie in Abbildung 11 dargestellt, vor der Beleuchtung angebracht werden oder vor dem Detektor. Dieses Verfahren wird unter anderem für die Abtastung von CD's verwendet. Statt eines Kamerasensors wird häufig auch eine Vierquadrantendiode als Detektor genutzt. [74]

Nach einem ähnlichen Prinzip wird in [72] ein Punkt-Autofokus-Sensor zur Oberflächenmessung beschrieben, der durch einen Regelkreis mit dem Detektor und einer Positioniereinheit durch Verschieben des Objektivs um Δz automatisch die Fokusposition hält, wobei der Laserstrahl eben mit parallelem Versatz zur optischen Achse angeordnet ist.

Eine verbesserte Variante der Foucault'schen Schneide Methode bezüglich der Empfindlichkeit wird durch die Verwendung von Keilprismen erreicht. Dabei wird der reflektierte Laserstrahl auf eine Doppelphotodiode abgebildet und das Signal durch Differenzbildung ermittelt. [75]

Weiterhin ist eine Methode mit astigmatischer Linse bekannt. Dadurch wird der ursprünglich kreisrunde Laserstrahlquerschnitt elliptisch auf dem Sensor abgebildet, wobei je nach Lage der Hauptachse die Richtung der Fokusabweichung ermittelt werden kann. [76, 77]

In Kombination mit einem Nanopositioniersystem wurde ein Laserfokussensor auf Basis einer Hologram-Laser-Unit [78, 79] eingesetzt. Durch die Verwendung solcher integrierten Bauelemente kann die Anzahl an diskreten Elementen deutlich reduziert und die Bauweise sehr kompakt gehalten werden. [80, 81]

Im Gegensatz zur Fokusvariation ist dieses Verfahren nicht auf Kontraste der Oberfläche angewiesen, da sowohl diffus gestreutes als auch reflektiertes Licht vom Detektor erfasst wird. Ein großer Vorteil im Gegensatz zur konfokalen Mikroskopie besteht darin, dass mit entsprechend großem Detektor auch ein großer axialer Bereich gemessen werden kann, allerdings nimmt mit zunehmender Defokussierung auch die Größe des Spotdurchmessers zu und damit die laterale Auflösung ab. Die beugungsbegrenzte laterale und axiale Auflösung ist genauso wie bei der Fokusvariation im Vergleich zur Konfokalmikroskopie (s. a. Kap. 2.4.4) deutlich schlechter.

2.4.3 Interferenzmikroskopie

Die interferenzmikroskopischen Verfahren der phasenverschiebenden interferometrischen Mikroskopie (Abk. PSI) sowie der Weißlichtinterferometrie (Abk. WLI) stellen Methoden zur Messung der Oberflächentopografie dar, bei der ein optisches Mikroskop mit Beleuchtung und einem eingebauten interferometrischen Zusatz versehen ist und mehrfach aufeinanderfolgende optische Bilder mit Interferenzstreifen erzeugt werden, aus denen das Oberflächenprofil oder ein Abbild der Oberflächentopographie berechnet werden kann. [vgl. 82, 83]

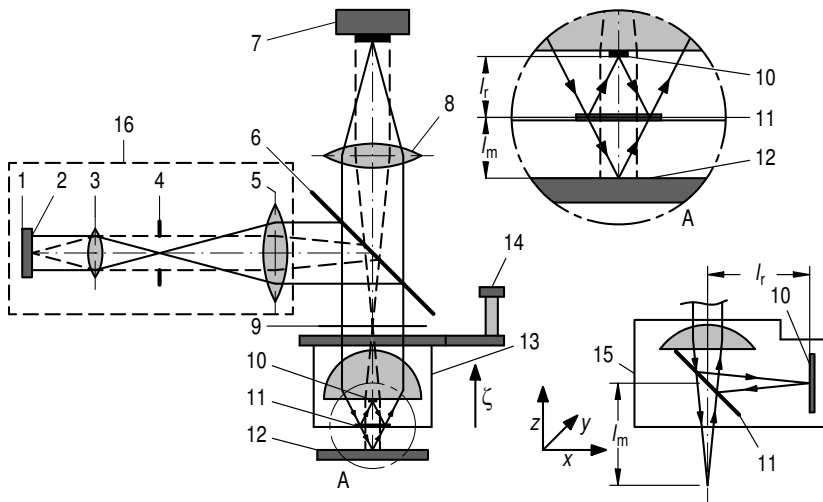


Bild 12: Typischer Aufbau eines WLI mit: 1. Weißlichtquelle; 2. Aperturblende; 3. Sammellinse; 4. Gesichtsfeldblende; 5. Kollektorlinse; 6. Strahlteiler; 7. Detektor; 8. Tubuslinse; 9. Pupillenebene; 10. Referenzspiegel; 11. Interferometer-Strahlteiler; 12. Messobjekt mit Messfläche; 13. Mirau-Interferenzobjektiv; 14. Positioniereinheit; 15. Michelson-Interferenzobjektiv und 16. Köhler'sche Beleuchtung [in Anlehnung an 83].

Wie in Abbildung 12 und 13 dargestellt, wird für einen solchen interferometrischen Zusatz ein Strahlteiler und eine Referenzfläche benötigt, die zusammen mit dem Messobjekt eine Interferometeranordnung bilden. Diese kann nach Michelson, Mirau oder Linnik ausgeführt sein. Mit den genannten Interferometeranordnungen ergeben sich jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile. Die Linnik-Anordnung stellt hinsichtlich der optischen Komponenten und der Justierung die Aufwendigste und Voluminöseste dar, jedoch werden bei der Verwendung zweier baugleicher Objektive Abbildungsfehler kompensiert. Die Michelson-Anordnung ist im Vergleich etwas kompakter, benötigt jedoch aufgrund des seitlich auskragenden Referenzarms unterhalb der Objektivlinse immer noch mehr Raum und wird daher meist nur für

Objektive mit geringer Vergrößerung verwendet [s. bspw. 84]. Im Gegensatz hierzu stellt die Mirau-Anordnung die kompakteste Bauweise dar und ist mit hoher Vergrößerung verfügbar, jedoch führt der koaxial platzierte Strahlteiler zur Abschattung eines Großteils der Beleuchtung [85].

Da üblicherweise auf unendlich korrigierte Interferometrieobjektive verwendet werden, kann ebenso wie bei den zuvor genannten Mikroskopieverfahren mit auf unendlich korrigierten Objektiven das axiale Abtasten entweder durch eine Positioniereinheit (7) (z. B. einer Piezostage) erfolgen, indem das Objektiv axial um $\Delta\zeta$ verschoben wird oder durch Verschieben des Messobjekts Δz (z. B. mit einer NMM).

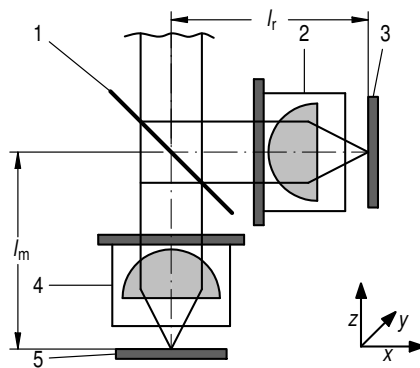


Bild 13: Linnik-Interferometer mit: 1. Strahlteiler; 2. Referenzobjektiv; 3. Referenzspiegel; 4. Mikroskopobjektiv und 5. Messfläche [in Anlehnung an 82].

Bei allen Anordnungen wird bei Änderung der optischen Wegdifferenz der Wege l_m und l_r zwischen Mess- und Referenzarm die Intensität durch die Interferenz moduliert und kann mithilfe eines Kamerasensors für jeden Pixel erfasst und ausgewertet werden.

Bei der phasenverschiebenden interferometrischen Mikroskopie wird langkohärentes Laserlicht verwendet, wodurch sich eine sinusförmige Modulation der Intensität bei Änderung der Wegdifferenz ergibt. Die Auswertung erfolgt dabei über den Phasenwert. Bei Oberflächenstrukturen, bei denen benachbarten Punkte auf der zu messenden Oberfläche größere Höhendifferenz als $\lambda/4$ aufweisen, ist das modulierte Intensitätssignal daher nicht eindeutig, sodass mit diesem Verfahren vorrangig glatte, reflektierende Oberflächen wie Spiegel gemessen werden [82].

Bei der Weißlichtinterferometrie wird hingegen kurzkohärentes Licht als Beleuchtung verwendet. Bei axialem Scan entsteht so für jeden einzelnen Bildpunkt (Pixel) ein, wie in Abbildung 14 gezeigtes Korrelogramm als Funktion der Intensität $I_{x,y}(\zeta)$ in Abhängigkeit der axialen Verschiebung ζ . Das

Maximum dieses Signals kann durch die Bestimmung einer Einhüllenden und gegebenenfalls zusätzlich durch eine Phasenauswertung eineindeutig ermittelt werden und repräsentiert damit die lokale Höhe des Messobjektes. [83]

Typischerweise wird bei einem WLI, wie in Abbildung 12 gezeigt, das Licht einer kurzkohärenten Weißlichtquelle (1) über eine Köhler'sche Beleuchtung [86] (1-5) und einen Strahlteiler (6) koaxial in den Strahlengang des Interferometrieobjektivs eingekoppelt. Aufgrund der geringen Kohärenzlänge des weißen Lichts treten Interferenzen nur bei sehr geringen Wegdifferenzen in beiden Armen auf. [83]

Qualitativ besteht ein WLI-Signal bei linearer Verschiebung um $\Delta\zeta$ aus Interferenzen, die innerhalb der Kohärenzlänge periodisch oszillieren und deren Einhüllende bei einer spezifischen Höhe ζ ein Maximum besitzt (s. Abbildung 14). Dieses entsteht, wenn die optischen Wege gerade die gleiche Länge aufweisen ($l_m=l_r$). Unter der Annahme einer unstrukturierten Oberfläche $h_{x,y}$, einer kleinen numerischen Apertur und einer gaußförmigen symmetrischen Verteilung des Spektrums der Lichtquelle kann das Interferenzsignal $I_{x,y}(\zeta)$ in einen konstanten Gleichanteil I_0 und ein kosinusförmiges Trägersignal bei einer Ortsfrequenz K_0 , moduliert mit einer langsam veränderlichen Modulations-Hüllkurve I_{AC} vereinfacht dargestellt werden nach [83]:

$$I_{x,y}(\zeta) = I_0(\zeta) + I_{AC}(\zeta - h_{x,y})\cos(K_0(\zeta) - h_{x,y}). \quad (1)$$

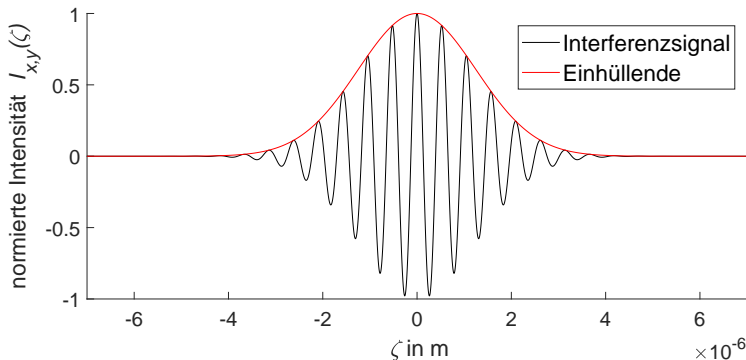


Bild 14: Beispielhafte Darstellung des Interferenzsignals eines Bildpunktes in Abhängigkeit der axialen Verschiebungen ζ [nach 83].

Im Gegensatz zur Fokusvariation sind die interferenzmikroskopischen Verfahren auf reflektierende Oberflächen angewiesen, sodass raue und damit teilweise diffus streuende Oberflächen schlecht erfasst werden können.

2.4.4 Konfokalsensor

Die Konfokalmikroskopie ist ein von Marvin Minsky 1957 eingereichtes und 1961 patentiertes mikroskopisches Verfahren [5], bei dem das Messobjekt im Gegensatz zur klassischen Mikroskopie nur punktwise beleuchtet und detektiert wird. Dadurch wird Streulicht reduziert, die laterale und axiale Auflösung erhöht und eine axiale Tiefendiskriminierung ebener Messobjekte (ohne laterale Strukturen und ohne Interferometrieobjektive) überhaupt erst ermöglicht. Da die Erfassung des Messobjektes hierbei nicht zeitlich parallel in einem lateral flächenhaften Bereich sondern eindimensional, respektive sequentiell punktförmig erfolgt, muss das Messobjekt lateral und axial mit dem Fokus der Beleuchtung abgetastet werden. Diese Abtastung kann wie im Folgenden anhand verschiedener technischer Realisierungen gezeigt, prinzipiell durch eine Bewegung des Messobjektes relativ zum Sensor (engl. *stage scanning* [5]), durch eine Bewegung des Objektivs (engl. *objectiv scanning* [87]) sowie durch Ablenkung/Modulation der Beleuchtung (engl. *beam scanning* [88]) erfolgen. Die Beleuchtung selbst kann sowohl aus einer kohärenten Laserquelle als auch einer breitbandigen Lichtquelle bestehen.

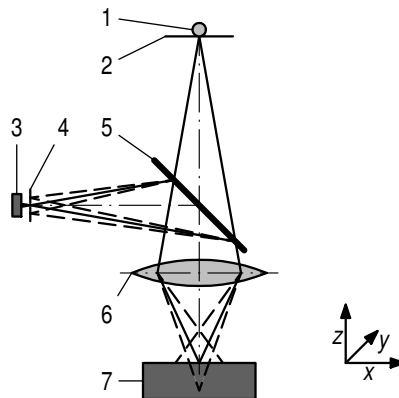


Bild 15: Konfokaler Punktsensor mit: 1. Lichtquelle; 2. Beleuchtungsblende; 3. Detektor; 4. Detektionsblende; 5. Strahlteiler; 6. Objektiv und 7. Messobjekt [in Anlehnung an 5].

Prinzipiell beruhen zunächst alle konfokalen Systeme auf der konfokalen (lat. *con* - mit; *focal* - Fokus, d. h. mit dem gleichen Fokus) Anordnung, einer Beleuchtungs- und Detektionsblende. In der ursprünglichen von Marvin Minsky patentierten Variante eines konfokalen Punktsensors [5] wird, wie in Abbildung 15 dargestellt, Licht einer Beleuchtung (1) durch eine Lochblende (2) begrenzt, durch einen Strahlteiler (5) geführt und mit einem Objektiv (6) auf die Oberfläche (7) fokussiert. Das von der Oberfläche (7)

reflektierte Licht gelangt zurück über das Objektiv und den Strahlteiler (5) auf eine Detektionsblende (4) und wird von einem Detektor (3) erfasst. Die Detektionsblende ist dabei so angeordnet, dass sie den gleichen Abstand zur Linse wie die Beleuchtungsblende aufweist, d. h. konfokal zu dieser angeordnet ist. Befindet sich das Messobjekt im Beleuchtungsfokus, wird das reflektierte Licht konfokal zum Beleuchtungsstrahl über den Strahlteiler auf die Detektionsblende fokussiert (s. Abb. 15, durchgezogene Linien). Befindet sich das Messobjekt jedoch ober- oder unterhalb des Beleuchtungsfokus, wird das reflektierte, nicht konfokal fokussierte Licht größtenteils von der Detektionsblende abgeschattet (s. Abb. 16, gestrichelte Linien). Bei axialer Abtastung entsteht so ein, wie in Abbildung 17 dargestelltes Intensitätssignal, welches ein Maximum aufweist, wenn sich das Messobjekt in der Fokusebene befindet und bei Defokussierung abnimmt. Im Gegensatz zur klassischen Mikroskopie hat dieser Intensitätsverlauf einerseits bei punktförmigen Messobjekten und infinitesimal kleiner Blende eine geringere Halbwertsbreite (engl.: *full width half maximum*, Abk. FWHM) und lässt sich andererseits auch bei flächigen, ebenen Messobjekten beobachten, bei denen mit konventionellen Mikroskopen in allen axialen Positionen die gleiche Lichtmenge reflektiert würde (s. 17). Durch geeignete Signalverarbeitung kann das Maximum dieser axialen Intensitätsverteilung ermittelt und damit der relative Abstand zum Objektiv sehr genau bestimmt werden. Damit ist die Konfokaltechnik auch ein exzellentes Verfahren zur Oberflächenmessung mit sehr hoher axialer Auflösung und insbesondere zur Messung glatter Messobjekte wie Spiegel, Linsen oder anderen optischen Bauteilen geeignet und wird beispielsweise in [89] als Messverfahren zur Bestimmung von Oberflächentopografien beschrieben.

Nach [90] lässt sich die detektierte Intensität $I(u)$ eines idealen Konfokalmikroskops für einen punktförmigen Reflektor mit infinitesimal kleiner Beleuchtungs- und Detektionsblende

$$I_{\text{konfokal,Punktreflektor}}(u) = \left(\frac{\sin(u/4)}{(u/4)} \right)^4 \quad (2)$$

für einen flächigen ebenen Reflektor

$$I_{\text{konfokal,Planreflektor}}(u) = \left(\frac{\sin(u/2)}{(u/2)} \right)^2 \quad (3)$$

sowie für einen einen punktförmigen Reflektor in einem konventionellen Mikroskop

$$I_{\text{konventionell,Punktreflektor}}(u) = \left(\frac{\sin(u/4)}{(u/4)} \right)^2 \quad (4)$$

mit der normierten, optischen, axialen Koordinate

$$u = (8\pi/\lambda) z \sin^2(\alpha/2) \quad (5)$$

und dem halben Öffnungswinkel des Objektivs

$$\alpha = \text{asin}(\text{NA}_O)/n, \quad (6)$$

bestimmen, wobei z der axiale Abstand zum Fokus, λ die Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle, NA_O die numerische Apertur des verwendeten Objektivs und n die Brechzahl des Immersionsmediums (hier: Luft $n = 1$) sind (s. Abb. 17).

Mit den Gleichungen 2 und 4 und Substitution mit 5 und 6 nach [90] ergibt sich eine um Faktor $1/\sqrt{2}$ geringere Halbwertsbreite für ein ideales konfokales Mikroskop im Vergleich zur konventionellen Mikroskopie gemäß

$$\text{FWHM}_{\text{konventionell,Punktreflektor}} \approx \frac{0,88 \lambda}{n - \sqrt{(n^2 - \text{NA}_O^2)}} \quad (7)$$

$$\text{FWHM}_{\text{konfokal,Punktreflektor}} \approx \frac{0,64 \lambda}{n - \sqrt{(n^2 - \text{NA}_O^2)}} \quad (8)$$

die im wesentlichen von der Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle λ und der numerischen Apertur des Objektivs NA_O abhängt.

Die Höhe der Maxima der Intensitätsverläufe hängen unter anderem von Eigenschaften der zu messenden Oberfläche, wie deren Winkel zur optischen Achse und Reflexionsgrad ab und können an jeder lateralen Position unterschiedlich ausfallen. Weiterhin ist aufgrund des beidseits der Fokuspersion abfallenden Verlaufes keine Richtung bestimmbar. Daraus wird, wie bereits eingangs erwähnt, ersichtlich, dass zur Topografiebestimmung eines Messobjektes jeder laterale Messpunkt mindestens über das Maximum dieser Intensitätsfunktion hinweg axial abgetastet werden muss, um dessen Position zu bestimmen.

Bei den in Abbildung 16 gezeigten Varianten eindimensionaler konfokaler

Punktsensoren erfolgt diese Abtastung gewöhnlich durch axiale und laterale Bewegung des Messobjekt relativ zum Sensor (*stage scanning*). Neben der von Minsky vorgeschlagenen Anordnung mit inkohärenten Lichtquellen entstanden mit den fast zeitgleichen ersten technischen Realisierungen von Rubinlasern [91], auch Anordnungen mit Laserquellen, welche erstmals ausführlich theoretisch in [92] beschrieben wurden. Neben der ursprünglichen Variante (s. Abb. 16, links, a) von Minsky sind weiterhin Konfokalsensoren für den *stage scanning* und/oder *objective scanning* Ansatz bekannt, wie in Abbildung 16 mittig (b) dargestellt. Bei dieser Variante werden vor der Beleuchtungs- und Detektionsblende jeweils Linsen mit gleicher Brennweite (8 u. 9) positioniert, wobei die Abstände so gewählt werden, dass der Strahl der Beleuchtung kollimiert (lat. *collimare*, abgewandelt von *collineare*: „in gerader Linie führen“) und der detektierte Strahl fokussiert wird.

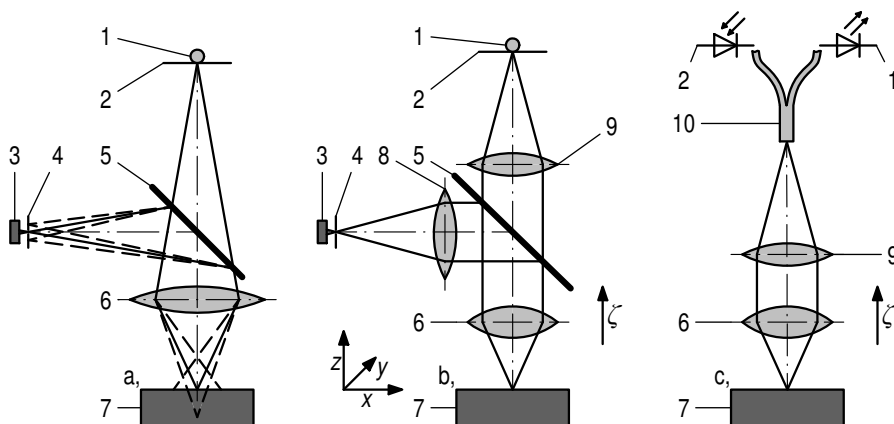


Bild 16: Typische optische Anordnung konfokaler Punktsensoren: links: a, Einlinsensystem [in Anlehnung an 5]; mitte: b, System mit auf unendlich korrigiertem Objektiv und unterschiedlichen Linsen für die Kollimation des Detektion- bzw. Beleuchtungsstrahlengangs sowie rechts: c, System mit auf unendlich korrigiertem Objektiv und Faserkopplung; 1. Lichtquelle; 2. Beleuchtungsblende; 3. Detektor; 4. Detektionsblende; 5. Strahlteiler; 6. Objektiv; 7. Messobjekt; 8. Sammellinse; 9. Kollimator und 10. optischer Lichtwellenleiter mit Strahlteiler [in Anlehnung an 93].

Damit ist der Abstand zwischen der Kollimationslinse und dem Objektiv variabel, wodurch heute übliche, auf unendlich korrigierte Mikroskopobjektive verwendet werden können, die das Einbringen zusätzlicher optischer Elemente wie beispielsweise Filter ermöglichen, ohne die Fokussierung zu ändern. Weiterhin wird hierdurch eine axiale Abtastung durch Verschieben

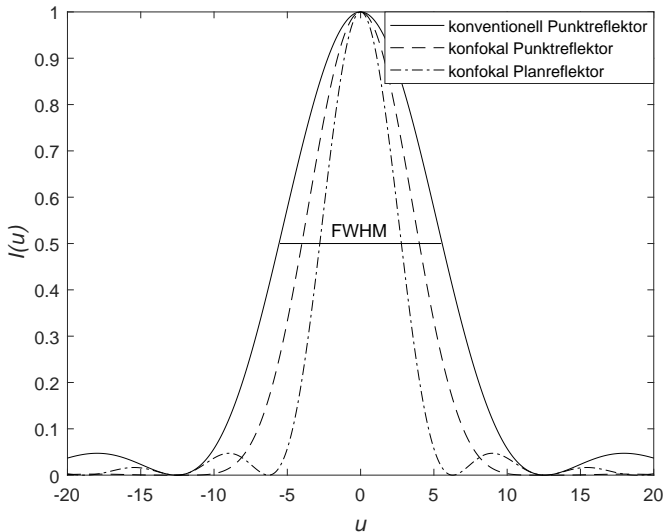


Bild 17: Normierte Intensität $I(u)$ über die axiale Verschiebung z bei verschiedenen Objektiven mit unterschiedlichen numerischen Aperturen NA im Fall eines punktförmigen Reflektors sowie punktförmiger Beleuchtung und Detektion.

des Objektivs um ζ ermöglicht (*objectiv scanning*). Anstelle der beiden Blenden kann jeweils auch eine Faserkopplung in einen Lichtwellenleiter (Abk. LWL) erfolgen, wobei die Faserenden als Blenden fungieren, wie beispielsweise in [94] gezeigt. Eine dritte, in Abbildung 16 rechts (c) dargestellte Variante besteht aus einem Zweilinsensystem mit einem Kollimator und einem Objektiv sowie einem LWL (10), wobei die Strahlteilung direkt in diesem integriert sein kann oder nach dem Auskoppeln zwischen Lichtquelle und Detektor erfolgt. Diese Anordnung wurde beispielsweise in [95] realisiert, deren Signalentstehung und Auflösung in [93, 96, 97] theoretisch betrachtet und in [98] zur Oberflächenmessung genutzt wird. Neben dem oben genannten Vorteil des kollimierten Strahlengangs muss hier zudem kein Strahlteiler ausgerichtet werden und es wird nur eine zusätzliche Linse benötigt. Weiterhin dient das Faserende gleichzeitig als Beleuchtungs- und Detektionsblende, wodurch diese nicht zueinander justiert werden müssen und der LWL ermöglicht eine räumliche Trennung der Lichtquelle und des Detektors vom Sensorkopf. Dies ist insbesondere in der Nanomesstechnik von Vorteil, um mögliche Wärmequellen vom Messobjekt und dem metrologischen Rahmen des Messsystems zu separieren, da dies ansonsten aufgrund thermischer Ausdehnung zu signifikanten Messabweichungen führen kann.

Chromatisch-konfokalen Punktsensoren

Bei chromatisch-konfokalen Punktsensoren (engl. *chromatic white light*, Abk. CWL) wird die Dispersion, d. h. der wellenlängenabhängige Brechungsindex, einer chromatisch nicht korrigierten Linse genutzt. Indem das von der Oberfläche reflektierte Licht mithilfe eines Spektrometers ausgewertet wird, kann die lokale Höhe des Messobjektes bestimmt werden. [99]

Wie in Abbildung 18 gezeigt, wird ein von einer breitbandigen Weißlichtquelle (1) erzeugtes Licht durch eine Lochblende (2) abgeblendet (s. a. Abb. 15) und mithilfe einer chromatisch nicht korrigierten Objektivlinse (4) auf die Oberfläche (5) fokussiert. Das von der Oberfläche reflektierte Licht wird über einen Strahlteiler (3) durch die Diskriminationslochblende (6) zum Spektrometer (7) geführt. Dieses empfängt genau wie beim konfokalen Punktsensor die maximale Lichtintensität, wenn der Lichtstrahl auf die Oberfläche fokussiert wird. Allerdings ist die Position der Fokussierung von der Wellenlänge abhängig, wobei kürzere Wellenlängen stärker fokussiert werden. Bei bekanntem Dispersionverhalten der verwendeten Linse kann somit über die spektrale Auswertung die relative Position der Oberfläche zur Objektivlinse ermittelt werden. [vgl. 99]

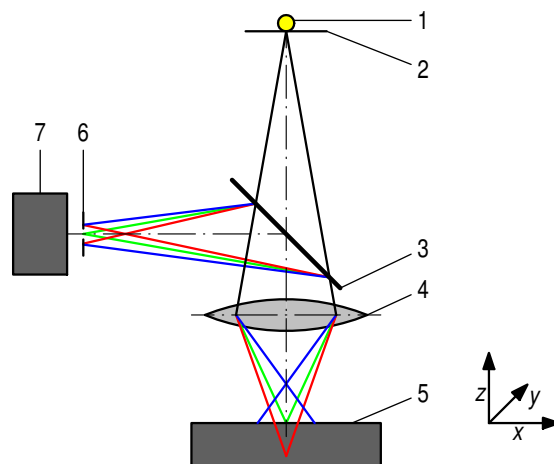


Bild 18: Typischer optischer Aufbau eines chromatisch-konfokalen Punktsensors mit: 1. breitbandige Weißlichtquelle; 2. Lochblende der Lichtquelle; 3. Strahlteiler; 4. chromatische Linse; 5. Messobjekt mit Messfläche; 6. Diskriminationslochblende und 7. Spektrometer [in Anlehnung an 99].

Neben dem Vorteil einer schnellen Höherfassung besteht ein Nachteil der genannten Verfahren in der beugungsbedingten wellenlängenabhängigen Fokusgröße, sodass die laterale und axiale Auflösung von der z-Position abhängt. Im Vergleich zur im nachfolgenden beschriebenen Konfokalmikroskopie mit einer Wellenlänge wird stets nur ein kleiner spektraler Anteil der Lichtquelle detektiert, sodass die Signalintensität und damit das Signal-Rausch-Verhältnis schlechter ist. Für Messungen inhomogener Oberflächen mit lokal variierenden Reflexionseigenschaften ist das Prinzip nur bedingt geeignet.

Bekannte konfokale Applikationen

In Kombination mit einem Nanokoordinatenmessgerät ist eine ähnlich Anordnung, wie in Abbildung 16 rechts dargestellt, zur Referenzpositionsbestimmung der Spiegelecke [100] sowie als Antastsystem [101] bekannt, wobei hier zusätzlich die chromatische Abberation des Objektivs (vgl. Abb. 18) unter Verwendung zweier unterschiedlicher Wellenlängen und Differenzbildung der beiden Signale genutzt wird, um eine approximativ lineare Kennlinie zu erhalten.

Weiterhin ist für einen *stage scanning* Ansatz eine axial periodisch oszillierende Bewegung des Messobjekts um den Fokus und Auswertung mit einem Lock-in-Verstärker bekannt [102].

Mit der Verwendung kohärenter Laser und eines kollimierten Strahlengangs wurde erstmals in [87] ein konfokales Laserscanningmikroskop (engl. *confocal laser scanning microscope*, Abk. CLSM) vorgestellt, bei dem die Abtastung des Messobjekts nicht durch *stage scanning*, sondern durch *objective scanning*, d. h. durch axiales und laterales Verschieben der Objektivlinse erfolgte. Der laterale Stellweg ist hierbei von der Größe der Linse abhängig. Hier ist beispielsweise ein *objective scanning* Verfahren mit einer speziellen Anordnung von Tauchspulenantrieben bekannt [103]. In Kombination mit auf unendlich korrigierten Mikroskopobjektiven werden heute beispielsweise Objektivversteller mit Piezoaktoren [104, 105] oder Tauchspulenantrieben [106, 107] verwendet, mit denen eine axiale Abtastung realisiert werden kann. Mikroskopobjektive liefern beim *objective scanning* bessere Abbildungsqualitäten, sind jedoch aufgrund der größeren Masse träger und limitieren somit die axiale Abtastfrequenz.

Neben dem *stage* und *objective scanning* sind weiterhin verschiedene konfokale (vom *Flying-Spot* Mikroskop [108] inspirierte) Ansätze des *beam scanning* bekannt, bei denen die Beleuchtung lateral und/oder axial moduliert wird. Als erste bekannte konfokale Anordnung zur lateralen Beleuchtungsmodulation in Verbindung mit einer inkohärenten Lichtquelle im Durchlichtverfahren

ist hier die Verwendung zweier rotierender und mit mehreren spiralförmig angeordneten Blendenöffnungen versehener Nipkowscheiben [88, 109] zu nennen. Im gleichen Patent [88] werden auch erstmals die Verwendung von einem oder zwei senkrecht zueinanderstehenden drehbaren Ablenkspiegeln zur lateralen Modulation der Beleuchtung sowie jeweils eine Anordnungen für Auflicht und Durchlicht vorgeschlagen. In Kombination mit kohärenten Lichtquellen wurden solche Anordnungen (engl. *confocal beam scanning microscope*) beispielsweise in [110, 111] beschrieben. Eine andere konfokale Anordnung zur Auflichtbeleuchtung mit inkohärenter Lichtquelle stellt das Tandem-Scanning-Mikroskop (Abk. TSM) [112, 113] dar, bei dem die Beleuchtung und Detektion durch zwei getrennte, gegenüberliegende Blenden und einer gemeinsamen Nipkowscheibe erfolgt. Weiterhin sind laterale Beleuchtungsmodulationen mit strukturierter Beleuchtung mit einem räumlichem Lichtmodulator (engl. *spatial light modulator*, Abk. SLM) [114–116] oder einer speziellen Beleuchtungsmaske [117, 118] bekannt.

In [102] wurde ebenfalls bereits vorgeschlagen, statt einer periodischen Bewegung des Messobjekts, eine axiale Abtastung durch Verschiebung des Objektivs, der Lochblende oder durch das Einbringen von Spiegeln vorzunehmen. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise Verfahren bekannt, bei denen sich eine Objektivlinse sowie eine Kollimationslinse jeweils an den beiden Zinken einer Stimmgabel befinden, wobei diese durch Anregung der Stimmgabel in deren Resonanzfrequenz axial gegenläufig zueinander schwingen [119, 120]. Weiterhin sind Anordnungen zu nennen, bei denen eine axiale Modulation des Beleuchtungsfokus durch eine Veränderung der optischen Weglänge eines Zwischenbildes der Beleuchtung durch Verschiebung eines Spiegelsystems in Richtung der optischen Achse erreicht wird [121] sowie eine Weiterentwicklung mit hochfrequent senkrecht zu ihrer Normalenrichtung schwingenden Mikrospiegeln [122]. Auch die axiale Oszillation einer, auf einem Cantilever befindlichen Lochblende wird derzeit untersucht [123].

Ferner sind auch in ihrer Brechkraft veränderliche Optiken wie deformierbare Spiegel (engl. *deformable mirrors*, Abk. DM), modulierbare flüssigkeitsgefüllte Linsen (engl. *liquid lenses*, Abk. LL) [124–127], Flüssigkristalllinsen (engl. *liquid crystal lenses*, Abk. LCL) [128, 129] und akustisch modulierbare Gradientenoptiken (engl. *tuneable acoustic gradient lens*, Abk. TAG) [6, 130–136] bekannt. In Kombination mit konfokalen Systemen sind Anordnungen mit LL [137–141], LCL [142], DM [143] sowie TAG [144] zu nennen. Letztgenannte TAG-Linsen weisen sehr hoher Modulationsfrequenzen bis in den dreistelligen Kilohertzbereich auf und bieten aufgrund der radialen Schwingung den großen Vorteil, dass der Massenschwerpunkt konstant bleibt und so keine Schwingungen, insbesondere in axialer Richtung an die Messanordnung abgegeben werden. Damit sind solche Optiken vornehmlich für den im Folgenden gezeigten Ansatz der Messobjektabtastung geeignet,

bei dem durch eine Kombination aus *beam* und *stage scanning* eine kontinuierliche laterale Abtastung einer sich stetig ändernden Oberfläche des Messobjektes durch axiale Nachregelung der Tischposition über einen relativ zur Fokusmodulation sehr großen axialen Messbereich ermöglicht wird. Um die Wirkweise und Funktion solcher TAG-Linsen zu verdeutlichen, werden diese im Folgenden kurz vorgestellt.

2.5 Akustisch modulierbare Gradientenoptiken

Klassische Optiken bestehen aus Material mit homogenem Brechungsindex, folglich findet die Lichtbrechung an den Grenzflächen statt. Im Gegensatz dazu sind Gradientenoptiken (engl. *Gradient-index optics*, Abk. GRIN) aus Materialien die einen meist radialen Gradienten des Brechungsindex aufweisen. Dadurch wird Licht kontinuierlich in Richtung des höheren Brechungsindex abgelenkt. [145]

Basierend darauf sind akustisch modulierbare Gradientenoptiken (engl. *tuneable acoustic gradient lenses*, Abk. TAG) bekannt, die sich die Eigenschaft zunutze machen, dass der Brechungsindex vornehmlich von der Dichte des Materials abhängt. Theoretische Untersuchungen und praktische Umsetzungen zu solchen TAG-Linsen wurden in [6, 130–136] gezeigt und in verschiedenen optischen Applikationen [146–152] sowie einem Konfokalsensor [144] genutzt. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick zur Funktionsweise solcher Gradientenlinsen gegeben werden.

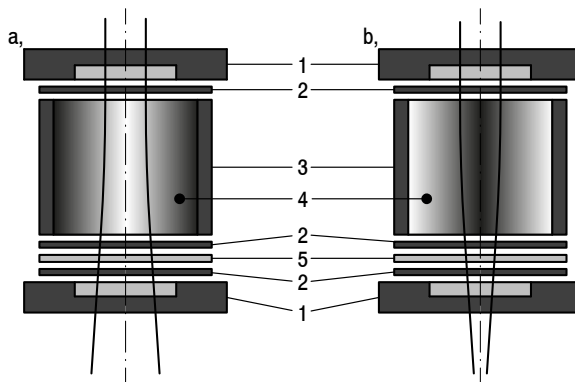


Bild 19: Schematische Darstellung einer akustisch modulierbaren Gradientenoptik (engl. *tuneable acoustic gradient lens*, Abk. TAG) und Anregung in der Grundfrequenz mit: links: a, maximaler negativer Brechkraft; rechts: b, maximaler positiver Brechkraft; 1. Metallgehäuse; 2. Dichtung; 3. Ringpiezoaktor; 4. Silikonöl und 5. Kontaktelektrode [in Anlehnung an 6, 130–136].

Wie in Abbildung 19 dargestellt, werden in einem hermetischen Gehäuse (1) mithilfe eines Ringpiezoaktors (3) radial akustische Wellen in einer Flüssigkeit (4) erzeugt, welche eine Dichteänderung (durch Graustufengradient symbolisiert), respektive eine Änderung des Brechungsindex bewirken. Die Frequenz wird dabei vornehmlich so gewählt, dass diese einem Resonanzfall des zylindrischen Innenraumes entspricht und damit eine stehende, resonante Dichtewelle entsteht, deren Amplitude sich mit eben dieser Frequenz ändert. Damit ist es nicht möglich eine zeitlich konstante Brechkraft zu erreichen. Vielmehr ist die Brechkraft der TAG-Linse ohne Anregung gleich null und durch Anlegen einer sinusförmigen Wechselspannung am Ringpiezo wird eine ebenfalls sinusförmig modulierte Änderung der Brechkraft bewirkt, d. h. ein anfänglich kollimierter Lichtstrahl wird abwechselnd aufgeweitet (s. Abb. 19 links, a) und fokussiert (s. Abb. 19 rechts, b). [vgl. 6, 130–136]

Durch das Einbringen einer solchen TAG-Linse in den Strahlengang eines kollimierten, konfokalen Systems wird schließlich die im folgenden beschriebene Fokusmodulation (*beam scanning*) um die Brennebene des Objektivs erreicht.

3 Fokusmodulierte Konfokalsensoren

3.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen robust arbeitenden, präzisen und schnellen konfokalen Sensor für den Einsatz in einem Nanokoordinatensystem zu schaffen. Dieser soll es ermöglichen, durch eine einzige laterale Abtastung bei gleichzeitiger axialer Nachführung durch den Tisch des Positioniersystems die Oberflächentopografie der Messfläche zu erfassen.

Da die Dynamik bzw. Beschleunigung des Nanokoordinatensystems aufgrund der Trägheit der Spiegelecke limitiert wird, soll eine Kombination aus einer hochfrequenten axialen Fokusmodulation (*beam scanning*) und einer hierzu vergleichsweise langsamen Nachregelung der z-Position des Positioniertisches genutzt werden. Das Ziel dieser Arbeitsweise ist es, den Konfokalsensor durch die Nachregelung in der Mitte seiner Kennlinie zu betreiben und damit den Abstand konstant zu halten *constant distance scanning*.

Im Vergleich zum konventionellen *stage scanning* der Konfokalmikroskope, bei dem meist lateral flächenhafte und axial schichtweise Aufnahmen erfolgen, sollen die Messzeit dadurch deutlich reduziert und die axiale Auflösung nicht durch den Höhenabstand zwischen zwei Schichten beeinflusst werden. In diesem Zusammenhang soll gezeigt werden, dass insbesondere in der Nanomesstechnik eine Reduktion der Messzeit nicht nur eine Reduzierung der Kosten, sondern aufgrund des zunehmenden Einflusses thermischer Driften ebenfalls eine Verringerung temperaturbedingter Abweichungen zur Folge hat. In Kombination mit der Konfokaltechnik sind bereits Anordnungen mit flüssigkeitsgefüllten, elektrisch in ihrer Krümmung einstellbaren Optiken [140, 141], adaptiven Spiegeln [143] sowie hochfrequent akustisch modulierten Gradientenoptiken [144] bekannt. Insbesondere letztgenannte Variante soll als Grundlage für den Aufbau eines hochfrequent fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors analysiert werden. Weiterhin soll eine eigens entwickelte Kollimationslinsenmodulation auf Basis von Piezobiege- und Tauchspulenaktuatoren untersucht werden.

Die Signalauswertung soll auf Basis eines digitalen Lock-in-Verstärkers erfolgen, die bereits in [102] gezeigt wurde, wobei zur Normierung eine neuartige Quotientenbildung der Ausgangssignale genutzt werden soll. Durch die mit dem Lock-in-Verstärker verbundene extrem schmalbandige Filterung soll ein sehr hohes Signal-Rausch-Verhältnis ermöglicht werden. Weiterhin soll der Sensor eine Faserkopplung beinhalten, um die Wärmequellen der Detektion und Beleuchtung räumlich vom Sensorkopf, dem Nanopositioniersystem sowie dem Messobjekt zu trennen. Zusätzlich soll eine kamerabasierte

Beobachtung des Messbereichs integriert werden, um eine visuelle Orientierung auf der Messfläche zu ermöglichen. [P1, P2]

3.2 Mess- und Umgebungsbedingungen

In der Mikro- und Nanomesstechnik müssen spezielle Vorkehrungen zur Minimierung temperatur- und schwingungsbedingter Messabweichungen getroffen werden. Alle Messungen wurden daher im Messraum des Messzentrums FMT, eines nach DIN EN ISO/IEC 17025 : 2005 [153] von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) akkreditierten Kalibrierlaboratoriums [154] für dimensionelle Messgrößen im Bereich: Dimensionelle Messgrößen - Koordinatenmesstechnik – Virtuelles Koordinatenmessgerät, durchgeführt. In diesem Raum (s. Abb. 20) wird die Standardreferenztemperatur nach DIN EN ISO 1 [155] von 20 °C mit einer maximalen Abweichung von $\pm 0,2$ K gewährleistet, womit dieser nach VDI/VDE 2627 Blatt 1 [156] der höchsten Temperaturklasse A entspricht.

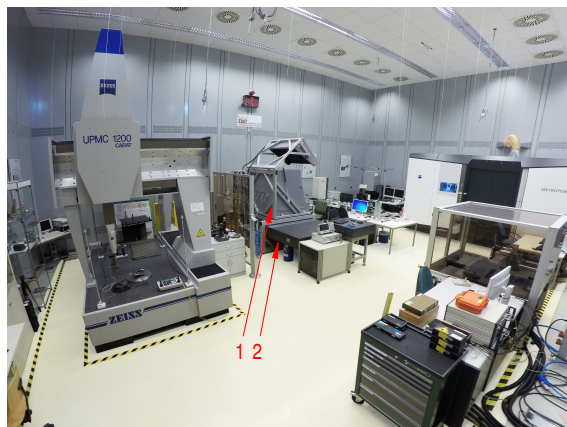


Bild 20: Foto des Messraums FMT mit: 1. NMM-Temperierhaube und 2. Granitplatte auf Isolatoren mit Pendelkonstruktion.

Hierzu wird ein 9 : 1 Luftgemisch aus Raum- und Frischluft durch 20 Drallauslässe von der sechs Meter hohen Decke bis zu einer Höhe von ca. vier Metern turbulent eingeblasen. Mit der anschließend nahezu laminaren Luftströmung wird eine optimale Durchmischung der Luftschichten erreicht. Die Luft wird durch Gitter auf der Höhe von 0,15 m und 3,0 m angesaugt und der Aufbereitung wieder zugeführt. Durch die Rückführung der Luft in den hohlen Seitenwänden ist zwischen Raumluft und Wänden kein Temperaturunterschied vorhanden. Es erfolgt ein 18-facher Luftaustausch pro

Stunde. Durch ein Beleuchtungssystem aus Kaltlichtröhren wird zudem Wärmestrahlung minimiert und die Wärmeentwicklung der Beleuchtung wird mit einem Luftdurchsatz von 300 m³/h direkt abgesaugt. Große Wärmelasten (z. B. Steuerschrank) werden ebenfalls direkt abgesaugt. Alle Wärmequellen im Messraum bleiben durchgehend angeschaltet, um eine konstante Wärmelast zu erzeugen. Das Schleusensystem lässt keinen direkten Luftaustausch zwischen Außen- und Messraumbereich zu. Um den Schwingungseintrag aus der Umgebung auf die messtechnischen Einrichtungen zu minimieren, stehen alle messtechnisch relevanten Einrichtungen auf einer ein Meter dicken massiven Betonplatte, die durch ein Kiesbett und eine isolierende Dämpfungsschicht (Spezialpolymer) vom Boden sowie durch eine umlaufende Trennfuge vom restlichen Gebäude entkoppelt ist. [157]

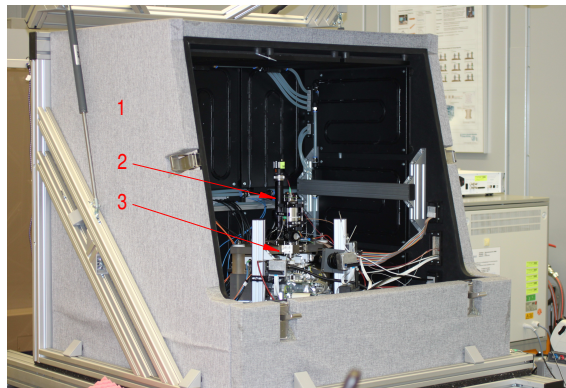


Bild 21: Foto des Messsystems mit: 1. NMM-Temperierhaube; 2. Fokusmodulierter Konfokalsensor und 3. Nanokoordinatenmesssystem.

Die Nanopositionier- und Nanomessmaschine SIOS NMM-1 [1] steht wiederum auf einer 1,5 m x 2 m x 25 cm massiven Granitplatte mit einem geschätzten Gewicht von 2 400 kg, die ihrerseits durch speziell angefertigte, Isolatoren mit Pendelkonstruktion insbesondere laterale Schwingungen minimiert. Weiterhin befindet sich eine speziell konstruierte Temperierhaube um die Nanomessmaschine (s. Abb. 21). Diese ist über ein eigenes Gestell von der Granitplatte entkoppelt, um Schwingungsübertragungen durch auf diese treffende Luftströmungen auf die Nanomessmaschine zu vermeiden. Im Rahmen der Untersuchungen zu dem hier vorgestellten Sensor wurde diese Haube erstmals in Betrieb genommen und validiert. Hierbei wurden in einem Zeitraum von 12 Stunden eine Temperaturschwankung von 6,5 mK und in einem Zeitraum von 24 Stunden von 17 mK festgestellt [P6].

3.3 Wirkweise der axialen Nachführung

Die Nanopositionier- und Nanomessmaschine kann der Benennung zufolge als Positioniersystem sowie Oberflächen- und Koordinatenmesssystem verwendet werden. [1]

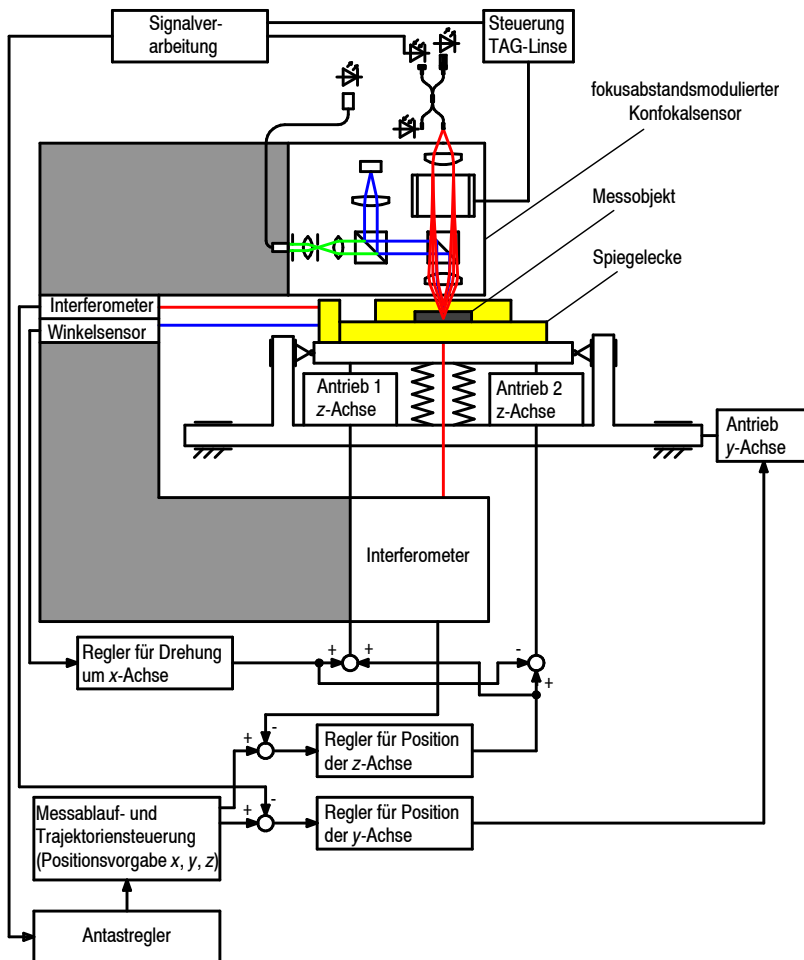


Bild 22: Wirkweise der Regelung. [in Anlehnung an 1, 158]

In der Wirkweise als Positioniersystem erfolgt eine Positionsvorgabe aller drei Achsen, wobei die Regelung der Antriebe über die Interferometer und Winkelsensoren erfolgt. In dieser Wirkweise können von einem Sensor zwar Signale aufgezeichnet, jedoch nicht für eine Regelung genutzt werden. [1, 158]

In Abbildung 22 ist die Wirkweise als Messsystem mit fokusmoduliertem Konfokalsensor skizziert. Vor dem Messbeginn muss das Messobjekt in den Kennlinienbereich des Sensors gebracht werden (vgl. Abb. 23). Hierzu führt das System zunächst in der Wirkweise eines Positioniersystems eine Bewegung der Spiegelecke in z -Richtung aus. Sobald sich das Messobjekt im Kennlinienbereich des Sensors befindet, schaltet das Steuerungssystem den *constant distance mode (scanning)* um. Die Regelgröße für die Positionsvorgabe der z -Achse ergibt sich aus der Differenz der Sollwertvorgabe der bei der Kalibrierung aufgenommenen Kennlinie sowie dem gemessenen Abstand vom Arbeitspunkt des Konfokalsensors. Dieser wird idealerweise so gewählt, dass er sich in der Mitte des axialen Kennlinienbereichs (der Fokusebene des Objektivs) befindet. In x - und y -Richtung erfolgt weiterhin eine Regelung in der Wirkweise als Positioniersystem. Mit einer Differenzbildung des Signals des Interferometers und der Regelabweichung vom Arbeitspunkt der Kennlinie kann so die z -Position der Messobjektoberfläche bestimmt werden. Diese Wirkweise des *constant distance scanning* bedingt im Gegensatz zum lateralen Abtasten mit konstanter Höhe *constant height scanning*, bei dem das Messsystem als Positioniersystem arbeitet, dass sich die Messobjektoberfläche während des Scans stets im Kennlinienbereich des Sensors befindet. Ist im Messobjekt eine laterale Unstetigkeit, d. h. eine Stufe die höher ist als der Kennlinienbereich des Sensors oder eine steile Flanke die nicht erfasst werden kann, muss das Messobjekt lateral verschoben und erneut in den Kennlinienbereich gebracht werden. Nach Beendigung einer Messung kann das Messobjekt wieder aus dem Kennlinienbereich gefahren und das Gerät als Positioniersystem genutzt werden. [vgl. 1, 158]

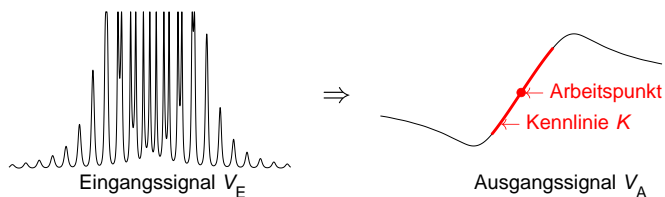


Bild 23: Darstellung der Erzeugung des Ausgangssignals V_A und der Kennlinie K aus dem Eingangssignal V_E .

Um eine solche axiale Nachregelung der z -Achse zu ermöglichen, muss eine eindeutige und stetig steigende bzw. fallende Kennlinie (bezüglich des Arbeitspunktes) vom Sensor bereitgestellt werden (s. Abb. 23). Diese muss durch eine lineare oder polynomiale Regression maximal dritter Ordnung angenähert werden können, wobei die Residuen dieser Ausgleichsrechnung

möglichst klein sein sollten, um Messabweichungen so gering wie möglich zu halten. Die Signalverarbeitungsschritte, die aus dem vom Sensor kommenden Eingangssignal V_E ein Ausgangssignal V_A und daraus die Kennlinie K generieren, werden im Folgenden diskutiert.

3.4 Optische Anordnung und Messprinzip

Die Basis für den im Folgenden dargestellten Sensor bildet die in Kapitel 2.4.4 beschriebene und in Abbildung 16 rechts dargestellte, konfokale, fasergekoppelte Anordnung. Diese ermöglicht eine räumliche Trennung der Beleuchtung und des Detektors vom Sensorkopf und respektive dem Positioniersystem und Messobjekt. Weiterhin erlaubt die kollimierte Strahlführung zwischen dem Kollimator und dem Mikroskopobjektiv die Integration einer akustisch getriebenen Gradientenoptik, wie in Kapitel 2.5 beschrieben. Damit ergibt sich der in Abbildung 24 skizzierte Gesamtaufbau. Die fokusabstandsmodulierte konfokale Anordnung wird durch die hier rechts dargestellten Komponenten des optischen Systems (1-11) gebildet und könnte prinzipiell auch lediglich mit diesen genutzt werden. Ist die Gradientenoptik (9) ausgeschaltet, kann das System als konventioneller Konfokalsensor genutzt werden, bei dem keine Fokusmodulation durch die Gradientenoptik erfolgt (s. Abb. 24, durchgezogene rote Linien). Bei axialer Abtastung durch axiale Verschiebung des Positioniertisches entsteht so das in Abbildung 26 gezeigte Eingangssignal V_E , welches maximal wird, wenn sich die Messfläche in der Fokusebene des Objektivs befindet und bei Defokussierung beidseitig abnimmt (vgl. Kap. 2.4.4). Im Einzelnen wird dabei Licht eines monochromatischen Lasers (1) über einen optischen Faraday-Isolator (2) in eine Faser mit integrierter Strahlteilung (6) eingekoppelt, wobei durch den Isolator Laserleistungsschwankungen durch in den Laser zurückreflektiertes Licht minimiert werden. Ein Teil dieses Lichts wird für die Justierung der Lasereinkopplung an einem der beiden gegenüberliegenden Faserenden von einem optischen Leistungsmessgerät (7) erfasst und der andere Teil über einen Kollimator (8) am Messkopf (22) zu einem parallelen Lichtstrahl kollimiert. Anschließend passiert dieser die modulierbare Gradientenoptik (9) sowie den ersten Strahlteiler (10) und wird von einem auf unendlich korrigierten Mikroskopobjektiv (11) in der Fokusebene des Objektivs fokussiert. Das von der zu messenden Oberfläche (12) reflektierte Licht gelangt schließlich in umgekehrter Richtung durch die genannten optischen Elemente (8-11) wieder zum Faserende und wird eben dann maximal eingekoppelt, wenn sich die Messfläche im Fokus befindet (s. a. Kap. 2.4.4). Das so über den Kollimator (5) zum Detektor (4) gelangende Licht der Intensität $I(z_{MO})$ in Abhängigkeit der Position des Messobjektes z_{MO} kann schließlich in ein proportional und im Folgenden als Eingangssignal $V_E(z_{MO})$ bezeichnetes Spannungssignal

umgewandelt werden, welches durch entsprechende Signalverarbeitungen und Maximalwertsuche ausgewertet werden kann. [vgl. P1]

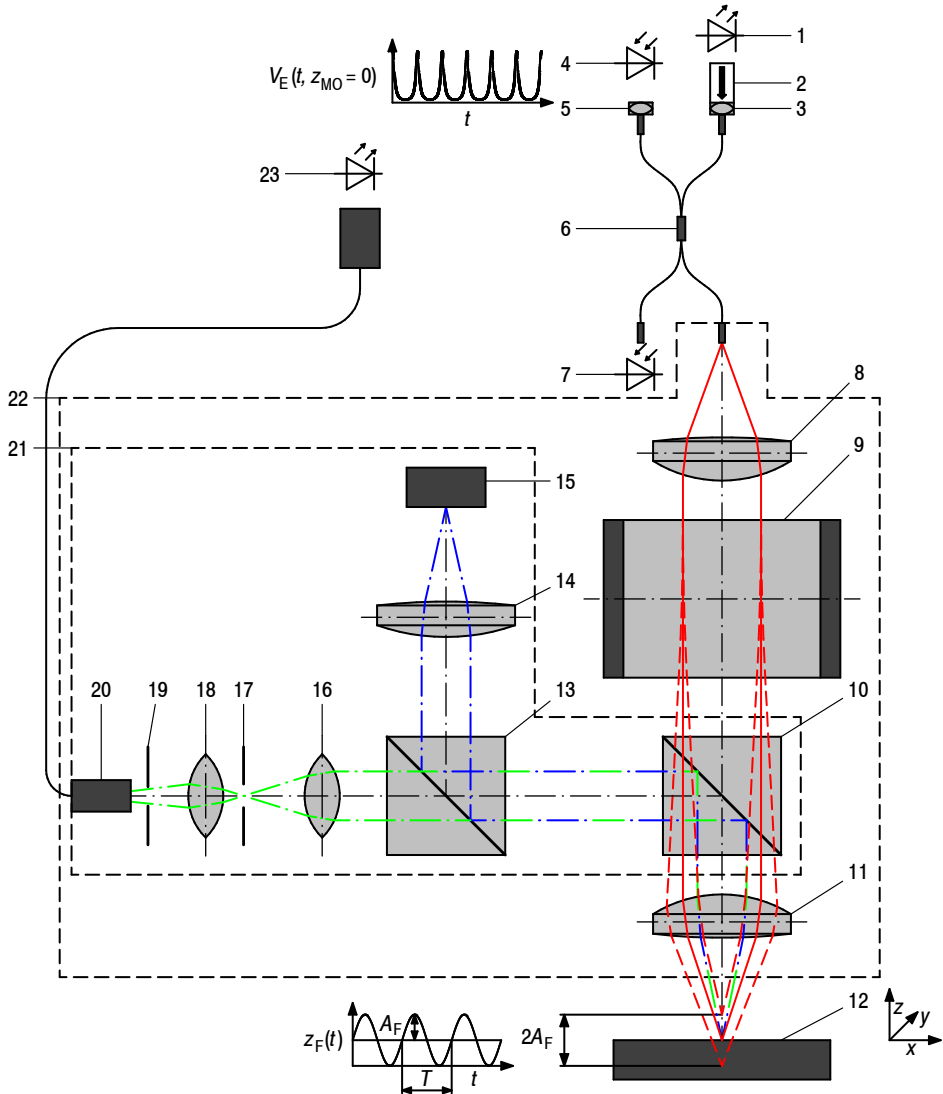


Bild 24: Optischer Aufbau eines fokusbandsmodulierten Konfokalsensors mit: 1. Laserquelle; 2. optischem Isolator; 3. Sammellinse; 4. Photodiode; 5. Sammellinse; 6. Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 7. optischem Leistungsmessgerät; 8. Kollimator; 9. modulierbarer Gradientenlinse; 10. Strahlteiler; 11. Objektiv; 12. Messobjekt; 13. Strahlteiler; 14. Tubuslinse; 15. Bildsensor; 16. Kondensator; 17. Leuchtfeldblende; 18. Kollektor; 19. Aperturblinde; 20. Lichtwellenleiter; 21. bildgebendes System; 22. Messkopf und 23. Weißlichtquelle [in Anlehnung an P1].

Wird nun die modulierbare Gradientenlinse (g) eingeschaltet, bewirkt diese eine mit der Resonanzfrequenz f_{TAG} wechselnde Fokussierung bzw. Aufweitung des zuvor kollimierten Strahls, d.h. sie wirkt abwechselnd als Sammel- bzw. Streulinse. Beim Fokus der von der Gradientenlinse (g) erzeugt wird, entsteht somit ein Sprung von minus zu plus unendlich. Man stelle sich dazu die Schnittpunkte der Verlängerungen der gestrichelten Linien zwischen der Unterkante der Gradientenoptik (g) und der Oberkante des Mikroskopobjektivs (11) vor. Mit nachfolgender Fokussierung durch das Mikroskopobjektiv (11) resultiert diese Oszillation in Abhängigkeit der Vergrößerung des Objektivs in einer sinusförmigen Modulation des Fokus z_F mit der Amplitude A_F um die Brennebene des Objektivs $z_O = 0$.

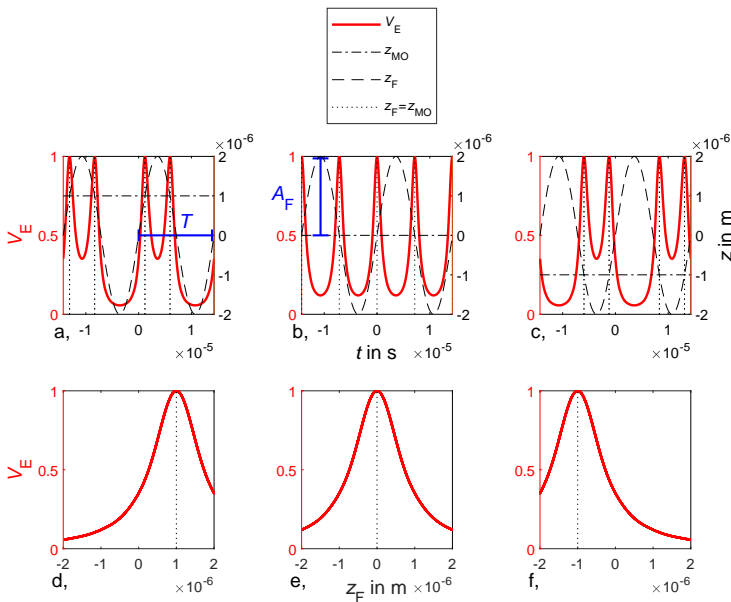


Bild 25: Signalentstehung eines fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors mit a-c: numerisch berechnetes, normiertes Eingangssignal V_E , modulierte Fokusposition z_F mit Fokusmodulationsamplitude A_F und Position des Positioniertisches z_{PT} in Abhängigkeit der Zeit t während der zweifachen Dauer einer Modulationsperiode T sowie d-f: Eingangssignal V_E in Abhängigkeit der modulierte Fokusposition z_F .

Befindet sich die axiale Position des Messobjektes z_{MO} innerhalb des axialen Fokusmodulationsbereichs ($2A_F$) passiert der modulierte Fokus z_F bei einer vollen axialen Schwingung, d.h. einer Auf- und einer Abwärtsbewegung,

während der Periodendauer T die zu messende Oberfläche z_{MO} genau zweimal (s. Abb. 25, a-c). Dies führt zur Detektion zweier Maxima des normierten Eingangssignals $V_E(t)$ zu den Zeitpunkten, an denen die modulierte Fokusposition gleich der Position der zu messenden Oberfläche $z_F(t) = z_{MO}(t)$ ist (s. a. Kap. 2.4.4). Aufgrund der sinusförmigen Fokusmodulation ist der zeitliche Abstand zwischen diesen Maxima äquidistant, wenn die Position des Messobjektes z_{MO} gleich der Position des Schwingungsmittelpunktes des Fokus und damit der Brennebene des Objektivs z_O ist (s. Abb. 25, b). Ist die Messfläche jedoch bezüglich dieser Ebene axial verschoben, ändert sich der zeitliche Abstand der maximalen Intensität, wie in Abbildung 25 in a und c dargestellt. Zusammen mit der Phaseninformation dieser Modulation (durch das Ansteuersignal der TAG-Linse) kann durch eine geeignete Signalverarbeitung aus diesem Eingangssignal ein eindeutiges Ausgangssignal, welches abhängig von der Position des Messobjektes z_{MO} bezüglich der Brennebene des Objektivs bei $z_O = 0$ ist, erzeugt werden. Deutlich wird dies auch, wenn die Intensität über die modulierte Fokusposition dargestellt wird (s. Abb. 25, d-f). Wie in Kapitel 3.6.2 gezeigt wird, kann die Signalverarbeitung auf Basis einer Lock-in-Verstärkung erfolgen, indem aus dem durch die Fokusmodulation erzeugten Eingangssignal $V_E(A_F \neq 0)$ verschiedene Ausgangssignale V_A generiert und durch eine Quotientenbildung normiert werden, sodass der Wert eines solchen Quotientensignals (z. B. $Q_{HI/M}$) Null wird, wenn sich das Messobjekt in der Brennebene des Objektivs befindet (bei $z_{MO} = 0$) und bei axialer Verschiebung approximativ linear ansteigt beziehungsweise abfällt (s. Abb. 26). Dieser lineare Bereich um den Arbeitspunkt ($K = 0$) kann schließlich als Kennlinie K genutzt werden, um bei einer lateralen Abtastung einer Oberfläche diese durch axiale Nachregelung der Positioniertischposition in der Brennebene des Mikroskopobjektivs, respektive dem Schwingungsmittelpunkt des modulierten Fokus zu halten, um so die Oberfläche durch eine einzige laterale Abtastung bei kontinuierlicher axialer Nachregelung zu erfassen (s. Abb. 26). Im Gegensatz dazu muss bei konventionellen konfokalen Systemen ohne Fokusmodulation, jede laterale Position des Messobjektes durch axiale Verschiebung des Positioniertisches um das Maximum des Eingangssignals $V_E(A_F = 0)$ abgestastet werden, um dieses Maximum durch eine entsprechende Auswertung zu ermitteln. Der durch die Fokusmodulation erzeugte axiale Kennlinienbereich liegt je nach verwendetem Mikroskopobjektiv und eingestellter Modulationsamplitude der Gradientenoptik im ein- bis dreistelligen μm -Bereich. Dies ist für eine aktive Nachregelung bei sich kontinuierlich ändernden Oberflächen ausreichend, jedoch erschwert dies die initiale Fokussuche. Weiterhin ist die visuelle Orientierung auf der zu messenden Oberfläche naturgemäß bei Punktsensoren schwierig. Wie in Abbildung 24 im linken Teil der Skizze dargestellt, wird daher eine flächenhafte, bildgebende Information über zwei

Strahlteiler (10 und 13) und eine Tubuslinse (14) mithilfe eines Bildsensors (15) erfasst. Durch eine zusätzliche Weißlichtquelle (23), wird für das bildgebende System eine Auflichtbeleuchtung erzeugt.

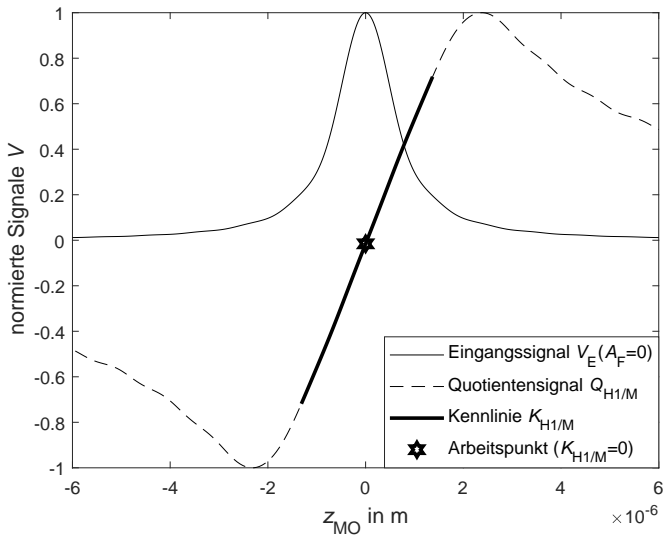


Bild 26: Vergleich des theoretischen Eingangssignals eines konventionellen Konfokalsensors $V_E(A_F = 0)$ mit dem Quotientensignal $Q_{H1/M}$ sowie der nutzbaren Kennlinie $K_{H1/M}$ eines im Folgenden näher erläuterten fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors.

Dazu wird das Licht dieser Quelle über einen Lichtwellenleiter (20) geleitet, durch eine Köhler'sche Beleuchtung (16-19) abgeblendet und kollimiert und über die Strahlteiler (10 und 13) sowie das Mikroskopobjektiv (11) auf die zu messende Oberfläche fokussiert. Neben der flächenhaften Erfassung des Messobjektes selbst wird vom Bildsensor (15) auch die konfokale Beleuchtung abgebildet. Demnach wird durch diese Anordnung neben dem konfokalen Prinzip auch ein Laserfokussensor realisiert (s. Kap. 2.4.2; S. 15) sowie die Möglichkeit zur Fokusvariation (s. Kap. 2.4.1; S. 14) gegeben. Dies vereinfacht die Suche der Brennebene des Objektivs sowie die visuelle Orientierung auf der Oberfläche wesentlich. Weiterhin könnte das System (bei deaktivierten TAG-Linse) mit der Weißlichtquelle bei Verwendung entsprechender Interferometrieobjektive auch als Weißlichtinterferometer sowie mit dem monochromatischen Laser in Kombination mit dem Flächensensor als phasenverschiebendes interferometrisches Mikroskop (s. Kap. 2.4.3; S. 17) verwendet werden.

3.5 Technische Realisierung

Die technische Realisierung des optischen Aufbaus sowie dessen Integration in eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM-1) ist in Abbildung 28 sowie in Zeichnung 29 dargestellt. [vgl. P1]

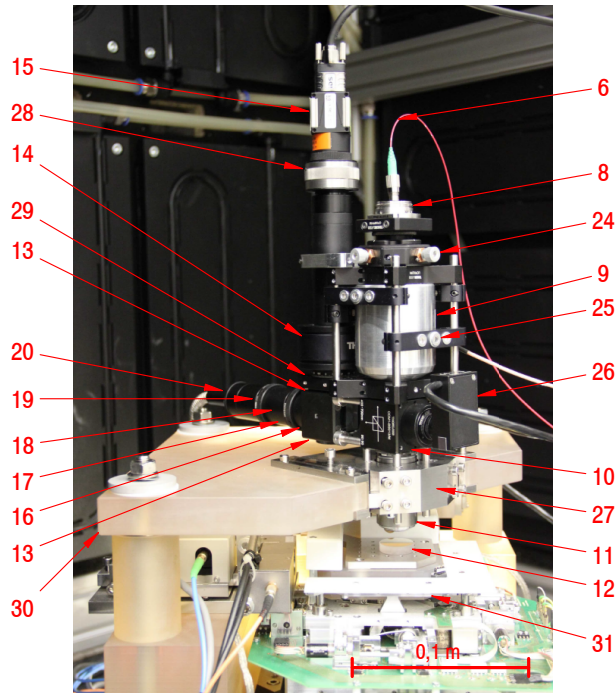


Bild 27: Technische Realisierung eines fokusbstandsmodulierten Konfokalsensors (Messkopf) mit: 6. Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 8. Kollimator; 9. modulierbarer Gradientenlinse; 10. Strahlteiler; 11. Objektiv; 12. Messobjekt; 13. Strahlteiler; 14. Tubuslinse; 15. Bildsensor; 16. Kondensator; 17. Leuchtfeldblende; 18. Kollektor; 19. Aperturblende; 20. Lichtwellenleiter; 24. laterale Positioniereinheit zur gemeinsamen Justage der Kollimationslinse und des Faserendes; 25. laterale Positioniervorrichtung der TAG-Linse; 26. Vier-Quadrantenphotodiode; 27. Sensoraufnahme; 28. axiale Positioniereinheit des Bildsensors; 29. Rotationsachse der Drehung des Bildsensors; 30. Sensorplatte des Nanokoordinatenmessgerätes und 31. Positioniertisch.

Der verwendete Helium-Neon-Laser (1) weist eine Wellenlänge von 632,8 nm bei einer Leistung von 21 mW auf. Die Modenreinheit der transversal-elektromagnetischen Mode TEM_{00} beträgt mehr als 95 %. Das Laserlicht mit einem Strahldurchmesser von 0,7 mm passiert direkt nach dem Austritt einen optischen Isolator und wird anschließend mithilfe einer um fünf Achsen (außer Rotation) justierbaren Sammellinse (3) mit einer effektiven Brennweite von 2 mm und einer numerischen Apertur von 0,5 in eine Singlemodefaser (6)

mit einem Kerndurchmesser von $3,5 \mu\text{m}$ eingekoppelt. Der Lichtwellenleiter (Abk. LWL) ist über spezielle FC-APC Stecker mit einem Schrägschliff mit der Anordnung verbunden, um Rückreflektionen am Fasertende zu minimieren. Weiterhin ist im LWL ein Strahlteiler (6) mit einem Teilungsverhältnis von $50 : 50$ integriert, sodass das reflektierte Licht am zweiten Fasereingang über eine Sammellinse (5) mit einer Avalanche-Fotodiode (4) gekoppelt werden kann. Dieser Detektor weist eine einstellbare Verstärkung auf, wobei je nach Verstärkungsfaktor eine Sättigung zwischen $8 \mu\text{W} - 80 \mu\text{W}$ bei 600 nm eintritt. Die maximal zulässige Leistung beträgt 1 mW . Nach Passieren des optischen Isolators, der Einkopplung in die Faser sowie der Strahlteilung in der Faser können an den beiden Ausgängen der Faser bei optimaler Justierung jeweils eine Laserleistung von 5 mW mithilfe eines optischen Leistungsmessgerätes (7) detektiert werden, womit neben der Strahlteilung im LWL etwa 50% Leistungsverluste durch die Einkopplung mit der Sammellinse (3) sowie durch den optischen Isolator (2) entstehen. [vgl. P1]

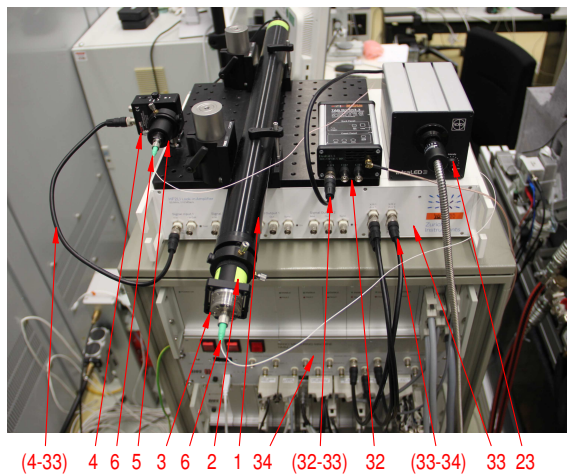


Bild 28: Technische Realisierung eines fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors mit: 1. Laserquelle; 2. optischer Isolator; 3. Sammellinse; 4. Photodiode; 5. Sammellinse; 6. optischer Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 23. Weißlichtquelle; 32. Steuerung der TAG-Linse und 34. Steuerung der Nanomessmaschine.

Unter der Annahme einer anschließend verlustfreien Ein- und Auskoppelung an den Linsen (5 u. 8) sowie verlustfreiem Passieren der Optiken (9-11) und einem exakt senkrecht zur optischen Achse stehendem Messobjekt (11) mit einem Reflektionskoeffizienten $R = 1$ würde demnach durch das zweimalige Passieren des Strahlteilerwürfels (10) sowie dem erneuten Passieren des fasergekoppelten Strahlteilers eine maximale Leistung von $5 / (2 \cdot 2 \cdot 2) \text{ mW} = 0,625 \text{ mW}$ am Detektor (4) ankommen können. Damit

liegt die theoretisch maximale Leistung in jedem Fall unterhalb der Schädigungsgrenze des Detektors. Unter Berücksichtigung von Ein- und Auskoppelverlusten können damit auch schlecht reflektierende Oberflächen noch erfasst werden. Gleichzeitig könnten bei der Messung gut reflektierender Oberflächen, welche zur Sättigung der Photodiode führten, die Leistung durch Dejustage der Einkopplung am Laser (3) beliebig reduziert werden. Der Kollimator (8) erzeugt mit einer effektiven Brennweite $f_K = 11$ mm einen kollimierten Strahl, der die Öffnungspupille des Objektivs $a_0 = 3,8$ mm gerade ausleuchtet. Das Mikroskopobjektiv weist eine 100fach Vergrößerung mit einer numerische Apertur $NA = 0,8$ und einem extra weiten Arbeitsabstand (engl. *extra long working distance*, Abk. ELWD) $WD = 4,5$ mm mit einer effektiven Brennweite $f_O = 2$ mm auf. [vgl. P1]

Zur visuellen Erfassung der Messobjektoberfläche stehen ein Farbsensor sowie ein monochromatischer Sensor mit jeweils einer Auflösung von 2048×1088 Pixel (2,23 MPixel) und einer maximalen Bildrate von 152 Bildern pro Sekunde zu Verfügung (15). Die Abbildung erfolgt hierbei über eine Tubuslinse (14) mit einer Brennweite von 200 mm. Um den Abstand zwischen der Tubuslinse (14) und dem Bildsensor (15) so einstellen zu können, dass die Abbildung der Schärfenebene des fokussierten Laserstrahls entspricht, ist weiterhin eine axiale Positioniereinheit (28) integriert. Weiterhin kann über eine fein justierbare Drehachse (29) die Rotation des Bildsensors um z derart eingestellt werden, dass die Zeilen und Spalten parallel zur x - und y -Achse der NMM sind. [vgl. P1]

Die LED-Weißlichtquelle (23) hat eine Farbtemperatur von 6000 K und einen Lichtstrom von 500 Lumen. Mit der Sensoraufnahme (27) [S3] kann der Sensor mit der Sensorplatte (30) des Nanokoordinatenmessgerätes verbunden werden. Die Klemmung der Rundstäbe, die wiederum fest mit dem Strahlteiler (10) verschraubt sind, erfolgt über 4 Passstifte und 8 Schrauben. Dadurch kann die axiale Sensorposition an die Höhe des Messobjektes angepasst werden.

Das Eingangssignal V_E wird von der Photodiode an den Lock-in-Verstärker übertragen (4-33) und die Steuerung der TAG-Linse (32) sendet ein Triggersignal um die Phase und Frequenz der Fokusmodulation zu übermitteln (32-33). Der Lock-in-Verstärker (33) überträgt nach der Signalverarbeitung die Ausgangssignale V_A an die DSP-Einheit der Nanomessmaschine (33-34). Für die nachfolgenden Simulationen und Unsicherheitsabschätzungen sind insbesondere die Abstände d_{KT} zwischen dem Kollimator (8) und der modulierbaren Gradientenoptik (9), d_{TO} zwischen der modulierbaren Gradientenoptik (9) und der Hauptebene des Mikroskopobjektiv (11) sowie d_O zwischen der Eintrittspupille und der Unterkante des Mikroskopobjektivs von Bedeutung (s. Abb. 29).

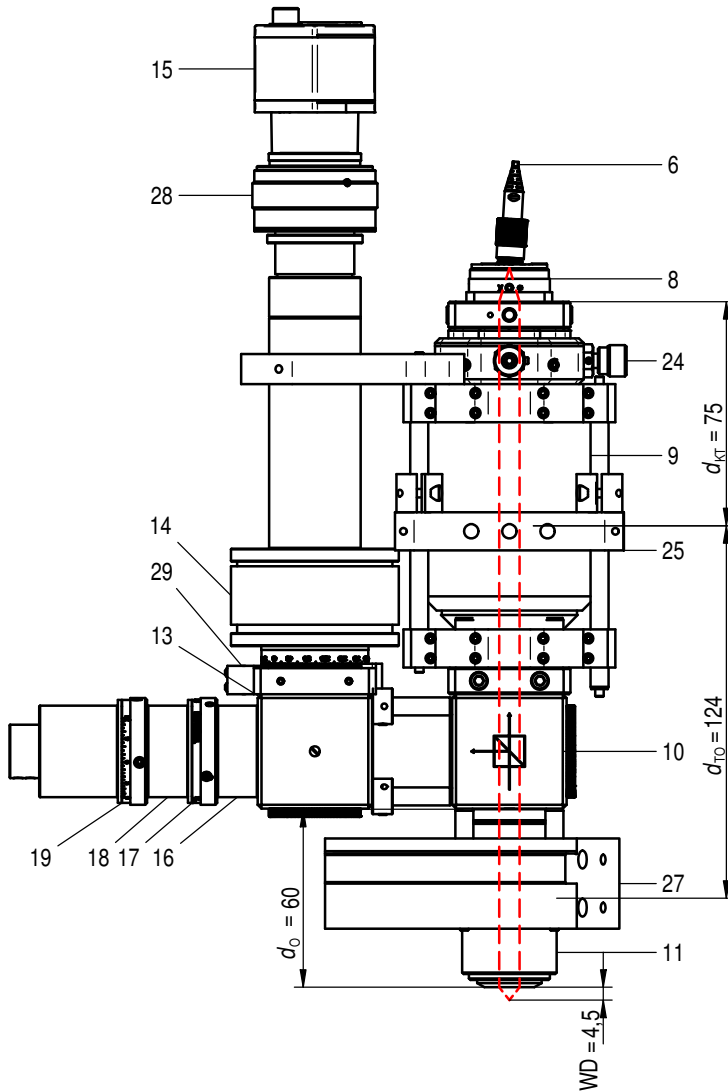


Bild 29: Technische Realisierung eines fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors mit: 6. Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 8. Kollimator; 9. modulierbare Gradientenlinse; 10. Strahlteiler; 11. Objektiv; 13. Strahlteiler; 10. Tubuslinse; 13. Strahlteiler; 14. Tubuslinse; 15. Bildsensor; 16. Kondensator; 17. Leuchtfeldblende; 18. Kollektor; 19. Aperturblende; 24. laterale Positioniereinheit zur gemeinsamen Justage der Kollimationslinse und des Faserendes; 25. laterale Positioniervorrichtung der TAG-Linse; 27. Sensoraufnahme [S₃]; 28. axiale Positioniereinheit des Bildsensors und 29. Rotationsachse zur Drehung des Bildsensors.

3.6 Signalanalyse und -verarbeitung

Die vom Detektor erfasste Intensität wird zunächst in ein proportionales Spannungssignal umgewandelt, welches im Folgenden schlicht als Eingangssignal V_E bezeichnet wird. Um aus diesem Eingangssignal die Information der Position des Messobjektes relativ zum Sensor zu erhalten, muss dieses mit einer geeigneten Signalverarbeitung ausgewertet werden. Das resultierende Signal soll fortan als Ausgangssignal V_A bezeichnet werden. Um diese Signalverarbeitung und Filterung des Eingangssignals adäquat auslegen zu können und um eine Prädiktion des Ausgangssignals zu ermöglichen, wird im Folgenden ein mathematisches Modell des Eingangssignals aufgestellt. Dabei wird zunächst das optische System ohne und anschließend mit Fokusmodulation betrachtet. Im Weiteren dient dieses Modell auch zur Abschätzung signifikanter Verursacher von Messabweichungen mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation.

3.6.1 Signalanalyse

Da die verwendeten Objektivs bezüglich Abbildungsfehlern bestmöglich korrigiert sind, wird das Auflösungsvermögen des vorliegenden Sensors vorrangig durch Beugung begrenzt. Folgende theoretische Betrachtungen lassen sich daher nur durch die Wellenoptik bzw. vereinfacht durch die Fourieroptik erklären.

Das von Jean Baptiste Joseph Baron de Fourier formulierte und nach ihm benannten Fourier-Theorem, dass sich eine Funktion $f(x)$ mit einer räumlichen Periode λ aus harmonischen Funktionen zusammensetzen lässt, deren Wellenlängen ganzzahlige Bruchteile von λ sind, bildet dabei die Grundlage der Fourier-Optik [159]. Nach der Fraunhofer-Näherung lässt sich das allgemeine Kirchhoff'sche Beugungsintegral im Fernfeld als eine optische Fourier-Transformierte der Blendenfunktion approximieren [160]. Die Grundlagen dieser Theorie sind beispielsweise in [160], ausführlicher in [161] sowie speziell für die Konfokalmikroskopie in [90, 92, 162, 163] und fasergekoppelte konfokale Systeme in [93, 96, 164] zu finden.

Nach [90] lässt sich damit zunächst die normierte, dimensionslose Intensität $I(u)$ eines idealen Konfokalmikroskops für einen punktförmigen Reflektor mit infinitesimal kleiner Beleuchtungs- und Detektionsblende beschreiben durch:

$$I_{\text{Punkt}}(u) = \frac{\sin^4(u/4)}{(u/4)^4} \quad (9)$$

sowie für einen flächigen ebenen Reflektor durch:

$$I_{\text{Ebene}}(u) = \frac{\sin^2(u/2)}{(u/2)^2}, \quad (10)$$

mit der normierten, optischen, axialen Koordinate

$$u = (8\pi/\lambda)z \sin^2(\alpha/2) \quad (11)$$

und dem halben Öffnungswinkel des Objektivs

$$\alpha = \text{asin}(\text{NA}_O)/n_i, \quad (12)$$

wobei:

z der axiale Abstand des Messobjektes zum Fokus (Messobjekt-Fokus-Abstand),

λ die Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle,

NA_O die numerische Apertur des verwendeten Objektivs und

n_i die Brechzahl des Immersionsmediums ist (hier: Luft $n_i = 1$).

Durch Substitution in den Gleichungen 9 und 10 mit 11 lassen sich die Intensität in Abhängigkeit der z -Position durch

$$I_{\text{Punkt}}(z) = \frac{\sin^4 [((8\pi/\lambda)z \sin^2(\alpha/2))/4]}{([(8\pi/\lambda)z \sin^2(\alpha/2)]/4)^4} \quad (13)$$

bzw.

$$I_{\text{Ebene}}(z) = \frac{\sin^2 [((8\pi/\lambda)z \sin^2(\alpha/2))/2]}{([(8\pi/\lambda)z \sin^2(\alpha/2)]/2)^2} \quad (14)$$

darstellen. Weiterhin sei angenommen, dass ein detektierbares Eingangssignal proportional zur Intensität I sei mit

$$V_E(z) = R(x, y) \cdot w \cdot I(z), \quad (15)$$

wobei R eine Funktion der Reflexionseigenschaft und Neigung in Abhängigkeit der lateralen Position (x, y) der detektierten Oberfläche sei und bei einem idealen, planen Spiegel $R = 1$ gelte und w eine Konstante für das lineare Übertragungsverhalten der elektrischen Wandlung darstellt.

Mit den Gleichungen 12-15 lassen sich damit die in Abbildung 30 dargestellten idealen Eingangssignale $V_{E,\text{Punkt}}$ und $V_{E,\text{Ebene}}$ für einen punktförmigen und einen planaren Reflektor ermitteln. Zum Vergleich wurden bei ausgeschalteter TAG-Linse, 25 Wiederholmessungen des Spannungssignals der Pho-

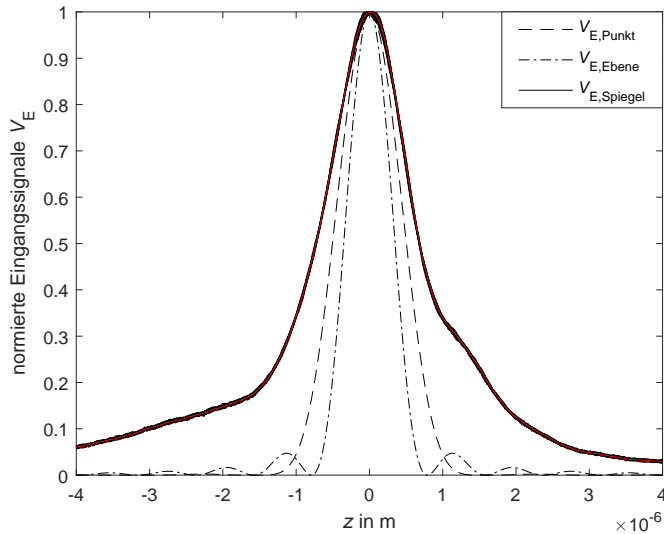


Bild 30: Numerisch berechnete, normierte Eingangssignale V_E eines ideal punktförmigen und ebenen Reflektors mit $R = 1$, sowie einem Mittelwertsignal aus 25 Wiederholmessungen mit einem 100x Mikroskopobjektiv $NA_O = 0,8$ auf einem Goldspiegel mit einer maximalen Ebenheitsabweichung von $\lambda/10$.

todiode auf einem Goldspiegel bei kontinuierlicher Abtastung durch axiale Verschiebung des Positioniertisches durchgeführt und der Mittelwert hierüber bestimmt (s. Abb. 30; $V_{E,Spiegel}$). Augenscheinlich besteht eine deutliche Diskrepanz bezüglich der Form und der Halbwertbreite zwischen theoretischem und gemessenem Signal. Im theoretischen Modell nach [90] wird von einer infinitesimal kleinen Blende ausgegangen, die in einem realen optischen Modell jedoch dazu führen würde, dass kein Licht mehr hindurchkommt. In dem vorliegenden Aufbau ist die Blendengröße durch den Kerndurchmesser des Lichtwellenleiters vorgegeben. Weiterhin ergibt sich aus der Verwendung einer Faser ein gaußförmig radialer Intensitätsverlauf. Um ein besseres Modell der Signalentstehung zu erhalten, müssen daher weitere Parameter des optischen Systems berücksichtigt werden. Dabei lässt sich die Abbildung des optischen Systems auch durch eine optische Transferfunktion (Abk. OTF) bzw. im vorliegenden Fall durch eine kohärente Transferfunktion (engl. *coherent transfer function*, Abk. CTF) beschreiben [160]. Die Grundlagen hierzu lassen sich in [160], ausführlicher in [161] sowie speziell für die Konfokalmikroskopie in [90] finden.

Für das vorliegende optische System ist eine Herleitung der CTF aus [93, 96, 164] bekannt, deren experimentelle Validierung in [97] erfolgte, wobei alle relevanten optischen Elemente in Abbildung 31 skizziert sind.

Nach [93] kann, unter der Annahme eines gaußförmigen Strahlprofils innerhalb der Faser, respektive am Faseraustritt, die normierte Intensität I eines ideal planaren Spiegels, respektive einer radialen Ortsfrequenz ($L = 0$), in Abhängigkeit der optischen Koordinate u ermittelt werden, gemäß:

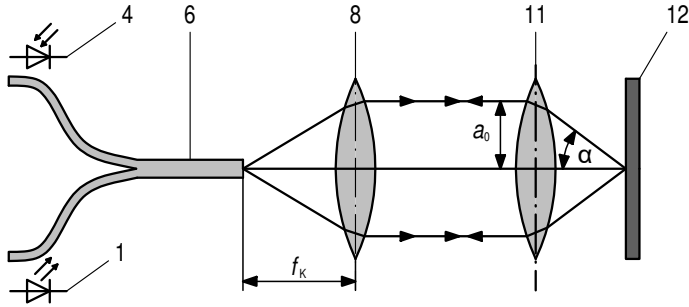


Bild 31: Schematische Darstellung des Strahlengangs eines konventionellen fasergekoppelten Konfokalsensors mit: 1. Laserquelle; 4. Fotodiode; 6. Faser mit Strahlteilung; 8. Kollimationslinse; 11. Objektiv; 12. Messobjekt; Brennweite der Kollimationslinse f_K ; halber Öffnungswinkel des Objektivs α und Radius der Eintrittspupille des Objektivs a_0 [in Anlehnung an 93].

$$I(u) = |c(L = 0, u)|^2 = \left| \frac{A \{1 - \exp[-(A - iu)]\}}{[1 - \exp(-A)](A - iu)} \right|^2 = c_r^2 + c_i^2 \quad (16)$$

mit den realen und imaginären Anteilen der axialen kohärenten Transferfunktionen (vgl. Abb. 32)

$$c_r(0, u) = \frac{\{A[1 - \exp(-A)]\cos u\} + \exp(-A)u \sin u\} A}{(A^2 + u^2)[1 - \exp(-A)]}, \quad (17)$$

$$c_i(0, u) = \frac{\{u[1 - \exp(-A)]\cos u\} + \exp(-A)A \sin u\} A}{(A^2 + u^2)[1 - \exp(-A)]} \quad (18)$$

und dem dimensionslosen Parameter

$$A = (2\pi a_0 r_0 / (\lambda f_K))^2, \quad (19)$$

mit dem Radius der Öffnungspupille des Objektivs a_o , dem Modenradius r_0 und der Brennweite der Kollimationslinse f_K . Nach [93] ist weiterhin

$$r_0 = \frac{\rho}{\sqrt{(2 \ln(P))}} \quad (20)$$

mit dem Kernradius der Faser ρ und dem dimensionslosen, faserspezifischen Parameter nach [165]

$$P = \frac{2\pi \rho NA_F}{\lambda}. \quad (21)$$

mit der numerischen Apertur der Faser NA_F .

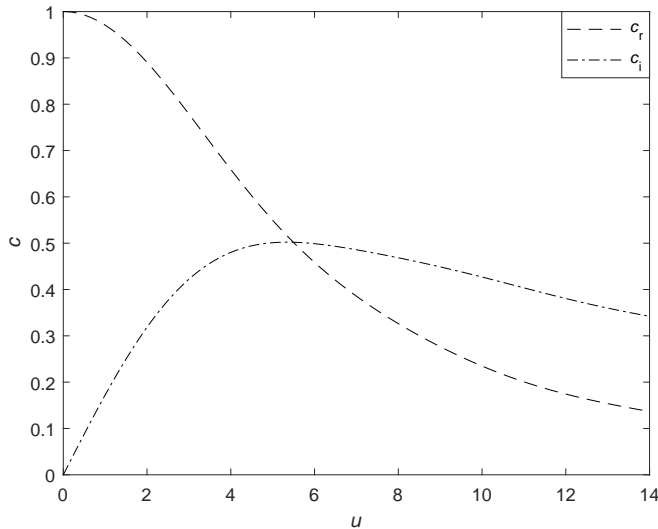


Bild 32: numerische Berechnung der kohärenten Transferfunktion mit dem realen Anteil c_r und dem imaginären Anteil c_i , mit $A = 5,5$ nach [93].

Für den theoretischen Fall einer idealen Punktquelle für die Beleuchtungs- und Detektionsblende mit $A = 0$ gilt wiederum Gleichung 10. Durch Einsetzen der Werte und Substitution der normierten axialen Koordinate aus Gleichung 11 ergeben sich mit Gleichung 16 die in Abbildung 33 gezeigten numerisch ermittelten, normierten Ausgangssignale.

Beim Vergleich der numerisch ermittelten mit den gemessenen Werten wird deutlich, dass das Modell nach [93] im Rahmen der Unsicherheiten der genannten Parameter mit den gemessenen Werten übereinstimmt, sodass dieses für die folgende theoretische Modellbildung mit Fokusmodulation bei

eingeschalteter TAG-Linse verwendet wird.

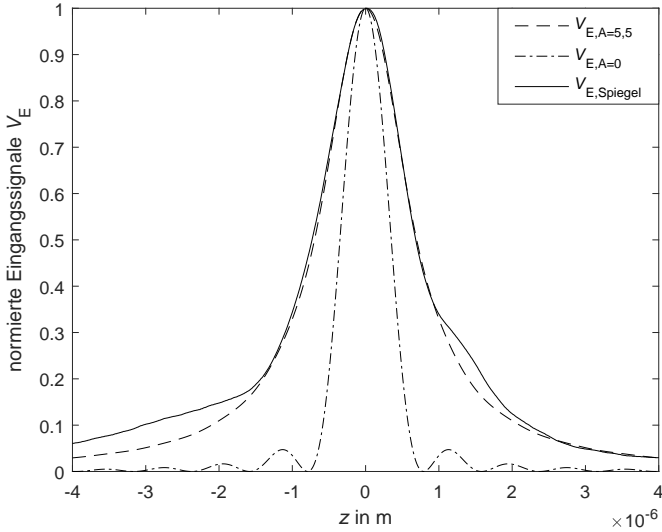


Bild 33: Numerisch berechnete, normierte Eingangssignale V_E eines fasergekoppelten, konfokalen Systems auf einem ideal planaren Spiegel nach [93], mit $NA_O = 0,8$, $A = 5,5$ sowie Mittelwertsignal aus 25 Wiederholmessungen mit einem 100-fach Mikroskopobjektiv auf einem Goldspiegel mit einer maximalen Ebenheitsabweichung von $\lambda/10$ über die axiale Position z .

Da im genutzten Positioniersystem im Gegensatz zu konventionellen Koordinatenmessgeräten der Sensor fest steht und der Positioniertisch und damit das Messobjekt bewegt wird, werden alle Koordinaten im Folgenden relativ zur Fokusebene des Objektivs angegeben. Wird der Positioniertisch mit konstanter Geschwindigkeit v_{PT} in $+z$ -Richtung bewegt gilt für die relative axiale Position des Messobjektes zur Fokusebene des Objektivs (Messobjektposition):

$$z_{MO} = v_{PT} t, \quad (22)$$

wobei $t = 0$ bzw. $z = 0$ gelte, wenn sich das Messobjekt im Fokus befindet. Für eine hypothetische Geschwindigkeit $v_{PT} = 0,05$ m/s ergibt sich mit Gleichung 22 die in Abbildung 34 oben gestrichelt dargestellte Messflächenposition. Dies entspricht auch der relativen Position des Messobjektes zum Fokus der Beleuchtung, bei ausgeschalteter TAG-Linse. Die Geschwindigkeit wurde hier zur besseren grafischen Veranschaulichung unrealistisch hoch gewählt und liegt bei realen Messungen im Bereich weniger $\mu\text{m/s}$, sodass die

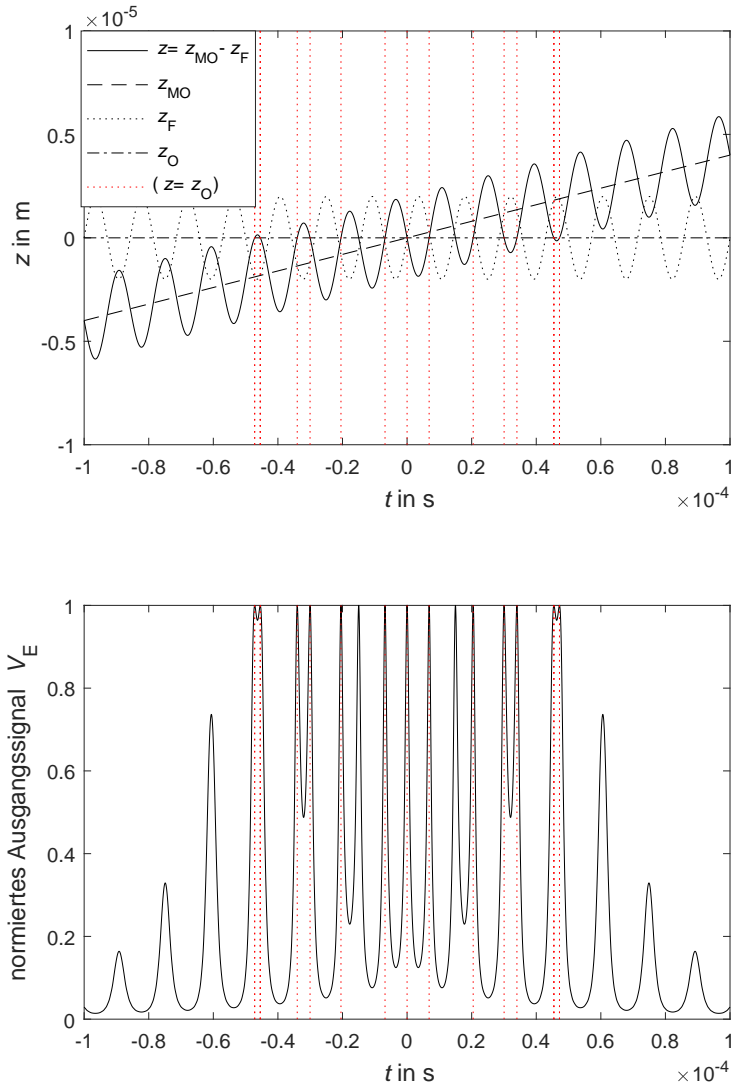


Bild 34: Numerische Berechnung der relativen Fokusposition und des Eingangssignals bei vernachlässigbarem Abstand zwischen TAG-Linse und Objektiv; oben, Messobjekt-Fokus-Abstand z ; Messobjektposition z_{MO} ; modulierte Fokusposition z_F ; Fokusebene des Objektivs z_O sowie unten, normiertes Eingangssignal V_E , mit $v_{PT} = 0.05$ m/s, $v_T = 70$ kHz und $A_T = 0.5$ m $^{-1}$.

Fokusschwingung wesentlich schneller als die axiale Tischbewegung erfolgt. Ist der Abstand zwischen dem Mikroskopobjektiv und der TAG-Linse d_{TO} im Vergleich zur Brennweite der TAG-Linse gering, kann zur Bestimmung der Fokusmodulationshöhe zunächst vereinfacht angenommen werden, dass es sich um ein Linsensystem handelt, dessen gesamte Brechkraft gleich der Summe der Einzelbrechkraften ist

$$D_G = D_O + D_T \quad (23)$$

mit einer sinusförmigen Modulation der Brechkraft der TAG-Linse

$$D_T(t) = A_T \sin(2 \pi t \nu_T), \quad (24)$$

wobei A_T die Amplitude der Brechkraftmodulation der TAG-Linse und ν_T die Modulationsfrequenz darstellen sowie der Brechkraft des Objektivs

$$D_O = \frac{1}{f_O} \quad (25)$$

mit der Brennweite f_O des Objektivs. Damit ist die Amplitude der Fokusmodulation A_F , welche gerade der Hälfte des axialen Scanbereichs entspricht, gegeben durch:

$$A_F = \frac{1}{D_O} - \frac{1}{(D_O + A_T)}. \quad (26)$$

Somit ist die relative Position des modulierten Fokus bezüglich der Brennebene des Objektivs (modulierte Fokusposition)

$$z_F = A_F \sin(2 \pi t \nu_T), \quad (27)$$

womit die relative Position des Messobjektes bezüglich der modulierten Fokusposition (Messobjekt-Fokus-Abstand) gegeben ist durch:

$$z = z_{MO} - z_F = \nu_{PT} \cdot t - A_F \sin(2 \pi t \nu_T). \quad (28)$$

Durch Einsetzen der Werte aus Gleichung 28 in Gleichung 11 und Substitution der normierten axialen Koordinate u in Gleichung 16 ergibt sich mit den oben ermittelten Parametern das in Abbildung 34 numerische berechnete Eingangssignal V_E . Die Zeitpunkte der maximalen Intensitäten (s. rote gepunktete Linien) ergeben sich damit, wenn der Messobjekt-Fokus-Abstand der Fokusebene des Objektivs entspricht ($z = z_O$) bzw. wenn die modulierte Fokusposition gleich der Messobjektposition ist ($z_F = z_{MO}$). Damit ergibt sich mit der Information der Phase der Modulation eine charakteristische

Signalform, der zu jedem Zeitpunkt mithilfe einer entsprechenden Signalverarbeitung eine eindeutige Position zugeordnet werden kann.

Ist der Abstand d_{TO} zwischen der TAG-Linse und dem Mikroskopobjektiv durch die Einbringung optischer Elemente, wie beispielsweise einem Strahlteiler nicht zu vernachlässigen (s. Abb. 35), lässt sich die Fokusmodulation auch beschreiben, indem mithilfe der geometrischen Optik [z. B. nach 160] die Bild- und Gegenstandsweiten aller optischen Elemente bestimmt werden. Damit ergibt sich zunächst die Bildweite der Kollimationslinse

$$b_K = \frac{1}{\frac{1}{f_K} - \frac{1}{g_K}} \quad (29)$$

mit der Brennweite der Kollimationslinse f_K und der Gegenstandsweite g_K .

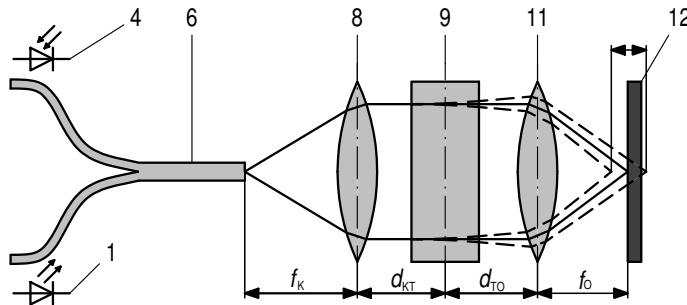


Bild 35: Schematische Darstellung des Strahlengangs eines fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors mit: 1. Laserquelle; 4. Fotodiode; 6. Faser mit Strahlteilung; 8. Kollimationslinse; 5. TAG-Linse; 11. Objektiv; 12. Messobjekt; Brennweite des Kollimationslinse f_K ; Abstand zwischen Kollimationslinse und TAG-Linse d_{KT} ; Abstand zwischen TAG-Linse und Objektiv d_{TO} und Brennweite des Objektivs f_O .

Daraus folgt die Gegenstandsweite der TAG-Linse

$$g_T = d_{KT} - b_K \quad (30)$$

mit dem Abstand d_{KT} zwischen der Kollimations- und der TAG-Linse. Für die Bildweite der TAG-Linse gilt wiederum

$$b_T(t) = \frac{1}{D_T(t) - \frac{1}{g_T}} \quad (31)$$

Somit ist die Gegenstandsweite des Objektivs

$$g_O(t) = d_{TO} - b_T(t) \quad (32)$$

mit dem Abstand d_{TO} zwischen der TAG-Linse und dem Objektiv. Damit ist die Bildweite des Objektivs

$$b_O(t) = \frac{1}{\frac{1}{f_O} - \frac{1}{g_O(t)}} \quad (33)$$

und schließlich die modulierte Fokusposition:

$$z_F(t) = f_O - b_O(t) \quad (34)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 24 und 29 bis 75 in 34 ergibt sich die allgemeine Form gemäß:

$$z_F(t) =$$

$$f_O - \left(f_O^{-1} - \left(d_{TO} - \left(A_T \sin(2\pi t \nu_T) - (d_{KT} - (f_K^{-1} - g_K^{-1})^{-1})^{-1} \right)^{-1} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (35)$$

Diese Form wird insbesondere für nachfolgende Monte-Carlo-Simulationen benötigt, bei denen thermisch bedingte Ausdehnungen und damit auch Abstandsänderungen zwischen Faserende und Kollimationslinse Δd_{FK} sowie zwischen Kollimationslinse und TAG-Linse Δd_{KT} simuliert und analysiert werden. Für die Ermittlung der Kennlinien kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei richtiger Justierung der optischen Anordnung und folglich einer kollimierten Beleuchtung die Gegenstandsweite der Kollimationslinse gleich der Brennweite der Kollimationslinse ($g_K = f_K$) ist, womit die Abbildung im Unendlichen

$$\lim_{g_K \rightarrow f_K} b_K = \infty \quad (36)$$

liegt. Mit Gleichung 30 geht die Gegenstandsweite der TAG-Linse gegen minus unendlich

$$\lim_{b_K \rightarrow \infty} g_T = -\infty \quad (37)$$

und es gilt

$$\lim_{g_T \rightarrow -\infty} \frac{1}{g_T} = 0. \quad (38)$$

Damit lässt sich Gleichung 31 für die Bildweite der TAG-Linse vereinfacht formulieren

$$b_T(t) = \frac{1}{D_T}. \quad (39)$$

womit das Ausgangssignal unabhängig vom Abstand der Kollimationslinse zur TAG-Linse d_{KT} ist. Gleichung 35 lässt sich für diesen Fall vereinfachen

$$z_F(t, g_K = f_K) = f_O - \frac{1}{\frac{1}{f_O} - \frac{1}{d_{TO} - \frac{1}{A_T \sin(2\pi t \nu_T)}}}. \quad (40)$$

Damit ergibt sich der in Abbildung 36 oben dargestellte Verlauf des Messobjekt-Fokus-Abstands z in Abhängigkeit der Messobjektposition z_{MO} sowie der modulierten Fokusposition z_F zur Brennebene des Objektivs z_O .

3 Fokusmodulierte Konfokalsensoren

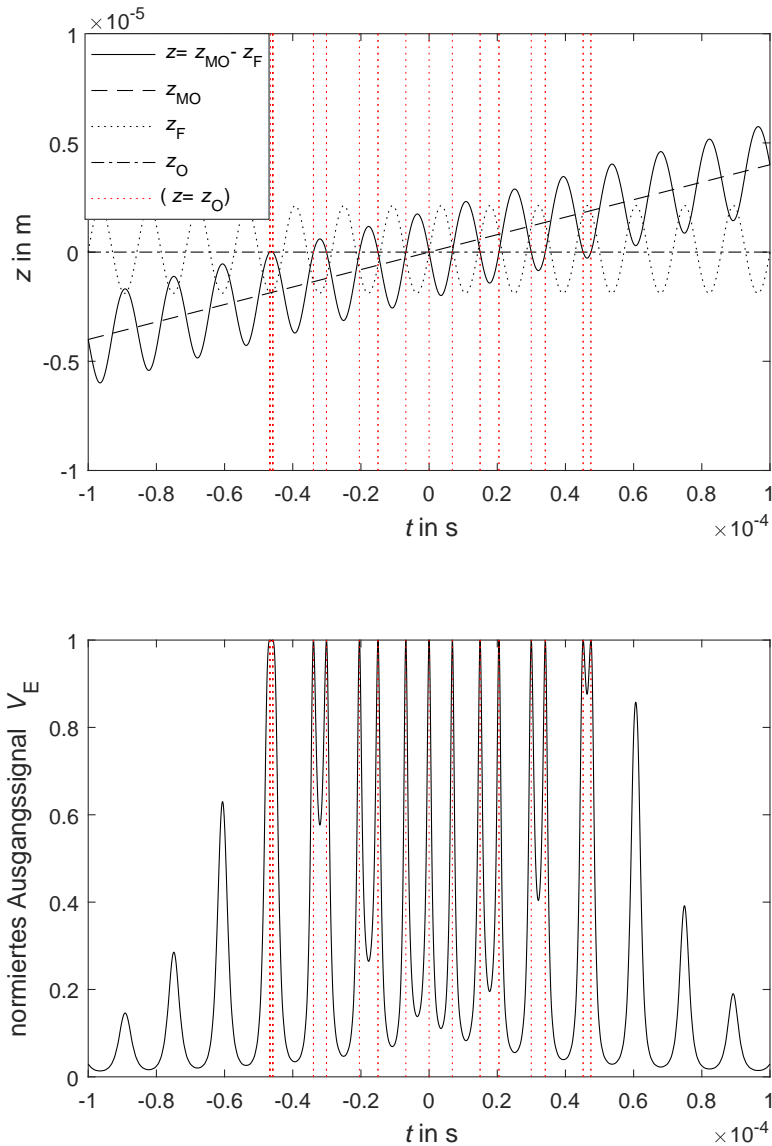


Bild 36: Numerische Berechnung der relativen Fokusposition und des Eingangssignals; oben, Messobjekt-Fokus-Abstand z ; Messobjektposition z_{MO} ; modulierte Fokusposition z_F ; Fokusebene des Objektivs z_O sowie unten, normiertes Eingangssignale V_E , mit $v_{PT} = 0.05$ m/s, $v_T = 70$ kHz und $A_T = 0.5$ m $^{-1}$, $f_O = 2$ mm und $d_{TO} = 124$ mm.

3.6.2 Signalverarbeitung

Eine Signalverarbeitung eines in axialer Richtung periodisch schwingenden Messobjektes in einem konfokalen Systems auf Basis einer Lock-in-Verstärkung wurde erstmals in [102] gezeigt. Um eine Auswertung unabhängig von den Reflexionseigenschaften und Neigung der Oberfläche zu erhalten, wurde eine inverse Fouriertransformation nach [166] verwendet. Eine weitere Normierung durch Quotientenbildung der harmonischen Signale einer Lock-in-Verstärkung wurde in [P1] vorgestellt. Diese wurde um ein normiertes Signal zur von den Reflexionseigenschaften unabhängigen Festlegung des Kennlinienbereichs erweitert und mithilfe einer FPGA-basierten Signalverarbeitung umgesetzt [P2]. Die Nutzung zur axialen Nachregelung der z-Position des Positioniertisches eines Nanokoordinatenmessgeräts wurde in [P3] gezeigt. Diese Signalverarbeitung wird hier ausführlich diskutiert, die im Folgenden als Ausgangssignale V_A bezeichneten Signale dieser Signalverarbeitung werden numerisch mithilfe des im vorangegangenen Kapitel 3.6.1 beschriebenen Eingangssignals V_E simuliert und die Ergebnisse werden mit realen Messungen verglichen. Damit lassen sich die theoretischen Residuen der polynomialen Regression eines idealen, abweichungsfreien Ausgangssignals sowie die notwendige Ordnung der Regression ermitteln. Darauf aufbauend wird eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, die weitere Einflüsse wie Interferenzen und Signalrauschen enthält, um signifikante, zu Messabweichungen führende Einflüsse abschätzen zu können.

Lock-in-Verstärker sind seit den 1930er Jahren bekannte [167–169] phasempfindliche Verstärker, mit denen sehr schwache Wechsignale detektiert werden können. Ermöglicht wird dies durch eine Modulation des zu messenden Signals mit einem Referenzsignal V_R der gleichen Frequenz ν_R und Phase ϕ und anschließender Integration. Damit stellt eine Lock-in-Verstärkung eine extrem schmalbandige Bandpassfilterung dar, bei der effektiv nur phasengleiche Signale mit gleicher Frequenz verstärkt werden. Parasitäre Störfrequenzen werden gefiltert. Dadurch wird ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (engl. *signal to noise ratio*, Abk. SNR) ermöglicht. Verbal formuliert, besteht die hier verwendete Lock-in-Verstärkung aus einer Mittelung der partiellen Integration über ein ganzzahliges Vielfaches n der Periodendauer T über die Multiplikation des Eingangssignals V_E mit einem Referenzsignal V_R . Damit ergibt sich das Ausgangssignal:

$$V_A(t^*) = \frac{S}{nT} \int_{t^*-nT}^{t^*} V_E(t) \cdot V_R(t) dt \quad (41)$$

mit der Periodendauer

$$T = 1/\nu_{TAG} \quad (42)$$

sowie einem Verstärkungsfaktor S . Als Referenzsignal wird standardmäßig eine Sinusschwingung mit der gleichen Phase und Frequenz wie das Anregungssignal der modulierbaren Gradientenoptik verwendet oder einem ganzzahligen Vielfachen hiervon, auch Harmonische k -ter Ordnung genannt (Abk. Hk)

$$V_{R,Hk} = \sin(2\pi t \nu_{R,Hk} + \phi_{R,Hk}), \quad (43)$$

mit der Referenzfrequenz

$$\nu_{R,Hk} = k \cdot \nu_T. \quad (44)$$

Anders als bei gewöhnlichen Lock-in-Verstärkungen, bei denen die Form des detektierten Eingangssignals (meist sinusförmig) der Form des Referenzsignals entspricht, sollte hier auch die Integration phasengleich zum Referenzsignal erfolgen, mit

$$t^* = \{bT \mid b \in \mathbb{Z}\}, \quad (45)$$

wobei b ein Zähler ist, der die Nummer des Ausgangssignals kennzeichnet. Bei dem vorliegenden Signal kann diese Bedingung vernachlässigt werden, wenn die Intergrationszeit wesentlich größer als die Periodendauer T ist. Grafisch veranschaulicht ergeben sich damit die in Abbildung 37 dargestellten Signalverläufe für $k = 1$. Eine übersichtliche Darstellung für alle im Folgenden genannten Signale befindet sich am Ende des Kapitels in Abbildung 52.

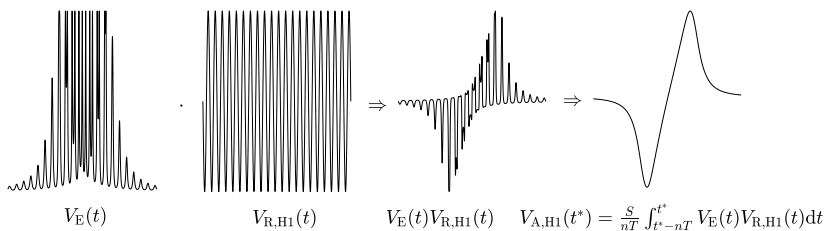


Bild 37: Grafische Veranschaulichung der Entstehung des Ausgangssignals $V_{A,H1}$ durch Multiplikation des Eingangssignals V_E mit dem Referenzsignal $V_{R,H1}$ und anschließender partieller Integration über den Zeitraum nT .

Deutlicher wird die Signalverarbeitung bei Betrachtung von Abbildung 38 mit $k = 1$, $n = 1$ und $\phi_{R,H1} = 0$ (s. a. Abb. 52). Die graue Fläche unter der Kurve der Multiplikation des Eingangssignals V_E mit dem Referenzsignal $V_{R,H1}$ entspricht dem Integral aus Gleichung 41 und das Ausgangssignal $V_{A,H1}$ der Summierung aus der partiellen Integration über den Zeitraum nT zu den Zeitpunkten bT . Die Latenz T_L des Ausgangssignals entspricht folglich unter Vernachlässigung der Verarbeitungszeit der halben Intergrationszeit

$$T_L = \frac{1}{2}nT. \quad (46)$$

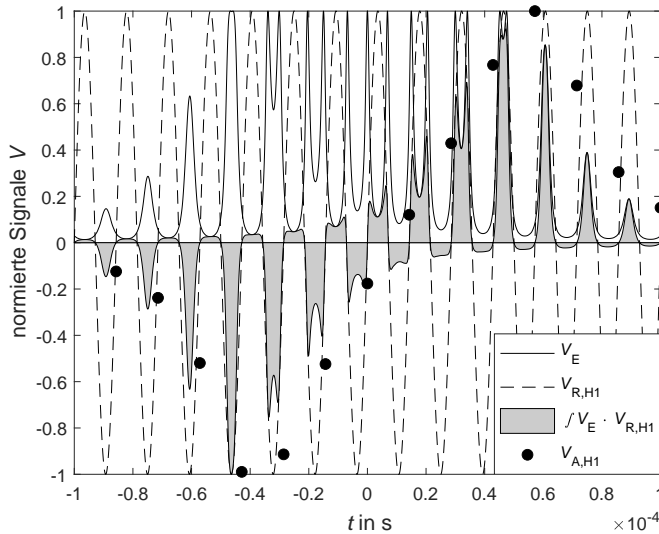


Bild 38: Numerisch berechnetes Eingangssignals V_E , Referenzsignal $V_{R,H1}$, Integration über die Multiplikation des Eingangssignals mit dem Referenzsignal $\int V_E V_{R,H1}$ sowie das resultierende Ausgangssignal $V_{A,H1}$ dargestellt über die Zeit t mit $n = 1$.

Analog zu dem in Abbildung 38 dargestellten Ausgangssignal $V_{A,H1}$ der Modulation mit der 1. harmonischen Referenzfrequenz bzw. Grundfrequenz lassen sich mit den Gleichungen 41 - 46 die in den Abbildungen 39 und 40 dargestellten Ausgangssignale $V_{A,H2}$ und $V_{A,H3}$ mit der 2. und 3. Harmonischen bestimmen mit $k = 2$ bzw. $k = 3$, $n = 1$ und den Phasenverschiebungen

$\phi_{R,H2} = \pi/2$ und $\phi_{R,H3} = 0$. Alternativ kann damit die Referenzfrequenz der 2. Harmonischen auch als Cosinusfunktion beschrieben werden, gemäß:

$$V_{R,H2} = \cos(2 \pi t \nu_{R,H2}). \quad (47)$$

Ohne die Phasenverschiebung der 2. harmonischen Grenzfrequenz wäre das Ausgangssignal stets null.

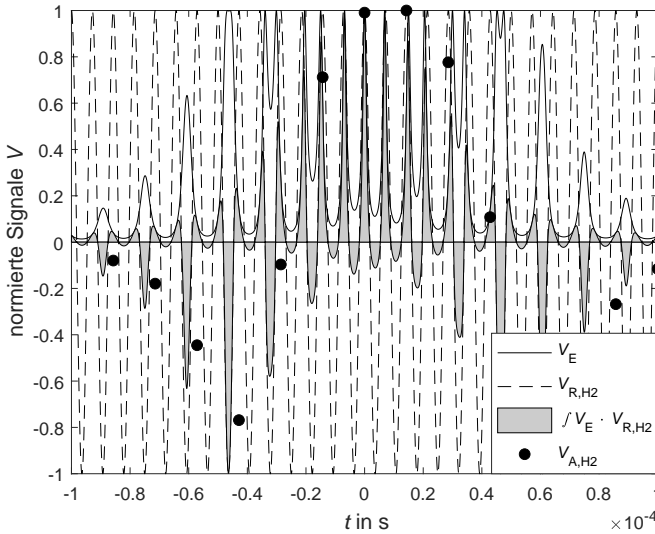


Bild 39: Numerisch berechnetes Eingangssignal V_E , Referenzsignal $V_{R,H2}$, Integration über die Multiplikation des Eingangssignals mit dem Referenzsignal $\int V_E V_{R,H2}$ sowie das resultierende Ausgangssignals $V_{A,H2}$ über die Zeit t mit $n = 1$.

Bei Betrachtung der in den Abbildungen 38 und 40 dargestellten Ausgangssignale für die 1. und 3. Harmonische wird ersichtlich, dass diese gerade dann Null werden, wenn sich die zu messende Oberfläche in der Fokusebene des Objektivs befindet (hier bei $t = 0$) und dass es einen Bereich davor und danach gibt, in dem die beiden Ausgangssignale nahezu linear ansteigen bzw. abfallen (s. a. Abb. 52). Bei dem Ausgangssignal für die 1. Harmonische entspricht dieser Bereich näherungsweise dem axialen Fokusmodulationsbereich $2 A_F$ und dem für die 3. Harmonische der Hälfte der Fokusmodulationshöhe. Damit läge die Annahme nahe, dieser lineare Bereich ließe sich als Kennlinie nutzen, wobei der Arbeitspunkt in den Nulldurchgang gelegt würde. Die Anstiege der Kennlinien sind jedoch von der Reflektivität der Messobjektoberflächen abhängig, wie nachfolgend gezeigt wird. Weiterhin ist zunächst auch zu erkennen, dass das Signal der 1. harmonische Verstärkung ebenfalls gegen Null läuft, wenn sich die Oberfläche gänzlich außerhalb

der Fokusmodulationsbereichs befindet und dass es bei dem Signal der 3. harmonischen Verstärkung zusätzlich noch einen weiteren Nulldurchgang am Rand des Fokusmodulationsbereichs gibt. Damit ist mit diesen Signalen alleine keine eindeutige Zuordnung des Signalwertes zu einem Höhenwert möglich. Das Ausgangssignal für die 2. Harmonische hingegen weist einen maximalen Wert bei $t = 0$ auf und fällt beidseitig jeweils überproportional ab. Der Kennlinienbereich lässt sich demnach durch eine Schwellwertermittlung anhand des Signals für die 2. Harmonische festlegen (s. a. Abb. 52). In Abbildung 41 sind die nach den obenstehenden Gleichungen simulierten Ausgangssignale $V_{A,Hk,sim}$ mit einer Modulationsamplitude der modulierbaren Gradientenoptik von $A_T = 0,55$ dpt dargestellt, womit sich eine mittlere Modulationsamplitude des Fokus von $A_F = 2,2 \mu\text{m}$ ergibt.

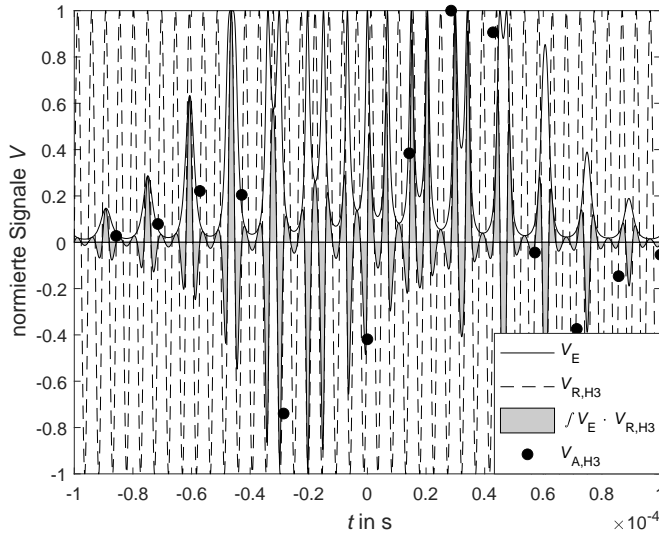


Bild 40: Numerisch berechnetes Eingangssignal V_E , Referenzsignal $V_{R,H3}$, Integration über die Multiplikation des Eingangssignals mit dem Referenzsignal $\int V_E V_{R,H3}$ sowie das resultierende Ausgangssignals $V_{A,H3}$ über die Zeit t mit $n = 1$.

Zum Vergleich sind beispielhafte, mit dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Aufbau des Sensors an einem Spiegel gemessene Ausgangssignale $V_{A,Hk,mess}$ illustriert. Es lässt sich zunächst erkennen, dass das Modell des Eingangssignals sowie die theoretische Signalverarbeitung mit den gemessenen Daten im Rahmen der Unsicherheiten der verwendeten Parameter sowie der Messabweichungen der realen Messungen übereinstimmen. Gleichzeitig scheinen jedoch weitere Einflüsse zu Abweichungen von dieser idealen Kennlinie zu

führen. Hierbei sei vorweg gegriffen, dass die Messungen hier noch ohne optischen Isolator durchgeführt wurden und Interferenzeffekte durch Laserleistungsschwankungen so noch verstärkt werden. Theoretisch ließen sich die hier gezeigten Ausgangssignale, abgesehen von den genannten Interferenzeffekten an einem ideal spiegelnden Referenzobjekt, beispielsweise einem Spiegel oder einem Parallelendmaß aufnehmen, um so die aus dieser Kalibrierung gewonnenen Kennlinien für die anschließende Messung zu nutzen, wenn das Messobjekt gleiche Reflektionseigenschaften wie das Referenzobjekt aufweist. Wie aus Gleichung 41 jedoch ersichtlich wird, hängt das Ausgangssignal ebenfalls von der Amplitude des Eingangssignals beziehungsweise mit Gleichung 15 von der Reflektivität R ab. Würde demnach eine Oberfläche mit geringerer Reflektivität als die des Referenzobjektes gemessen, wäre der Eingangssignal am Messobjekt $V_{E,MO}$ ebenfalls geringer als am Referenzobjekt $V_{E,RO}$. Somit wäre die Steigung der Kennlinie des Ausgangssignals $V_{A,H1,MO}$ gleichfalls geringer und es entstünde eine systematische Verstärkungsabweichung ΔV_V , wie in Abbildung 42 dargestellt. Gegebenenfalls ließe sich diese Abweichung durch erneute axiale Abtastung des Messobjektes oder andere Messverfahren zur Bestimmung der Reflektivität und Anpassung des Verstärkungsfaktors S korrigieren.

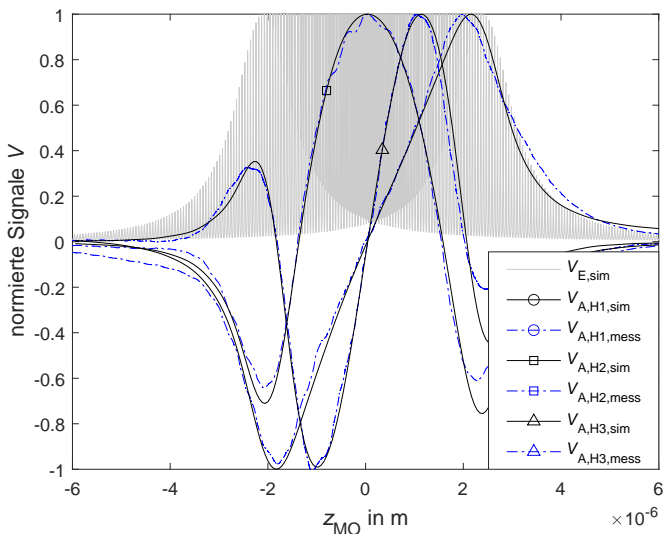


Bild 41: Numerische berechnete Signale $V_{E,sim}$, $V_{A,H1,sim}$, $V_{A,H2,sim}$ und $V_{A,H3,sim}$ sowie die mithilfe eines Lock-in-Verstärkers von Zürich Instruments gemessenen Ausgangssignale $V_{A,H1,mess}$, $V_{A,H2,mess}$ und $V_{A,H3,mess}$ dargestellt über die axiale Messflächenposition.

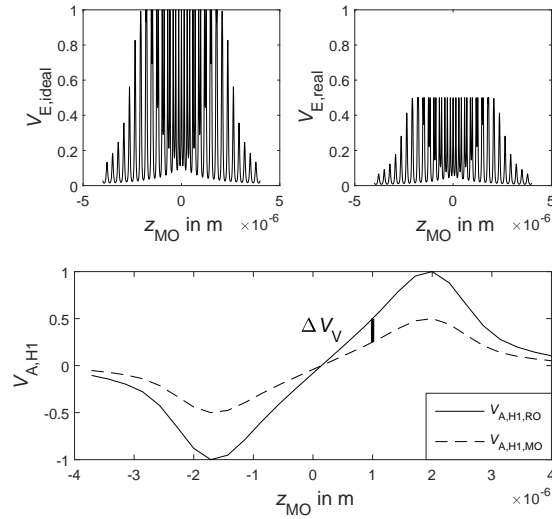


Bild 42: Simulierte Verstärkungsabweichung ΔV_V eines Ausgangssignals $V_{A,H1,real}$ eines realen Messobjekts mit Reflektivität $R < 1$ im Vergleich zu einem Ausgangssignal $V_{A,H1,ideal}$ eines idealen Referenzobjekts mit $R = 1$.

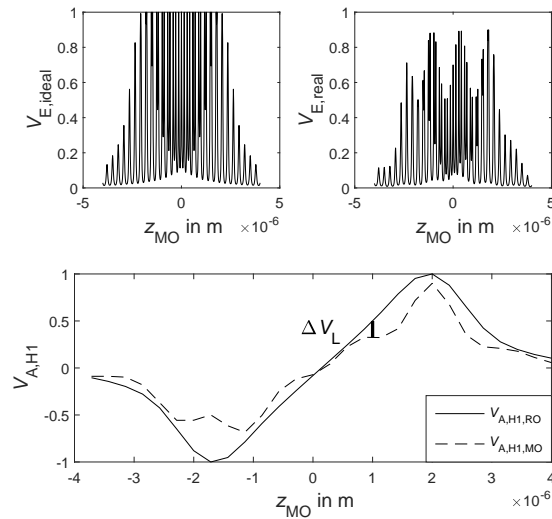


Bild 43: Zufällig simulierte Linearitätsabweichung ΔV_L eines Ausgangssignals $V_{A,H1,real}$ bei lateraler Abtastung eines realen Messobjekts mit inhomogener Reflektivität im Vergleich zu einem Ausgangssignal $V_{A,H1,ideal}$ eines idealen Referenzobjekts mit $R = 1$.

Jedoch gäbe es dann weiterhin Linearitätsabweichungen ΔV_L bei lateralen Abtastungen von Oberflächen mit lateral inhomogenen Reflektionseigenschaften, wie in Abbildung 43 unten zu sehen ist.

Die Verstärkungsabweichungen sind proportional zur Regelabweichung von der konstant bleibenden Nullposition des Arbeitspunktes und daher bei langsamen Scangeschwindigkeiten gegebenenfalls vernachlässigbar, wenn davon auszugehen ist, dass die Messung stets nahe des Arbeitspunktes erfolgt. Andererseits kann so jedoch nicht der gesamte Kennlinienbereich genutzt werden und das Potential des Sensors insbesondere bei schnellen lateralen Abtastungen wäre unnötig eingeschränkt.

Es soll daher ein von den Reflektionseigenschaften der Oberfläche unabhängiges Ausgangssignal erzeugt werden. Hierbei liegt die Vermutung nahe, dass sich die betrachteten Ausgangssignale proportional zueinander ändern und dass durch eine Quotientenbildung ein eben solches normiertes Signal erzeugt würde. Bei erneuter Betrachtung der Gleichung 15 und der Annahme sich über die Zeit der Abtastung ändernder Reflektionseigenschaften gilt:

$$V_E(t) = R(t) \cdot I(t) \quad (48)$$

Durch Substitution in Gleichung 41 sei damit:

$$V_{A,Hk}(t^*) = \frac{S}{nT} \int_{t^*-nT}^{t^*} R(t) I(t) V_{R,Hk}(t) dt \quad (49)$$

und der Quotient aus zwei unterschiedlichen Ausgangssignalen (k und k^*) gegeben durch:

$$\begin{aligned} Q_{Hk/Hk^*}(t^*) &= \frac{V_{A,Hk}(t^*)}{V_{A,Hk^*}(t^*)} = \frac{\frac{S}{nT} \int_{t^*-nT}^{t^*} R(t) I(t) V_{R,Hk}(t) dt}{\frac{S}{nT} \int_{t^*-nT}^{t^*} R(t) I(t) V_{R,Hk^*}(t) dt} = \\ &= \frac{\int_{t^*-nT}^{t^*} R(t) I(t) V_{R,Hk}(t) dt}{\int_{t^*-nT}^{t^*} R(t) I(t) V_{R,Hk^*}(t) dt}. \end{aligned} \quad (50)$$

Unter der Annahme, dass die Fokusmodulation und damit die axiale Abtastung wesentlich schneller erfolgt als die laterale Abtastung kann davon ausgegangen werden, dass die laterale Position und damit die Reflektionseigenschaft während der Integrationszeit konstant bleibt, womit:

$$R(t) = R = const., \text{ für } t \in [t^* - nT, t^*] \quad (51)$$

Damit kann R vor das Integral gezogen werden und lässt sich somit eliminieren:

$$Q_{Hk/Hk^*}(t^*) = \frac{\int_{t^*-nT}^{t^*} I(t) V_{R,Hk}(t) dt}{\int_{t^*-nT}^{t^*} I(t) V_{R,Hk^*}(t) dt}, \quad (52)$$

womit der Quotient $Q_{Hk^*/Hk}(t^*)$ unabhängig von R ist. Um weiterhin möglichst lineare Kennlinien zu erhalten und den Nulldurchgang in der Fokusebene des Objektivs beizubehalten bieten sich insbesondere neben dem Quotienten aus 1. und 2. harmonischen Ausgangssignal $Q_{H1/H2,sim}$ auch der Quotient aus dem 3. und 2. harmonischen Ausgangssignal $Q_{H3/H2,sim}$ an, wie in Abbildung 44 dargestellt (s. a. 52). Zum Vergleich sind die Quotienten $Q_{H1/H2,sim}$ und $Q_{H3/H2,sim}$ der gemessenen Signale aus Abbildung 41 abgebildet.

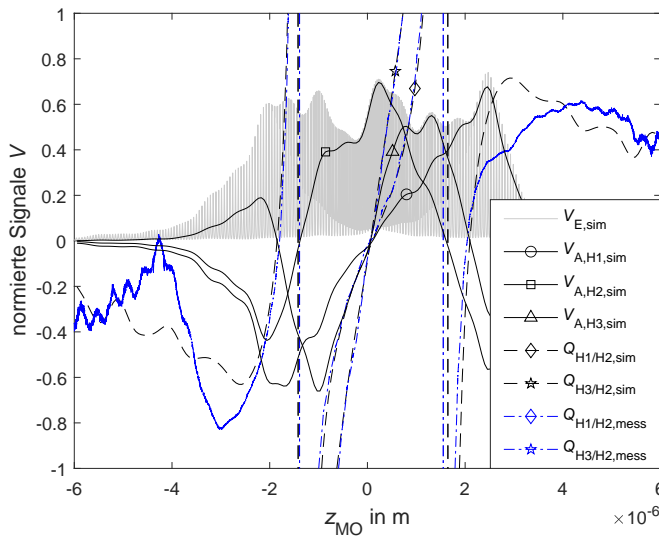


Bild 44: Numerische berechnete Signale $V_{E,sim}$, $V_{A,H1,sim}$, $V_{A,H2,sim}$, $V_{A,H3,sim}$, $Q_{H1/H2,sim}$ und $Q_{H3/H2,sim}$ im Vergleich zu berechneten Quotientensignalen $Q_{H1/H2,mess}$ und $Q_{H3/H2,mess}$ aus gemessenen Ausgangssignalen.

Wie hier zu erkennen ist, führt die Quotientenbildung einerseits bei $Q_{H3/H2,sim}$ zu einer Erhöhung der Linearität verglichen mit $V_{A,H3}$ und andererseits zu einer Verschlechterung bei $Q_{H1/H2,sim}$ verglichen mit $V_{A,H1}$. Weiterhin ist auch zu sehen, dass die oben beschriebenen Interferenzeffekte zumindest teilweise eliminiert werden. Wie anhand der simulierten Signale in Abbildung 45 bei lateralem Scan einer sehr inhomogenen Oberfläche verdeutlicht wird, weisen

die Ausgangssignale $V_{A,Hk}$ signifikante Nichtlinearitäts- und Verstärkungsabweichungen auf, wohingegen die Quotientensignale $Q_{H1/H2,sim}$ und $Q_{H3/H2,sim}$ den gleichen Verlauf (vgl. Abb. 44) wie auf einer idealen Oberfläche mit $R = 1$ zeigen.

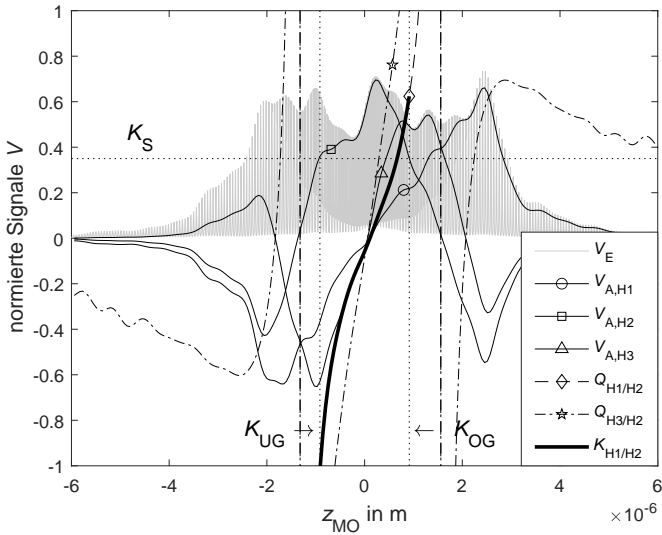


Bild 45: Numerische berechnete Signale V_E , $V_{A,H1}$, $V_{A,H2}$, $V_{A,H3}$, $Q_{H1/H2}$, $Q_{H3/H2}$ und der Kennlinie $K_{H1/H2}$ mit dem Kennlinienschwelwert K_S und der oberen und unteren Kennliniengrenze K_{UG} und K_{OG} .

Weiterhin ist hier zu erkennen, dass das Ausgangssignal für die 2. Harmonische $V_{A,H2}$ genutzt werden kann, um über einen Schwellwert K_S die obere und untere Kennliniengrenze K_{UG} und K_{OG} zu definieren. Dieser Schwellwert muss dabei, wie in Abbildung 45 illustriert jedoch gegebenenfalls so niedrig gelegt werden, dass dieser bei Oberflächen mit geringer Reflektivität noch überschritten wird. Dies kann jedoch aufgrund des Verlaufs des Ausgangssignals für die 2. Harmonische $V_{A,H2}$ dazu führen, dass die Kennliniengrenzen entsprechend weit auseinanderliegen. In dem hier gezeigten Beispiel reicht dieser Kennlinienbereich insbesondere bei der unteren Grenze gerade noch aus, um die Kennlinie des Quotientensignals $Q_{H1/H2,sim}$ zu definieren, jedoch sind diese Grenzen bereits außerhalb des nutzbaren Kennlinienbereichs des Quotientensignals $Q_{H3/H2,sim}$.

Weiterhin wären diese Grenzen entsprechend abhängig von den Reflektions-eigenschaften der Oberfläche und damit nicht konstant. Die bislang gezeigten Ausgangssignale werden von üblichen Lock-in-Verstärkern bereitgestellt (unter Vernachlässigung der Bedingung aus Gleichung 45), jedoch muss die

Quotientenbildung auf der Steuerung des Nanopositioniersystems erfolgen. Um den Sensor universal auch auf anderen Positioniersystemen verwenden zu können, ist es daher vorteilhaft, wenn durch den Verstärker direkt auch die Quotientensignale ausgegeben werden. Hierzu wird eine eigene Lösung eines Signalverarbeitungsprozessors benötigt, womit sich zudem gänzlich neue Möglichkeiten der Signalverarbeitung ergeben, neben den bislang gezeigten Modulationen mit den harmonischen Referenzsignalen.

So kann auch ein weiteres Signal erzeugt werden, um das Ausgangssignal für die 2. Harmonische V_{A,H_2} zu normieren. Eine Mittelwertbildung über die gleiche Integrationszeit führt zu dem Mittelwertsignal

$$V_{A,M}(t^*) = \frac{S}{nT} \int_{t^*-nT}^{t^*} V_E(t) dt. \quad (53)$$

Grafisch dargestellt ergibt sich für dieses Signal der in Abbildung 46 gezeigte Verlauf.

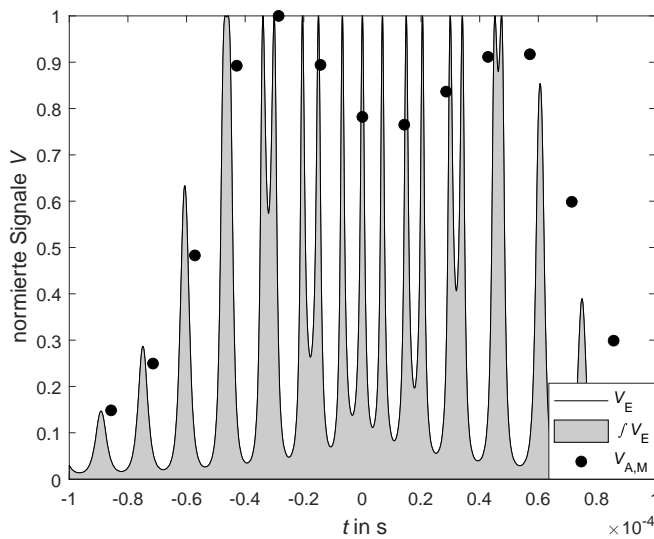


Bild 46: Numerisch berechnetes Eingangssignal V_E Integration über das Eingangssignal sowie das Ausgangssignal $V_{A,M}$ über die Zeit t mit $n = 1$.

Mit den in den Gleichungen 48-52 getroffenen Annahmen ist der Quotient $Q_{H_2/M}$ aus dem Ausgangssignal V_{A,H_2} und dem Mittelwertsignal $V_{A,M}$ damit ebenfalls unabhängig von den Reflektionseigenschaften R der zu messenden Oberfläche, wie in Abbildung 47 zu sehen ist. Damit kann der Schwellwert K_S hier so hoch gewählt werden, dass die Kennliniengrenzen

innerhalb des nutzbaren Bereichs des Quotientensignals Q_{H_3/H_2} liegen und ebenfalls unabhängig von R sind. Weiterhin können auch die Quotienten der Ausgangssignale für die 1. und 3. Harmonische und dem Mittelwertsignal $Q_{H_1/M}$ und $Q_{H_3/M}$ gebildet werden, wobei dies beim Ausgangssignal für die 3. Harmonische nur zu einer Verschlechterung der Linearität führt.

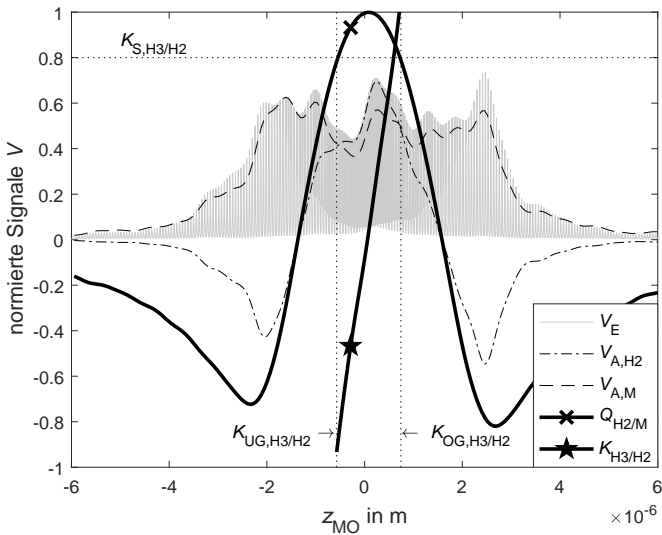


Bild 47: Numerisch berechnete Signale V_E , V_{A,H_2} , $V_{A,M}$, $Q_{H_2/M}$ und K_{H_3/H_2} mit $A_f = 2,2 \mu\text{m}$, $v_{PT} = 4 \text{ mm/s}$, $K_{S,H_3/H_2} = 0,8$ und den Kennliniengrenzen $K_{UG,H_3/H_2} = -0,58 \mu\text{m}$ und $K_{OG,H_3/H_2} = 0,64 \mu\text{m}$.

Für den Quotienten $Q_{H_1/M}$ ergibt sich hingegen eine annähernd lineare Kennlinie über einen wesentlich größeren axialen Bereich als bei allen bislang gezeigten Varianten, wenn der Schwellwert $K_{S,H_1/M}$ entsprechend niedrig gelegt wird, wie in Abbildung 48 gezeigt. Daher werden im Folgenden nur mehr die Quotientensignale Q_{H_3/H_2} und $Q_{H_1/M}$ zur Kennliniengenerierung betrachtet sowie zur Kennliniengrenzfestlegung das Signal V_{A,H_2} , da dieses mit üblichen Lock-in-Verstärkern zumindest in einem Postprozess gebildet werden kann und das Quotientensignal $Q_{H_2/M}$, für das jedoch eine eigene Signalverarbeitung notwendig ist.

Die Kennlinien, die sich so aus den Signalen ergeben, sind nochmals in Abbildung 49 skaliert dargestellt. Um diese für die Umrechnung des Höhenwertes und für die Nachregelung des Positioniertisches auf den Arbeitspunkt nutzen zu können muss weiterhin eine Regression erfolgen.

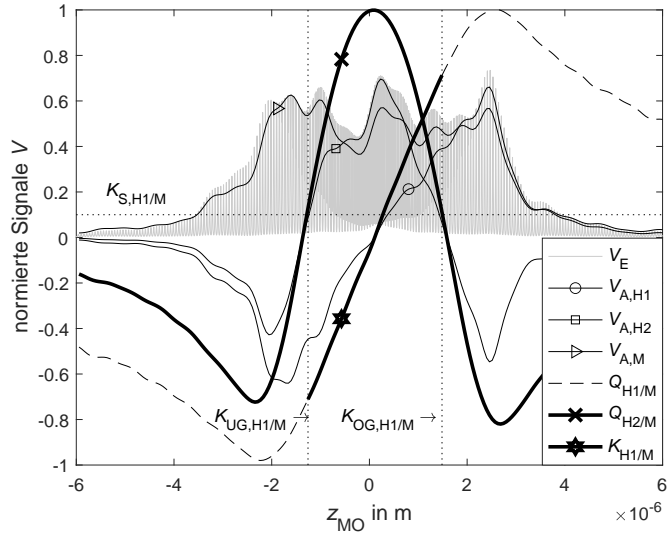


Bild 48: Numerisch berechnete Signale V_E , $V_{A,H1}$, $V_{A,H2}$, $V_{A,M}$, $Q_{H1/M}$, $Q_{H2/M}$ und $K_{H1/M}$ mit $A_f = 2,2 \mu\text{m}$, $v_{PT} = 4 \text{ mm/s}$, $K_{S,H1/M} = 0,1$ und den Kennliniengrenzen $K_{UG,H1/M} = -1,25 \mu\text{m}$ und $K_{OG,H1/M} = 1,45 \mu\text{m}$.

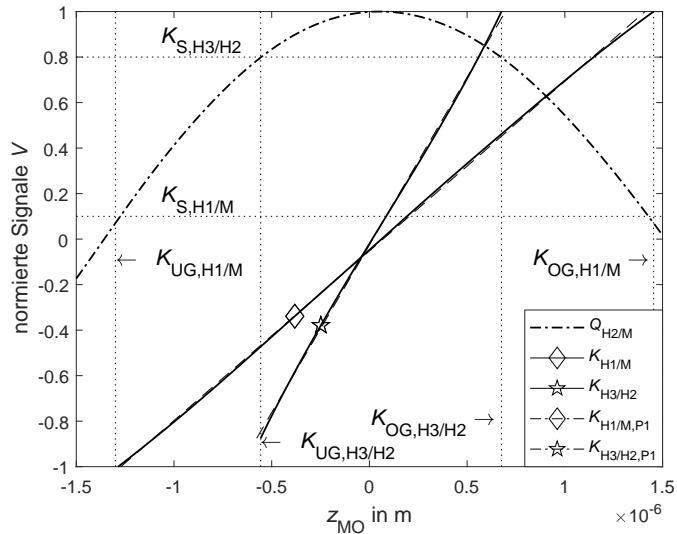


Bild 49: Numerisch berechnete, normierte Signale $Q_{H3/M}$, $K_{H3/M}$, $K_{H3/H2}$ und $K_{H1/M,P1}$, $K_{H3/H2,P1}$ sowie die Kennliniengrenzen $K_{UG,H1/M}$, $K_{OG,H1/M}$, $K_{UG,H3/H2}$ und $K_{OG,H3/H2}$ in Abhängigkeit der axialen Messobjektposition z_{MO} .

Mithilfe einer linearen Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und Minimierung nach z gemäß

$$z = \beta_1 \cdot K \quad (54)$$

ergeben sich die in Abbildung 49 dargestellten Ausgleichsgeraden $K_{H_1/M,P_1}$ und $K_{H_3/H_2,P_1}$. Dabei sind bereits in der Grafik deutliche Abweichungen zu erkennen. In Abbildung 50 sind die Residuen der Regression dargestellt. Mit Abweichungen im zweistelligen Nanometerbereich sind diese daher für die vorliegende Anwendung nicht geeignet.

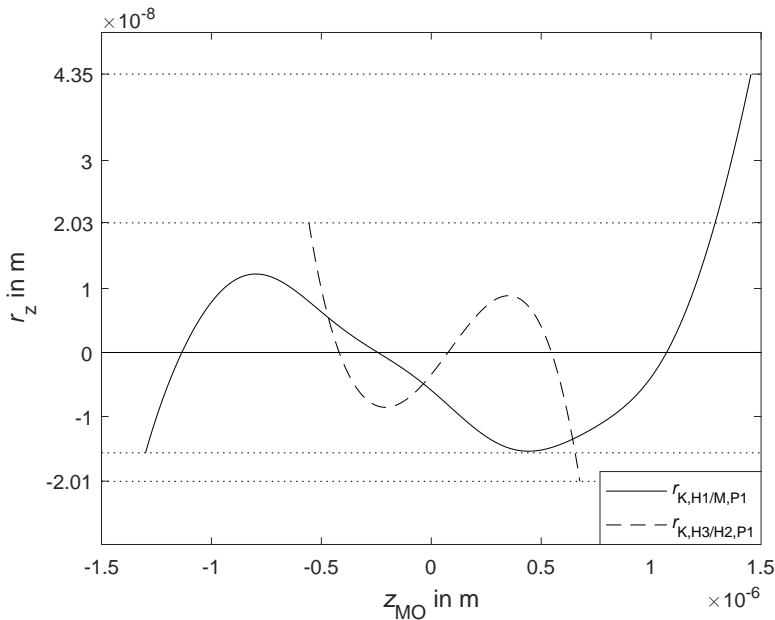


Bild 50: Numerisch berechnete Residuen $r_{K,H_1/M,P_1}$ und $r_{K,H_3/H_2,P_1}$ der linearen Regressionen der Kennlinien $K_{H_1/M,P_1}$ und $K_{H_3/H_2,P_1}$ in Abhängigkeit der axialen Messobjektposition z_{MO} .

Während eine polynomiale Ausgleichsrechnung 2. Ordnung erwartungsgemäß (aufgrund der Punktsymmetrie) keine Verringerung der Residuen bewirkt, sind diese bei der Verwendung der 3. Ordnung mit

$$z = \beta_3 \cdot K^3 + \beta_2 \cdot K^2 + \beta_1 \cdot K \quad (55)$$

deutlich geringer (s. Abb. 51). Weiterhin ist zu erkennen, dass eine nachträgliche Einschränkung des Kennlinienbereichs aufgrund der größeren Abweichungen in den Randbereichen sinnvoll ist. Insbesondere die Kennlinie

der polynomialen Regression des Quotienten der Signale für die 3. und 2. Harmonische $K_{H3/H2,P3,90\%}$ (s. Abb. 51) scheint mit einer Standardabweichung unter einem Nanometer besonders geeignet für die vorliegende Applikation und wird daher im Folgenden weiter diskutiert und durch Vergleichsmessungen validiert. Gleichzeitig stellt dies auch die theoretische Untergrenze der umsetzbaren Präzision der gezeigten Signalverarbeitung über die gesamte Kennlinie dar.

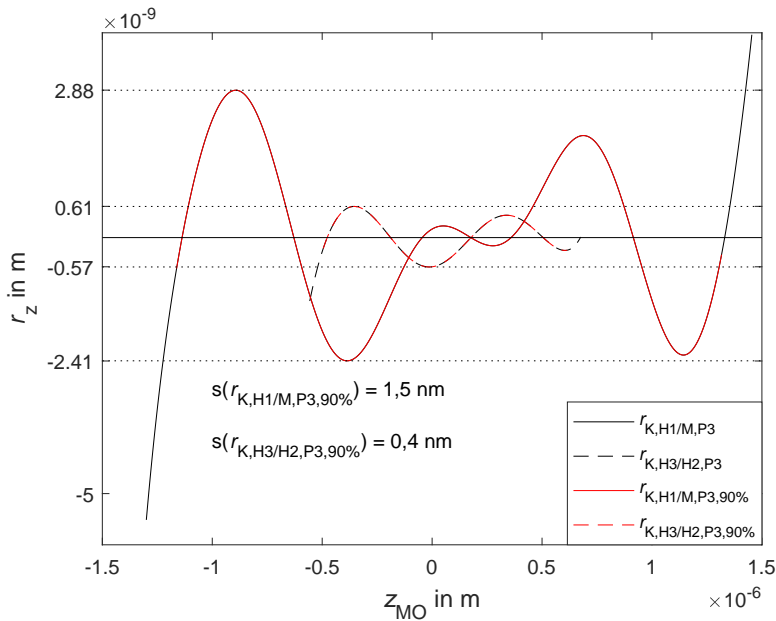


Bild 51: Numerisch berechnete Residuen $r_{K,H1/M,P3}$ und $r_{K,H3/H2,P3}$ der polynomialen Regressionen 3. Ordnung der Kennlinien $K_{H1/M,P3}$ und $K_{H3/H2,P1}$ in Abhängigkeit der axialen Messobjektposition z_{MO} .

3 Fokusmodulierte Konfokalsensoren

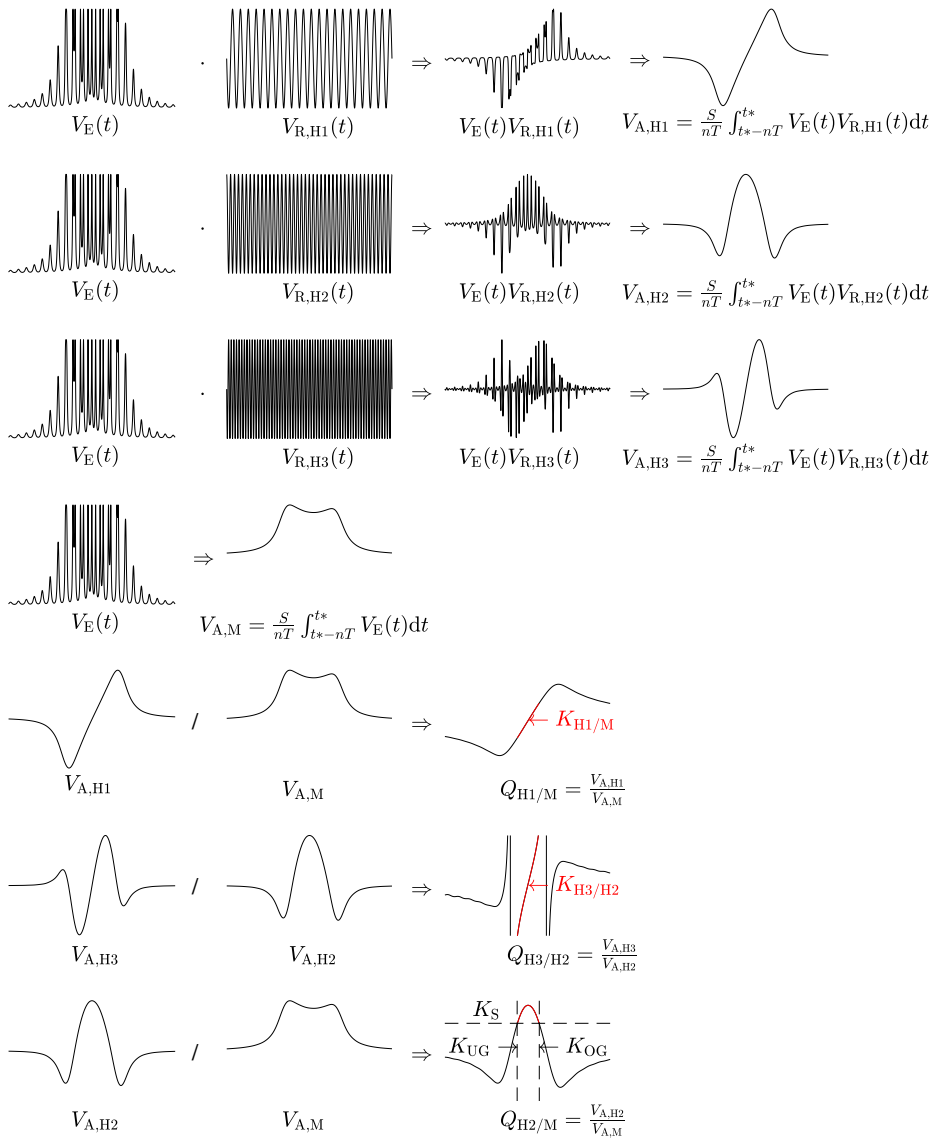


Bild 52: Grafische Veranschaulichung der Signalverarbeitung des Eingangssignals $V_E(t)$ mittels Lock-in-Verstärkung mit den Referenzsignalen $V_{R,Hk}(t)$ zur Generierung der harmonischen Ausgangssignale $V_{A,H1}$, $V_{A,H2}$, $V_{A,H3}$ und $V_{A,M}$ sowie der Quotientensignale $Q_{H1/M}$, $Q_{H3/H2}$ und $Q_{H2/M}$.

Als Ausblick für weitere Anwendungen, bei denen insbesondere kostengünstige Signalverarbeitungshardware Verwendung finden soll, sei hier noch angemerkt, dass statt der gezeigten Referenzsignale auch einfache Dreieckssignale der Form:

$$V_{R,Dk} = 2 \operatorname{asin}(\sin(2 \pi t \nu_{R,Hk} + \phi_{R,Hk}))/\pi \quad (56)$$

genutzt werden könnten. Dies würde insbesondere bei der praktischen Umsetzung und Programmierung eines digitalen Signalverarbeitungsprozesses den Vorteil aufweisen, dass das Signal abschnittsweise definiert linear ansteigt bzw. fällt gemäß:

$$V_{R,Dk}(t) = \begin{cases} t \cdot \nu_{R,Hk} & \text{für } \frac{b}{\nu_{R,Hk}} \leq t < \frac{b+\frac{1}{4}}{\nu_{R,Hk}}, b \in \mathbb{Z} \\ -t \cdot \nu_{R,Hk} & \text{für } \frac{b+\frac{1}{4}}{\nu_{R,Hk}} \leq t < \frac{b+\frac{3}{4}}{\nu_{R,Hk}}, b \in \mathbb{Z} \\ t \cdot \nu_{R,Hk} & \text{für } \frac{b+\frac{3}{4}}{\nu_{R,Hk}} \leq t < \frac{b}{\nu_{R,Hk}}, b \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (57)$$

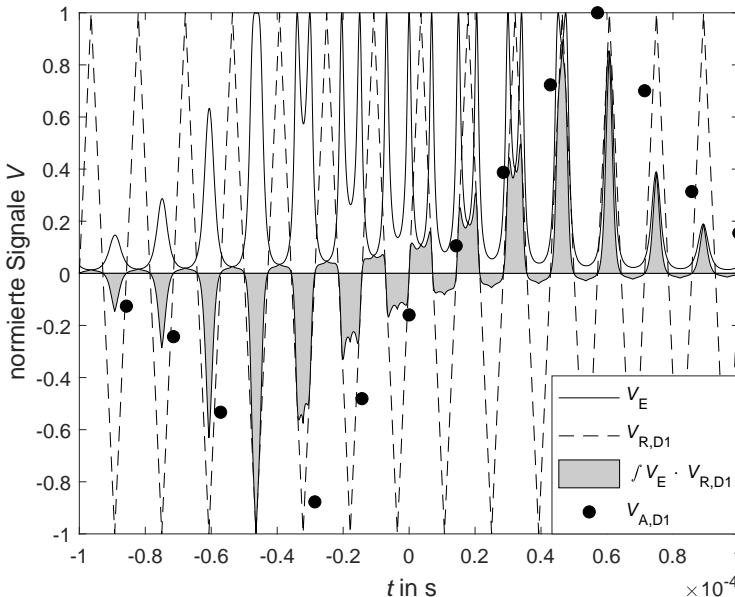


Bild 53: Numerisch berechnetes Eingangssignal V_E , Referenzsignal $V_{R,D1}$, Integration über die Multiplikation des Eingangssignals mit dem Referenzsignal $\int V_E V_{R,D1}$ sowie das Ausgangssignals $V_{A,D1}$ über die Zeit t mit $n = 1$.

Damit können beispielsweise sehr einfache Schaltungen ohne speicherintensive Umsetzungstabellen (engl. *lookup table*, Abk. LUT) zur Generierung einer Sinusreferenzschwingung in einem numerisch gesteuerten Oszillator (engl. *numerically controlled oscillator*, Abk. NCO) entworfen werden. Die Modulation mit einer solchen Dreieckschwingung der 1. Referenzfrequenz ist in Abbildung 53 dargestellt. Analog zu den gezeigten Signalverarbeitungsschritten könnte dies auch mit Frequenzen höherer Ordnungen erfolgen. Da die mit solchen Referenzsignalen erzeugten Kennlinien jedoch höhere Linearitätsabweichungen aufweisen, soll dies hier nur erwähnt und nicht weiter diskutiert werden.

3.7 Abweichungen der Kennlinie

In den folgenden Kapiteln werden die Kennlinienabweichungen mit und ohne Temperierhaube aufgezeigt und es werden eine aufgabenspezifische Vergleichs- und Wiederholpräzision bestimmt. Anhand der empirischen Messdaten werden zudem die Kennlinienabweichungen durch thermische Driften, Störinterferenzen und Rauschen analysiert und mithilfe eine Monte-Carlo-Simulation abgeschätzt.

3.7.1 Amplitudeneinfluss und thermische Driften

Erste Messungen wurden im, in Kapitel 3.2 beschriebenen Messraum ohne zusätzliche Temperierhaube sowie ohne optischen Isolator durchgeführt und die Temperaturen T zu den Zeitpunkten der Messungen t_M aufgezeichnet. Es wurden 5 Wiederholungen mit je 25 axialen Abtastungen mit unterschiedlichen Ansteuerleistungen der TAG-Linse durchgeführt. Anschließend wurden jeweils die Abweichungen des Quotientensignals Q_{H_3/H_2} an allen axialen Positionen aus den 25 Messungen ermittelt und der Mittelwert $\bar{z}(Q_{H_3/H_2})$ sowie die Spannweite des Mittelwertes der 5 Wiederholungen gebildet (s. Tab. 1 u. Abb. 54). Wie in Abbildung 54 zu erkennen ist, zeigten sich bei 25 % der Ansteuerleistung und einer resultierenden Fokusmodulationsamplitude A_F von $1 \mu\text{m}$ die geringsten Abweichungen, weshalb diese Einstellung bei den nachfolgenden Messungen vorzugsweise genutzt wurde. Zur Abschätzung thermischer Driften wurden weiterhin die Kennlinien $K_{H_3/H_2, P_3}$ aus 500 Messungen in einem Zeitraum von 19 Stunden ermittelt und der Arbeitspunkt (z -Positionen der Kennlinie $z(K_{H_3/H_2, P_3} = 0)$) über die entsprechende Messraumtemperatur bei jeder Messung dargestellt (s. Abb. 55). Die höchste Korrelation mit einem Korrelationskoeffizient $r = 0,6$ trat bei einer Latenz von 20 Minuten auf. Dies ist mit der geringeren Trägheit des Temperatursensors im Vergleich zum gesamten optischen Aufbau zu erklären. Eine Korrektur der Messwerte lieferte jedoch keine

nennenswerten Verringerungen der Messabweichungen. [P1]

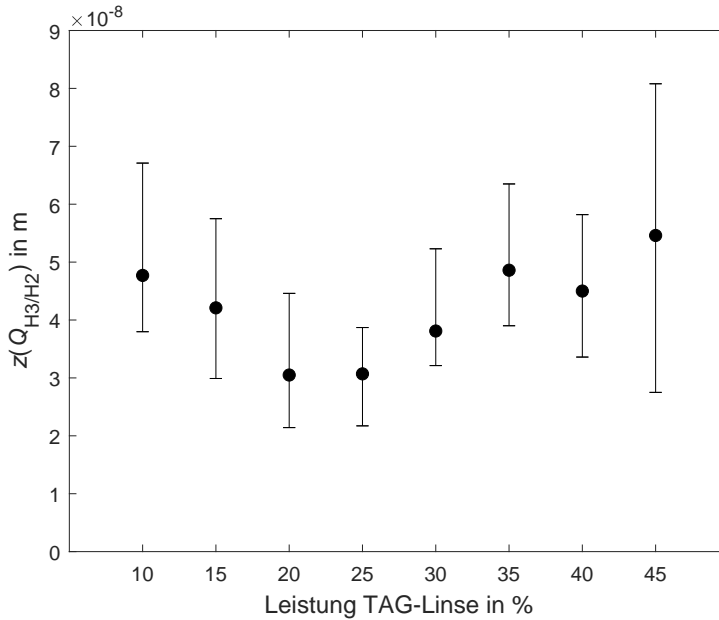


Bild 54: Mittelwerte und Spannweiten der maximalen Residuen r_z zwischen den Quotientensignalen $Q_{H3/H2}$ aus 5 Wiederholungen von jeweils 25 Messungen in Abhängigkeit der Leistung der TAG-Linse [P1].

Tabelle 1: Mittelwert und Maximum der Abweichungen $\bar{z}(V_{H3/H2})$ und $\bar{z}_{max}(V_{H3/H2})$ sowie Amplitude der Fokusmodulation A_F in Abhängigkeit der Leistung der TAG-Linse aus 5 Wiederholungen von jeweils 25 axialen Abtastungen [P1].

Leistung in %	10	15	20	25	30	35	40	45
$\bar{z}(Q_{H3/H2})$ in nm	48	42	30	31	38	49	45	55
$\bar{z}_{max}(Q_{H3/H2})$ in nm	67	58	45	39	52	63	58	81
A_F in μm	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,8

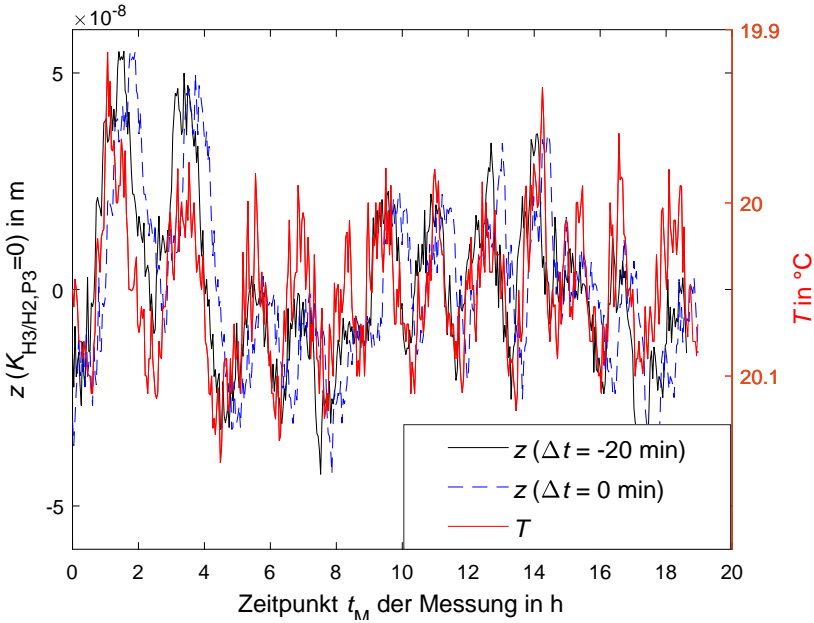


Bild 55: z-Positionen des Arbeitspunktes der Kennlinien $z(K_{H_3/H_2,P_3} = 0)$ sowie die Messraumtemperatur T über die Startzeit der Messungen t_M [P1].

3.7.2 Störinterferenzen und Rauschen

Wie anhand erster Messungen des Eingangssignals $V_{E,mess}$ in Abbildung 56 deutlich zu erkennen ist, treten insbesondere Interferenzen auf, wenn der kollimierte Strahl senkrecht zum Deckglas der TAG-Linse ausgerichtet ist. Weiterhin wurden hier die Interferenzerscheinung aufgrund des fehlenden optischen Isolators zwischen Laser und Fasereinkopplung durch zusätzlich auftretende Laserleistungsschwankungen verstärkt.

Die gemessenen Störinterferenzen lassen sich mathematisch beschreiben mit

$$N_I(z) = A_I \sin(8 \pi z \frac{1}{\lambda}) \quad (58)$$

wobei A_I die Amplitude der Interferenz und λ die Wellenlänge des Lasers darstellen. Mit einem zusätzlichen weißen Rauschen N_{AWGN} lässt sich damit das Eingangssignal

$$V_{E,MC}(z) = V_E(z) + V_E(z) \cdot N_I(z) + N_{AWGN} \quad (59)$$

simulieren, wobei die Interferenzerscheinung proportional zum Eingangssignal $V_E(z)$ ist. In Abbildung 56 ist ein auf diese Weise simuliertes Signal $V_{E,MC}$ im Vergleich zu einem gemessenen Signal $V_{E,mess}$ dargestellt.

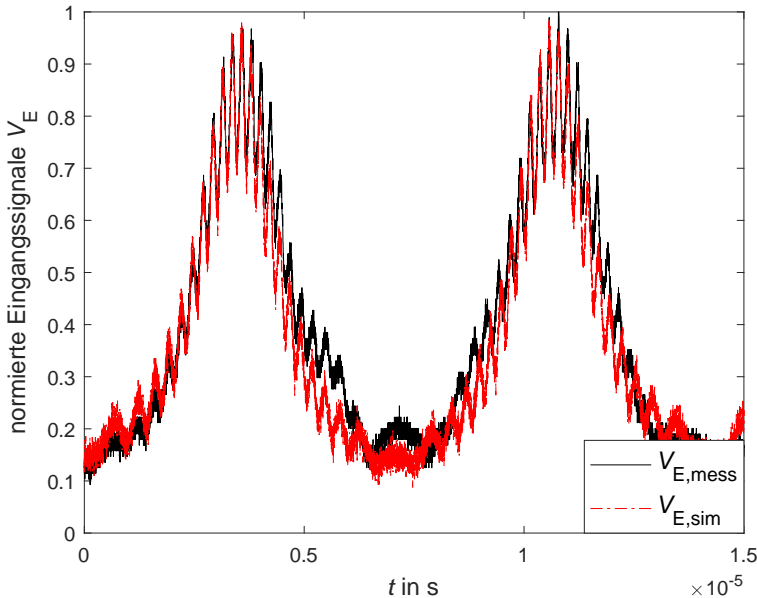


Bild 56: Numerische Berechnung des Eingangssignals $V_{E,sim}$ mit $N_I = 0, 15$, $SNR_{AWGN} = 35$, $A_T = 0,42$ und gemessenes Signal $V_{E,mess}$ ohne optischen Isolator über die Zeit t .

Als Vergleich wurde das optische System darart justiert, dass der kollimierte Laserstrahl nicht exakt senkrecht zum Deckglas steht und es wurde ein optischer Isolator zwischen Laser und Fasereinkopplung eingesetzt, wodurch die Interferenzeffekte deutlich reduziert werden konnten (s. Abb. 57). Das Rauschen N_{AWGN} bleibt hierbei unverändert. Es wurden jedoch zur besseren Darstellung der Reduktion des Interferenzeffekte der Mittelwert aus 32 gemessenen Modulationsperioden gebildet und für die Simulation $N_{AWGN} = 1000$ gewählt. Die Auswirkungen auf die Kennlinie und die Messunsicherheit werden im nachfolgenden Abschnitt betrachtet.

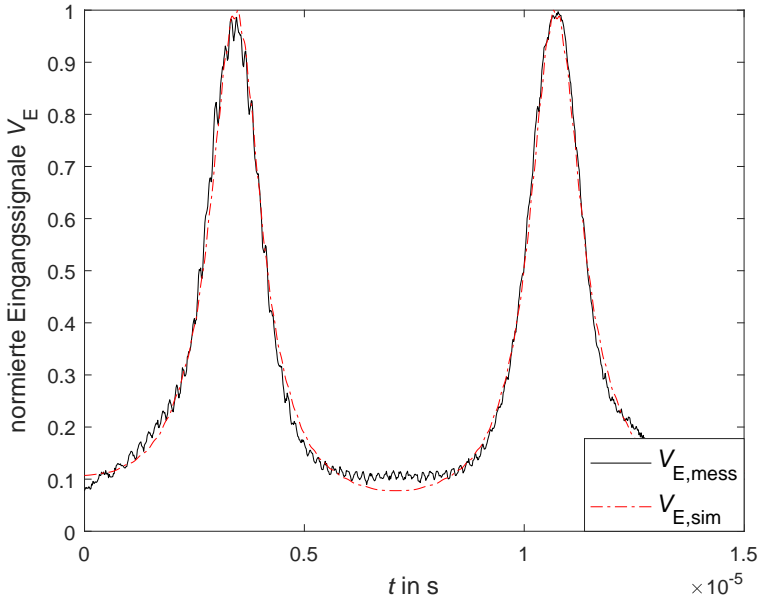


Bild 57: Numerische Berechnung des Eingangssignals $V_{E,sim}$ mit $N_I = 0,01$, $SNR_{AWGN} = 1000$, $A_T = 0,55$ und gemessenes über 32 Perioden gemitteltes Signal $V_{E,mess}$ mit optischem Isolator über die Zeit t .

3.7.3 Monte-Carlo-Simulation

Mit der oben ermittelten Amplitude der Interferenz A_I (s. Abb. 57), dem Rauschen N_{AWGN} (s. Abb. 56), den beschriebenen Modellen der Signalentstehung und -verarbeitung (s. Kap. 3.6.1 u. 3.6.2) sowie unter der Annahme, dass sich aufgrund thermischer Ausdehnung die Abstände zwischen Faserende und Kollimationslinse g_k , Kollimationslinse und TAG-Linse d_{KT} , TAG-Linse und Objektiv d_{TO} sowie Ein- und Austrittspupille des Objektivs d_O ändern, gemäß

$$g_k = g_{k,nominell} \cdot (1 + \alpha_{stahl} \cdot \Delta\vartheta) \quad (60)$$

$$d_{KT} = d_{KT,nominell} \cdot (1 + \alpha_{stahl} \cdot \Delta\vartheta) \quad (61)$$

$$d_{TO} = d_{TO,nominell} \cdot (1 + \alpha_{stahl} \cdot \Delta\vartheta) \quad (62)$$

$$d_O = d_{O,nominell} \cdot (1 + \alpha_{stahl} \cdot \Delta\vartheta) \quad (63)$$

wobei d_{nominell} die nominellen Längen sind (s. a. Abb. 29), α_{stahl} der Ausdehnungskoeffizient von Stahl mit einem Wert von $11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ und $\Delta\vartheta$ die Temperaturschwankungen darstellen, lässt sich eine Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Kennlinienabweichungen durchführen.

Unter der Annahme einer Zwei-Punkt-Temperaturreglung der Temperierhaube mit Hysterese, kann von einem approximativ linearen Anstieg bzw. Abfall der Temperatur zwischen den Grenzen $\pm\Delta\vartheta_{\text{max}}/2$ ausgegangen werden, womit eine rechteckförmige Verteilung über die Zeit t angenommen werden kann.

Um eine Abschätzung der Abweichungen über den gesamten Kennlinienbereich durchzuführen, werden 25 Quotientensignale $Q_{\text{H}_3/\text{H}_2}$ mit den gezeigten Formeln und Längenänderungen simuliert und für jedes dieser Signale eine Kennlinie $K_{\text{H}_3/\text{H}_2, \text{P}_3}$ mithilfe einer polynomiale Regression 3. Ordnung mit den gezeigten Methoden bestimmt. Anschließend werden für jede der so ermittelten Kennlinien die Abweichungen $\Delta z = z(K_{\text{H}_3/\text{H}_2, \text{P}_3}) - z(Q_{\text{H}_3/\text{H}_2})$ zu allen 25 Quotientensignalen berechnet und die Standardabweichung $s(\Delta z)$ hierfür bestimmt (s. Abb. 59 u. 61). Zum Vergleich wurden 25 Messungen durchgeführt und die Abweichungen Δz und die Standardabweichungen $s(\Delta z)$ auf die gleiche Weise bestimmt (s. Abb. 58 u. 61) [P6]. Die gemessenen Signale wurden aus einer Reihe von Wiederholmessungen in der Temperierhaube in einem Zeitintervall von 16 min ausgewählt, in dem die Temperaturschwankung $\Delta\vartheta_{\text{max}}$ des Sensors innerhalb dessen Auflösung von 1 mK lag [P6]. Da jedoch gezeigt wurde, dass es eine Latenz zwischen der Temperatur am Temperatursensor und dem optischen System gibt, wurde für die Simulation eine Abweichung von 2,5 mK angenommen, was der mittleren Temperaturabweichung in dem genannten Zeitintervall entspricht (s. Tab. 2).

Beim Vergleich der Abbildungen 58 und 59 bzw. 61 und 61 zeigt sich damit sowohl in der Simulation als auch bei den Messungen [aus P6] ein ähnlicher Verlauf und die selbe Wiederholpräzision von 1,7 nm. Als Vergleichspräzision wurden weiterhin die Standardabweichung von 105 Messungen in einem Zeitintervall von 12 Stunden mit einer maximalen Temperaturschwankung von $\Delta\vartheta_{\text{max}} = 6,5 \text{ mK}$ ermittelt [P6]. Hierbei wurde ein Wert von $s(\Delta z_{\text{Langzeit}})$ 3,6 nm (auf die gleiche Weise) bestimmt. Die Simulation mit dieser Temperaturschwankung ergab hierbei ebenfalls den selben Wert. Bei einer Simulation mit einer Temperaturschwankung $\Delta\vartheta_{\text{max}} = 0,1 \text{ K}$, wie diese kurzzeitig im Messraum ohne Temperierhaube vorliegt, beträgt die Standardabweichung 47 nm (vgl. Tab. 2). Bei derartigen hohen Temperaturschwankungen haben Interferenzen und Rauschen keinen signifikanten Einfluss. Damit ist die gezeigte Simulation für durchgeführten Messungen [aus P1, P6] geeignet, temperaturbedingte Abweichungen zu prediktieren.

Tabelle 2: Abweichungsbudget der Kennlinie mit $\Delta\vartheta_{\max} = 2,5$ mK.

Größe	Schätzwert	Verteilung	$s(\Delta z) = 1,7$ nm von 25 Kennlinien (inkl. Regression)
g_K	11 mm	Rechteck	0,3 nm
d_{KT}	75 mm	Rechteck	0,3 nm
d_{TO}	124 mm	Rechteck	0,3 nm
d_O	60 mm	Rechteck	1,3 nm
A_I	0,01	-	0,7 nm
SNR_{AWGN}	32	Normal	0,8 nm

Anzumerken ist, dass die Standardabweichungen aufgrund der Residuen der polynomialen Regression bereits $s(r_{K,H_3/H_2,P_3}) = 0,3$ nm für den vorliegenden Kennlinienbereich beträgt (vgl. a. Kap. 3.6.2). Die in Tabelle 2 gezeigten Einflüsse enthalten prinzipbedingt bereits diesen Beitrag. Während die thermisch bedingten Längenänderungen zwischen Faser und Kollimationslinse Δg_K , zwischen Kollimationslinse und TAG-Linse Δd_{KT} sowie zwischen TAG-Linse und Objektiv Δd_{TO} im Vergleich zur Standardabweichung der Residuen der polynomialen Regression $s(r_{K,H_3/H_2,P_3})$, keinen signifikanten Beitrag zu den Abweichungen liefern, tragen die Interferenzerscheinungen A_I und die Abstandsänderung durch die Ausdehnung des Objektiv bzw. der Sensoraufnahme d_O sowie das Rauschen signifikant zu den simulierten Abweichungen bei.

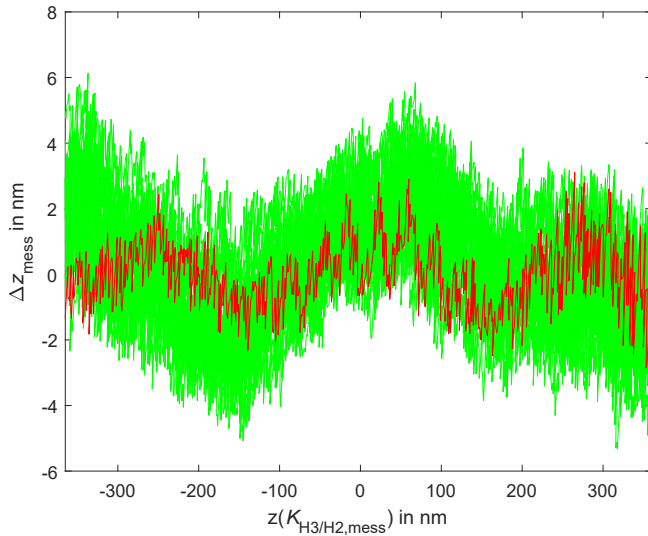


Bild 58: Gemessene Abweichungen der durch eine Kennlinie $K_{\text{H}_3/\text{H}_2}$ bestimmten z -Werte zu den durch die NMM-1 bestimmten z -Werten für alle 25 Kalibrierungen. Residuen der Kennlinie in Rot. [P6]

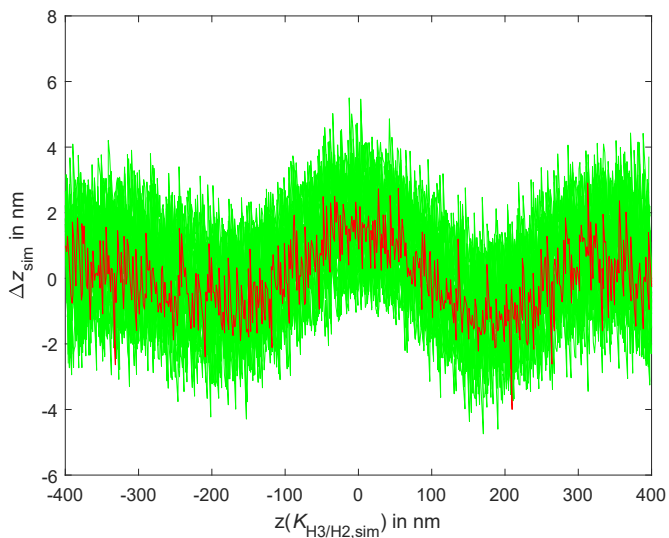


Bild 59: Simulierte Abweichungen der durch eine Kennlinie $K_{\text{H}_3/\text{H}_2}$ bestimmten z -Werte zu den durch eine polynomiale Regression 3. Ordnung errechneten Kennlinien aus 25 Simulation mit $N_I = 0,01$, $SNR_{\text{AWGN}} = 35$, $A_T = 0,25$ in Grün. Residuen der Kennlinie in Rot.

3 Fokusmodulierte Konfokalsensoren

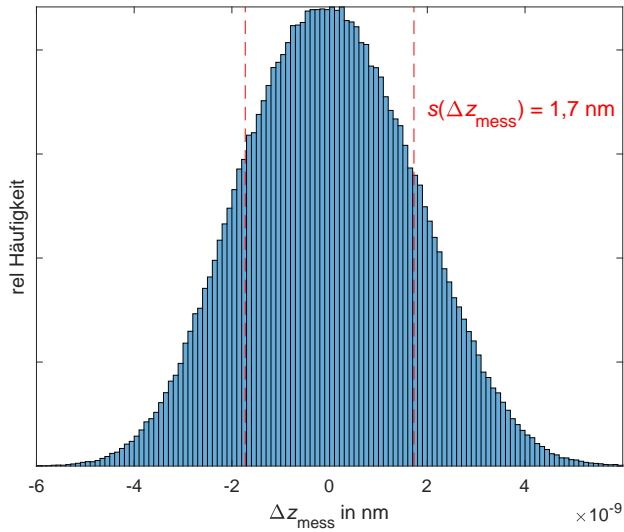


Bild 60: Histogramm der gemessenen Abweichungen aller Kennlinien zu allen 25 Kalibrierungen. Standardmessunsicherheit $s(\Delta z) = 1,7 \text{ nm}$ in Rot. [P6]

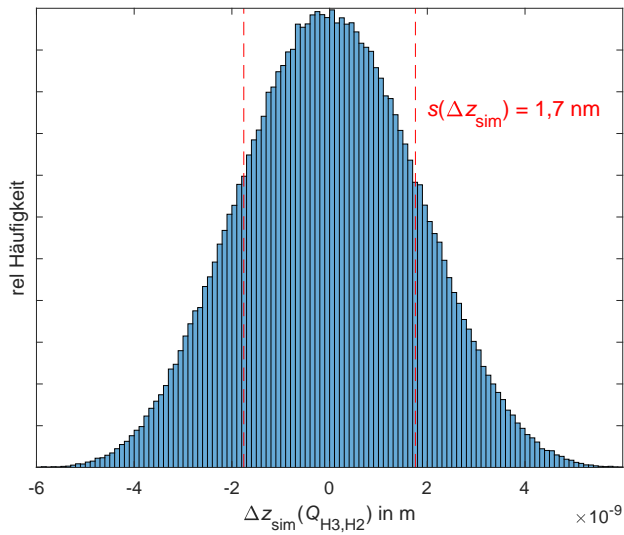


Bild 61: Histogramm der simulierten Abweichungen aller Kennlinien zu allen 25 Kalibrierungen. Standardmessunsicherheit $s(\Delta z) = 1,7 \text{ nm}$ in Rot.

3.8 Justierung

Um eine, wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigte approximativ harmonische, axiale Fokusoszillation um die Brennebene des Objektivs und damit eine bezüglich des Arbeitspunktes punktsymmetrische Kennlinie zu erhalten, muss die Fokussierung sowie die laterale Position des Beleuchtungsstrahlengangs zur optischen Achse justiert werden. Dies kann in folgende Schritte untergliedert werden:

- a) Kollimation der Beleuchtung,
- b) parallele Ausrichtung der Beleuchtungsachse zur Achse des Objektivs,
- c) koaxiale Ausrichtung der Beleuchtungsachse zur Achse des Objektivs,
- d) konzentrische Ausrichtung der TAG-Linse zur Achse des Objektivs sowie der Beleuchtungsachse,
- e) orthogonale Ausrichtung der Fokusmodulationsachse zur x - y -Ebene des Nanokoordinatenmessgerätes,
- f) konzentrische Ausrichtung der Fokusmodulationsachse zur z -Achse des Nanokoordinatenmessgerätes und
- g) Justierung des bildgebenden Systems.

Die Ausrichtungen der Kollimationslinse, der Faser sowie der TAG-Linse erfolgen relativ zur Achse des Objektivs. Die laterale Ausrichtung des gesamten Sensors erfolgt relativ zu den Geräteachsen des Nanokoordinatenmessgeräts (s. Abb. 62). Technisch realisiert wird die Justierung der Kollimationslinse durch drei am Kollimatorgehäuse (8b) in Richtung der optischen Achse parallel angeordneten Stellschrauben S_{zK1-3} zwischen Faseranschluss und Kollimationslinse (4), die sowohl die axiale Position z_K als auch die Verkipfung der Kollimationslinse (8a) um die Achsen x_K und y_K festlegen sowie durch zwei radial zur Kollimationslinse angeordnete Stellschrauben S_{xK} und S_{yK} , über die die laterale Verschiebung der Kollimationslinse (8a) entlang der Achsen x_K und y_K vorgegeben wird. Weiterhin kann über die Stellschrauben S_{xKF} und S_{yKF} die gemeinsame Anordnung aus Faserende und Kollimationslinse bezüglich der optischen Achse des Objektivs lateral in x - und y -Richtung justiert werden. Die laterale Ausrichtung der TAG-Linse entlang der Achsen x_{TAG} und y_{TAG} erfolgt über die Stellschrauben S_{xTAG} sowie S_{yTAG} . Die Rotationen um x_{TAG} und y_{TAG} sowie die axiale Position z_{TAG} sind durch die Planflächen der TAG-Linse vorgegeben und können nicht variiert werden. Beginnend mit Schritt a wird der axiale Abstand zwischen dem Faserende und der Kollimationslinse so eingestellt, dass die Abbildung der Beleuchtung im Unendlichen liegt und damit ein kollimierter Strahl entsteht. Dazu kann die Abbildung der Beleuchtung beispielsweise auf einem sehr weit entfernten Schirm betrachtet und die Kollimation so eingestellt werden, dass die

Abbildung möglichst klein wird.

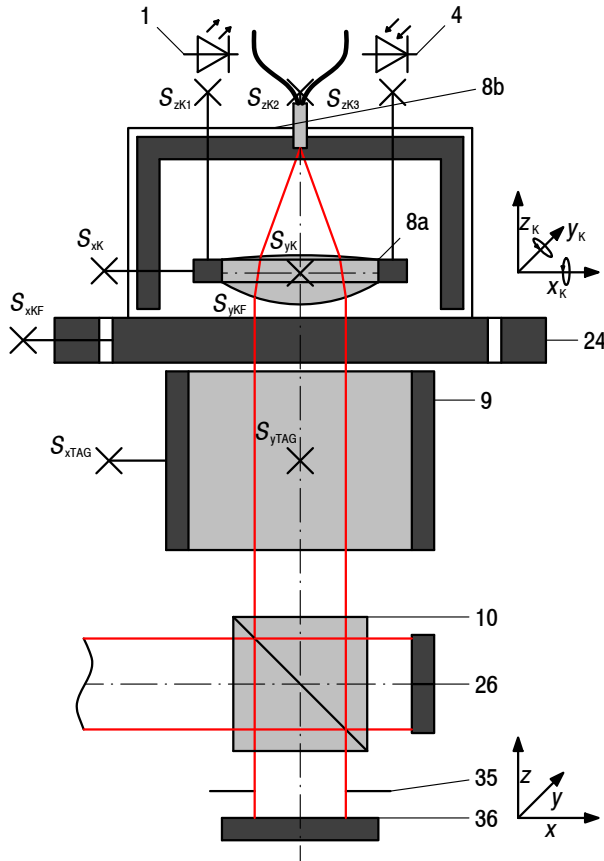


Bild 62: Optischer Aufbau zur Justierung des Laserbeleuchtungsstrahlengangs mit: 1. Laserquelle; 8. Kollimationslinse (8a. Linse; 8b. Gehäuse); 9. modulierbarer Gradientenlinse; 10. Strahlteiler; 26. Vier-Quadrantenphotodiode; 35. variabler Irisblende und 36. Silberspiegel.

Eine Verkippung der Kollimationslinse um die Achsen x_K und y_K sowie eine laterale Verschiebung in Richtung der beiden Achsen kann so jedoch nicht erkannt werden.

Daher kann in Schritt b die Mikroskopoptik durch einen Planspiegel in einem Tubusrohr an der Mikroskopaufnahme substituiert werden, wobei die Kollimationslinse um alle fünf Freiheitsgrade (außer der Rotation um z_K , da die rotationsymmetrische Linse invariant bezüglich dieser Achse ist) derart justiert wird, dass das Signal am Detektor ohne Fokusmodulation durch die

TAG-Linse maximal wird. Damit ist die Beleuchtung kollimiert und senkrecht zum Spiegel ausgerichtet, unter der Annahme, dass der Spiegel (aufgrund der gleichen Verschraubung) ebenfalls senkrecht zur Achse des Objektivs steht. Da die axiale Verschiebung der Kollimationslinse entlang der Achse z_K und die Verkippungen um die Achsen x_K und y_K aufgrund der Stellschraubenanordnungen S_{zK1-3} nicht unabhängig voneinander sind, kann bei eingeschalteter TAG-Linse und lediglicher Betrachtung und Maximierung der Maxima des Eingangssignals auch eine von der axialen Verschiebung der Kollimationslinse unabhängige Justage der Verkippung und lateralen Verschiebung erfolgen. Bei korrekter Justage um alle fünf Freiheitsgrade, sind die Maxima des Signals mit Fokusmodulation gleich dem Maximum des Signals ohne Fokusmodulation. Damit ist sichergestellt, dass der Beleuchtungsstrahl kollimiert und senkrecht zum Spiegel und damit parallel zur optischen Achse des Gesamtsystems ausgerichtet ist.

Weiterhin erfolgt in Schritt c die koaxiale Ausrichtung der Beleuchtung zur Achse des Objektivs durch gemeinsames laterales Verschieben des Faserendes und der Kollimationlinse. Dazu wird zunächst für eine grobe Ausrichtung eine einstellbare Lochblende schrittweise geschlossen und die Anordnung aus Faserende und Kollimationlinse lateral mit den Stellschrauben S_{yKF} und S_{yKF} derart verschoben, dass das Signal maximiert wird. Anschließend wird der Spiegel wieder durch die Mikroskopoptik ersetzt und die Anordnung erneut lateral derart verschoben, sodass ein Signal, welches von einem im Fokus des Objektivs befindlichen Messobjektes erzeugt wird, ebenfalls maximiert wird, wobei zunächst angenommen sei, dass ein auf dem Positioniertisch des Nanokoordinatenmessgerätes befindlicher Planspiegel approximativ orthogonal zur Achse des Objektivs steht.

In Schritt d erfolgt die konzentrische Ausrichtung der TAG-Linse zur optischen Achse des Sensors. Da ein lateraler Versatz neben einer axialen Fokusmodulation ebenfalls eine laterale Modulation bewirkt, kann dies durch Messungen an Stufennormalen in zwei lateral senkrecht zueinander stehenden Richtungen oder an Siemenssternen erfolgen, wobei die Signale an allen Kanten in allen Richtungen symmetrisch ausfallen müssen.

Die orthogonale Ausrichtung der Fokusmodulationsachse zur x - y -Ebene des Nanokoordinatenmessgerätes erfolgt in Schritt e durch erneutes gemeinsames laterales Verschieben des Faserendes und der Kollimationlinse mit den Stellschrauben S_{yKF} und S_{yKF} und damit des Beleuchtungsstrahls. Ein paralleler lateraler Versatz des Beleuchtungsstrahls zur optischen Achse des Objektivs führt dazu, dass das Messobjekt schräg zur optischen Achse des Mikroskopobjektivs beleuchtet wird. Unter der Vernachlässigung von Astigmatismen und Koma mit der Annahme eines bestmöglichst korrigierten Mikroskopobjektivs kann dies zur Ausrichtung der Beleuchtung relativ zu den Achsen des Nanokoordinatenmessgerätes genutzt werden, um fertigungstoleranz-

bedingte Verkippungen des gesamten Sensors zu korrigieren. Sind diese Toleranzen gering, kann weiterhin die Abschattung des Beleuchtungsstrahls durch die Öffnungspupille des Objektivs als vernachlässigbar betrachtet werden. Die Verkippung des Sensors um die Geräteachsen x und y kann durch Kugelmessungen bestimmt werden, wie in [P4] gezeigt wurde. Die Abtastung erfolgt dabei entlang der Sollkontur einer Kugel an einer Einmesskugel aus Stahl (bestimmt aus 16 Einzelpunkten), wobei die gemessene Kugelfläche stets innerhalb des Kennlinienbereichs liegen muss. Dies gewährleistet eine robuste, automatische Messroutine ohne Abbrüche aufgrund von Unstetigkeiten durch Kratzer oder Verschmutzungen. Zur Bestimmung der Sollkontur werden der Radius und Mittelpunkt der Kugeln durch iterative Einmessung einzelner Punkte mit Gaußausgleichselement bestimmt. Um den Verkippungswinkel Θ sowie dessen Richtung zu ermitteln, müssen mindesten zwei voneinander unabhängige Kreisbögen entlang zweier Längengrade mit den Azimutwinkeln ϕ abgetastet werden. Vorzugsweise sollten diese beiden Längengrade 90° zueinander sowie zu den Geräteachse x_{PT} und y_{PT} ausgerichtet sein (s. Abb. 63). Der Azimutwinkel ist relativ zur Achse des Positioniertisches x_{PT} angegeben. Die Kugelmessungen und laterale Justage des Beleuchtungsstrahls erfolgen dabei iterativ, bis der Verkippungswinkel bestmöglichst minimiert wurde. Wesentlich vereinfacht wird dieser Schritt durch das zusätzliche Anbringen und Auslesen einer Vierquadrantendiode an der rechten Seite des Strahlteilers (10) (vgl. Abb. 62). Aufgrund der Hysterese der Einstellschrauben ist eine schrittweise Justage insbesondere bei Richtungsänderungen anderenfalls schwierig.

In Schritt f wird die laterale Position des Fokus bezüglich des Abbe-Punktes des Nanokoordinatenmessgerätes (Schnittpunkt der drei Laserinterferometer) durch laterales Verschieben der Sensoradapterplatte des Gerätes justiert, wobei die Position über die Abbildung des Laserstrahls des z -Interferometers auf dem bildgebenden System zu sehen ist. Gegebenenfalls ist hierzu die Einkopplung des Lasers in die Faser derart zu dejustieren, dass die Laserleistung soweit reduziert wird, dass sowohl der Beleuchtungslaser als auch der Laser des z -Interferometers mit einer Belichtungseinstellung zu sehen sind. Beide Abbildungen sind dabei in Überdeckung zu bringen. Insbesondere die Schritte c-e sind nicht unabhängig voneinander und müssen daher gegebenenfalls iterativ wiederholt werden, um eine bestmögliche Justierung zu ermöglichen. Um das bildgebende System (21) nutzen zu können muss in Schritt g zunächst das Auflicht der Köhler'schen Beleuchtung über die Leuchtfeldblende (17) und Aperturblende (19) derart justiert werden, dass das von dem Bildsensor erfasste Bildfeld gerade und gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Die Intensität kann zusätzlich an der Weißlichtquelle (23) angepasst werden.

Die Belichtungseinstellungen des Bildsensors müssen so gewählt werden, dass kein Bereich überbelichtet ist. Hierzu kann einerseits in der Software

der Kamera das Histogramm der Beleuchtung und andererseits die laterale Lichtverteilung bei der Messung eines homogenen Messobjektes (z. B. Spiegel) betrachtet werden.

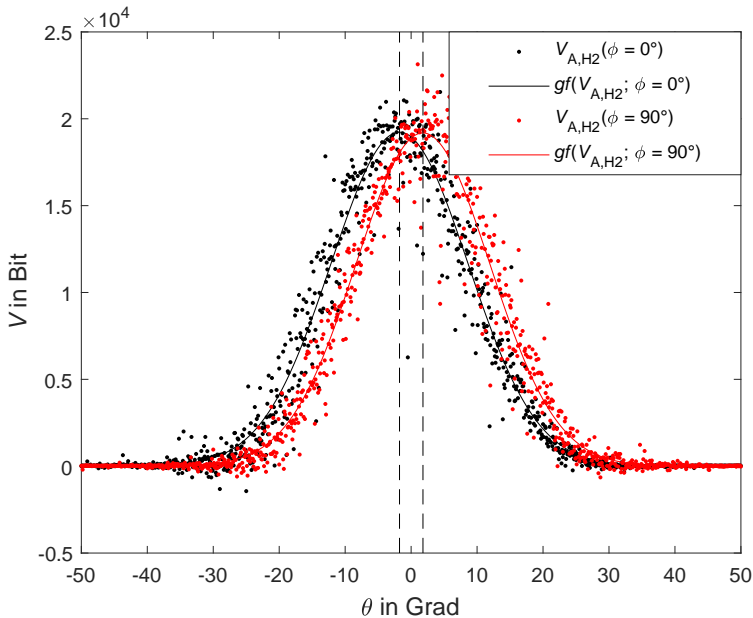


Bild 63: Gemessene Ausgangssignale $V_{A,H2}$ unter zwei senkrecht zueinander stehenden Azimutwinkeln ϕ entlang der Achsen x und y des Nanokoordinatenmessgerätes und Gaußregressionen nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate über den Polarwinkel θ einer Kugel mit dem Nennradius $r_{\text{Nenn,Kugel}} = 1,5$ mm sowie Bestimmung der Maxima [P4].

Die laterale Verdrehung der Kamera ist mit der Positioniereinheit (29) so anzupassen, dass die Zeilen und Spalten des Bildsensors parallel zu der x - und y -Achse des Positioniertisches (31) sind. Mit der axialen Positioniereinheit (28) kann schließlich der Abstand des Bildsensors zur Tubuslinse (14) derart justiert werden, dass die Schärfenebene in der Fokusebene der Laserbeleuchtung liegt. Alternativ kann zur axialen Positionierung des Bildsensors auch ein Interferometrieobjektiv verwendet werden, wobei auf einem ebenen Messobjekt die Weißlichtkorrelogramme mit der Schärfenebene der Abbildung übereinstimmen müssen.

Zur Ermittlung des maximalen Verkippungswinkels θ_{max} sind prinzipiell zwei Messungen mit unabhängigen, vorzugsweise senkrecht zueinander stehenden Azimutwinkeln ϕ ausreichend, wie in Abbildung 63 dargestellt ist. Jedoch liefern zusätzliche Messungen unter weiteren Azimutwinkeln und

anschließender Mittelwertbildung der jeweiligen Maxima (s. Abb. 64 runde, rote Markierung) robustere Ergebnisse. [P4]

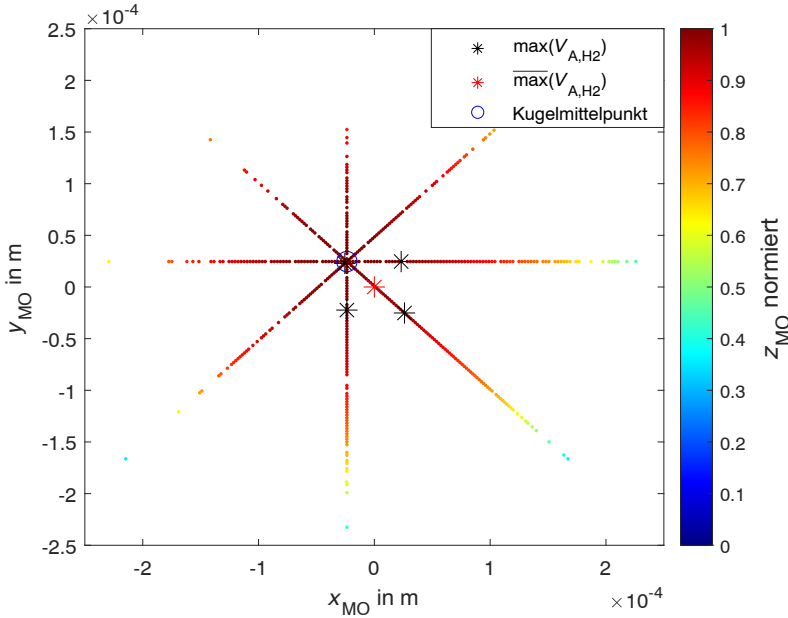


Bild 64: Messung einer Kugel auf 4 Längengraden mit Azimutwinkelschritten $\Delta\phi = 45^\circ$ [P4].

Die Messobjektkoordinaten in lateraler Richtung sind definiert als die Differenz der Koordinaten des Positioniertisches und der Position des Mittelwertes des Maximums des Ausgangssignals der 2. Harmonischen

$$x_{MO} = x_{PT} - x_{PT}(\overline{\max}(V_{A,H_2})) \quad (64)$$

und

$$y_{MO} = y_{PT} - y_{PT}(\overline{\max}(V_{A,H_2})). \quad (65)$$

Die axiale Koordinate des Messobjektes z_{MO} wurde durch die Differenz der Regelabweichung bezüglich des Arbeitspunktes der Kennlinie $z(K_{H_3/H_2,P_3})$, der axialen Position des Nanokoordinatenmessgerätes z_{PT} und der axialen Position des Mittelwertes des Maximums des Ausgangssignals der 2. Harmonischen $z_{PT}(\overline{\max}(V_{A,H_2}))$ gebildet, gemäß:

$$z_{MO}(x, y) = z(K_{H_3/H_2,P_3}(x, y)) - z_{PT}(x, y) - z_{PT}(\overline{\max}(V_{A,H_2})). \quad (66)$$

Der Verkippungswinkel des Sensors zur Positionierachse entspricht damit dem doppelten Polarwinkel dieses Mittelwertes und betrug in dem dargestellten dejustierten Beispiel $\Theta_{max} = 0,91^\circ$. Bei korrekter Justage mit sehr kleinen Azimutwinkelschritten $\Delta\phi_{max} = 0,5^\circ$, respektive einer hohen Anzahl an Längengradmessungen (hier 720), ergeben sich die in den Abbildungen 65 und 66 dargestellten Messpunkte wobei der genannte Mittelwert approximativ senkrecht über dem mithilfe einer Kugelregression nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmten Kugelmittelpunkt liegt und damit die selbe laterale Position hat, womit die z-Achse des Sensors parallel zur Geräteachse ausgerichtet ist und die lateralen Koordinaten des Messobjektes im Kugelmittelpunkt liegen. Bei den hier durchgeführten Messungen betrug der Verkippungswinkel lediglich $\Theta = 0,07^\circ$ mit einer Spannweite der Verkippungswinkel von $0,05^\circ$ bei drei Wiederholmessungen, womit die Fokusmodulationsachse im Rahmen der Genauigkeit der Einstellmöglichkeiten bestmöglich justiert ist. [P4]

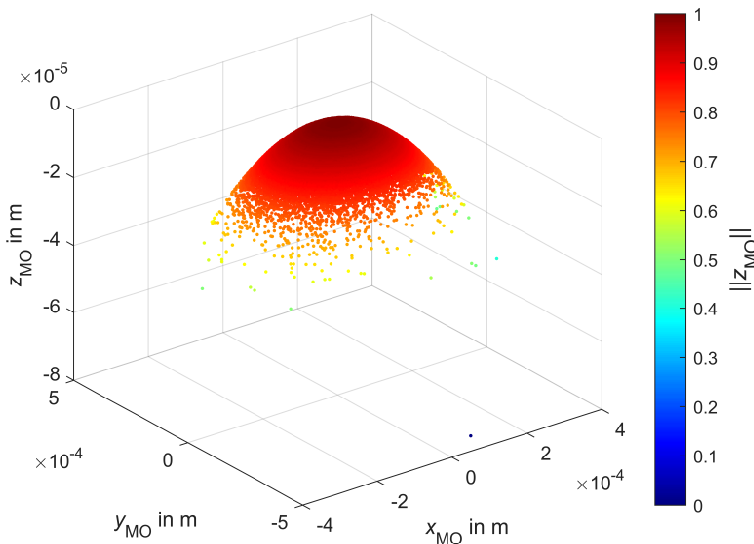


Bild 65: Höhenwert der Kugelmessung aus Quotientensignal Q_{H_3/H_2} einer Kugel mit korrekt justiertem Sensor auf 720 Längengraden mit Azimutwinkelschritten $\Delta\phi_{max} = 0,5^\circ$ [P4].

Bei einer kollinear zur optischen Achse des Mikroskopobjektivs ausgerichteten Beleuchtung ist der Akzeptanzwinkel lateral invariant. Damit sind auch

die Standardabweichungen der Gaußregressionen V_{A,H_2} unter allen Azimutwinkeln ϕ gleich. Ist der Beleuchtungsstrahlengang zur optischen Achse des Objektivs zwar parallel, jedoch lateral versetzt, zeigt sich eine Varianz der Standardabweichung in Abhängigkeit des Azimutwinkels ϕ (s. Abb. 69, S. 92). Es ist davon auszugehen, dass der Beleuchtungsstrahl demnach in Richtung des Azimutwinkels ϕ mit der geringeren Standardabweichung an der Öffnungspupille des Mikroskopobjektivs teilweise abgeschattet wird. Deutlicher wird dies bei Betrachtung einer sinusförmigen Regression mit vorgegebener Frequenz nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate der Standardabweichungen über den Azimutwinkel ϕ (s. Abb. 69, S. 92, rote Linie). Die hier beobachtete Richtungsvarianz von weniger als $0,5^\circ$ sei im Vergleich zur Streuung der Werte tolerierbar. [P4]

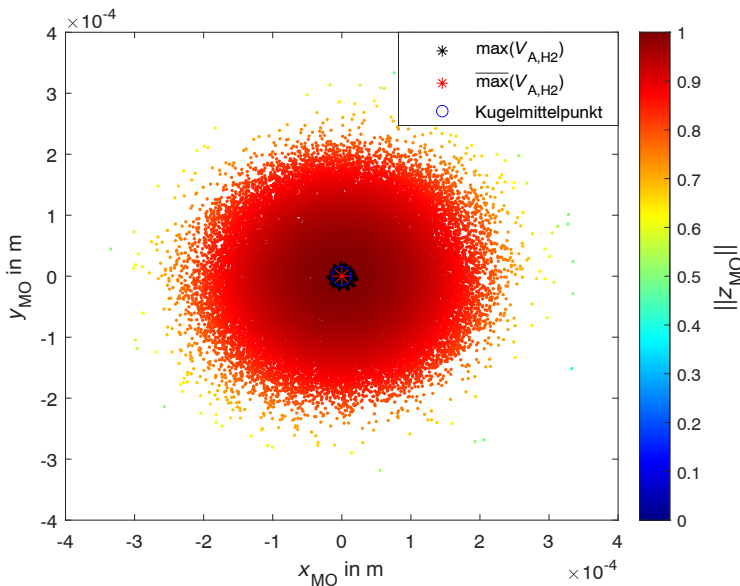


Bild 66: Ermittelte Messpunkte an einer Einmesskugel aus Quotientensignal Q_{H_3/H_2} mit korrekt justiertem Sensor auf 720 Längengraden mit Azimutwinkelschritten $\Delta\phi_{max} = 0,5^\circ$ und Darstellung der Maxima von V_{A,H_2} für jeden Azimutwinkel ϕ sowie des Mittelwerts über alle Maxima [P4].

Zur Bestimmung des Akzeptanzwinkels wurde in Abbildung 67 der Mittelwert des Ausgangssignals V_{A,H_3} über alle Längengradmessungen, respektive alle Azimutwinkel ϕ gebildet. Der Akzeptanzwinkel kann aufgrund der bei der Auswertung mit konventionellen Lock-in-Verstärkern notwendigen Schwellwertbildung über das V_{A,H_2} (vgl. Abb. 67) jedoch nicht genutzt werden

und beträgt hier lediglich etwa 7° (vgl. gestrichelte Linien). Deutlich wird dies auch bei Betrachtung des prozentualen Anteils erfasster Messpunkte über alle Azimutwinkel ϕ in Abhängigkeit der zugehörigen Polarwinkel Θ (s. Abb. 68). Dabei fällt auf, dass der Schwellwert bei einzelnen Messpunkten bereits bei sehr kleinen Polarwinkeln Θ unterschritten wird. Wird hingegen für die Bestimmung der Kennliniengrenze das Quotientensignal $Q_{H2,M}$ genutzt, kann der Schwellwert soweit gesenkt werden, dass dieser nurmehr gerade größer als das Rauschen des Ausgangssignals $V_{A,H2}$ ist (hier bei etwa 30 % des Maximalwertes). Die deutliche Erhöhung des Akzeptanzwinkels wird weiterhin im direkten Vergleich der erfassten Messpunkte in Abbildung 70 deutlich. [P4]

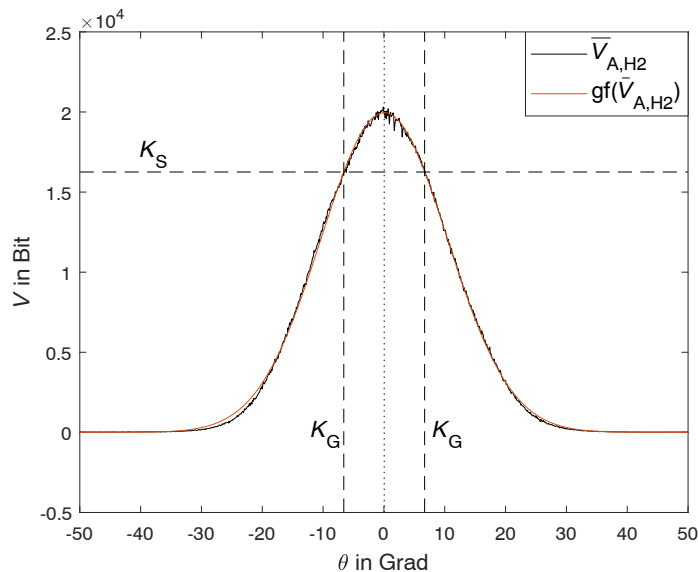


Bild 67: Mittelwert $\bar{V}_{A,H2}(\sum_{\phi=0,5}^{360} V_{A,H2}(\phi))$ der Ausgangssignale $V_{A,H2}$ über alle Längengradmessungen mit den Azimutwinkeln ϕ , Gaußregression $gf(\bar{V}_{A,H2})$ über diesen Mittelwert sowie Schwellwertbildung K_S und Festlegung der Kennliniengrenzen K_G [P4].

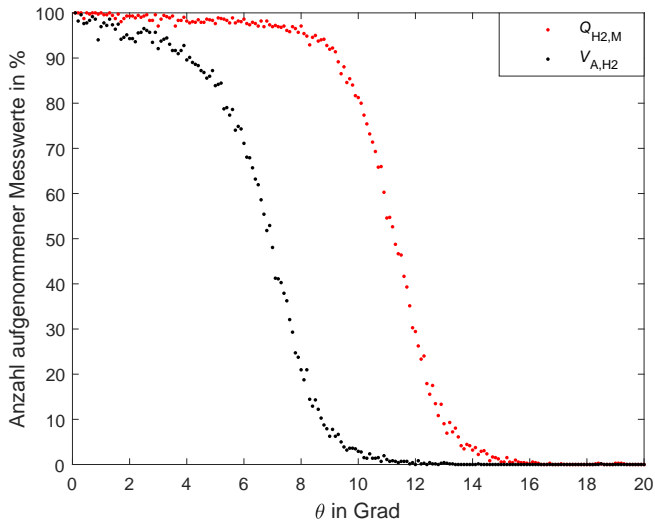


Bild 68: Prozentuale Anzahl der erfassten Messpunkte von 720 Azimutwinkeln mit Winkelschritten $\Delta\phi_{max} = 0,5^\circ$ über die zugehörigen Polarwinkel Θ für jeweils eine Messung mit einer Schwellwertbildung über das Ausgangssignal $V_{A,H2}$ (schwarz) sowie über das Quotientensignal $Q_{H2,M}$ (rot) [P4].

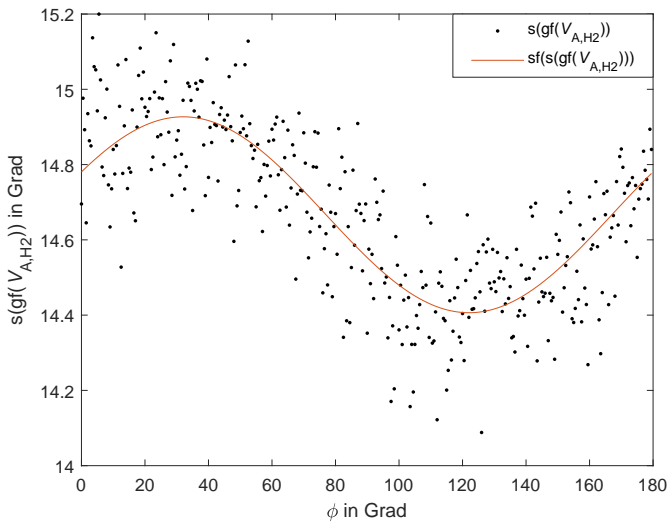


Bild 69: Standardabweichungen $s(gf(V_{A,H2})(\phi))$ der Gaußregressionen $gf(V_{A,H2})(\phi)$ der Ausgangssignale $V_{A,H2}(\phi)$ über die Polarwinkel Θ in Abhängigkeit der Azimutwinkel ϕ und Sinus-Fit $sf(s(gf(V_{A,H2})(\phi)))$ [P4].

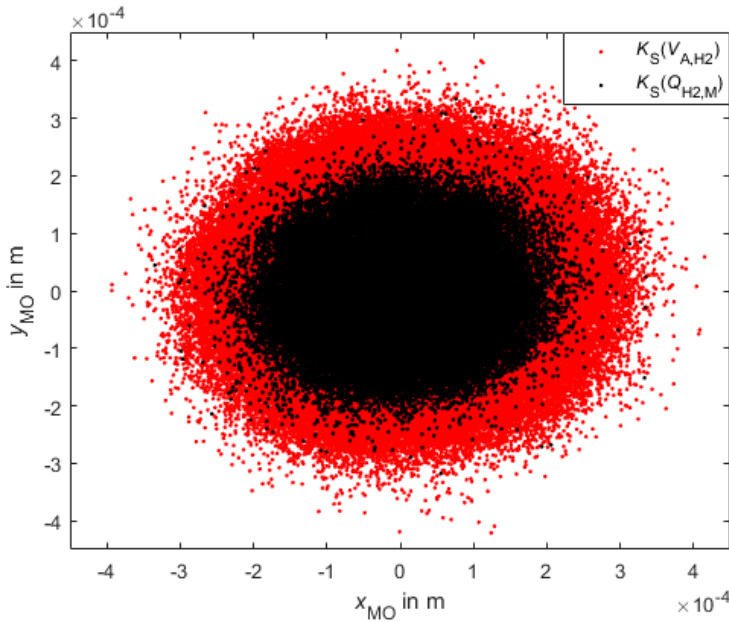


Bild 70: Darstellung der erfassten Messpunkte jeweils durch die Quotientensignale $Q_{H3,M}$ einer Messung mit einer Schwellwertbildung über das Ausgangssignal $V_{A,H2}$ (schwarz) sowie über das Quotientensignal $Q_{H2,M}$ (rot) [P4].

3.9 Constant distance scanning

Um den Einfluss zeitlich temperaturbedingter Driften und der daraus resultierenden Messabweichungen zu verdeutlichen wurde ein Raunormal jeweils mit der gezeigten Fokusmodulation und axialer Nachführung der z -Achse des Nanokoordinatenmessgerätes (*constant distance scanning*) und mit konventioneller Konfokalmikroskopie bei ausgeschalteter TAG-Linse (*stage scanning*) an den selben, im Rahmen der Positioniergenauigkeit des Nanokoordinatenmessgerätes, lateralen Positionen 25 mal gemessen. Da für die wiederholten Messungen die laterale Position des Nanokoordinatenmessgerätes, an welchem die Messpunkte aufgenommen werden, nicht exakt identisch sind, werden alle erfassten Werte auf ein einheitliches Gitter an x -Werten mit einem Gitterabstand von 5 nm linear interpoliert. Bei den Messungen mit axialer Nachführung wurde die z -Position des Nanokoordinatenmessgerätes z_{PT} mithilfe der Kennlinie $K_{H3/H2,P3}$ während der lateralen Abtastung auf den Arbeitspunkt $z(K_{H3/H2,P3} = 0)$ geregelt (s. Abb. 71). [P3]

Die axiale Position des Messobjektes z_{MO} wurde durch die Differenz der Regelabweichung bezüglich des Arbeitspunkts der Kennlinie $z(K_{H3/H2,P3})$ und der axialen Position des Nanokoordinatenmessgerätes z_{PT} bestimmt mit:

$$z_{MO}(x, y) = z(K_{H_3/H_2, P_3}) - z_{PT}(x, y). \quad (67)$$

Bei der Variante des (*stage scanning*) wurde das Raunormal auf 124 axialen Positionen z_{PT} mit einer Schrittweite von 85 nm lateral abgetastet. Zur Bestimmung der axialen Position des Messobjektes z_{MO} wurde für jede laterale Position mithilfe einer gefitteten Gauß-Kurve die axiale Position mit der maximalen Intensität des Eingangssignals ermittelt. [P3]

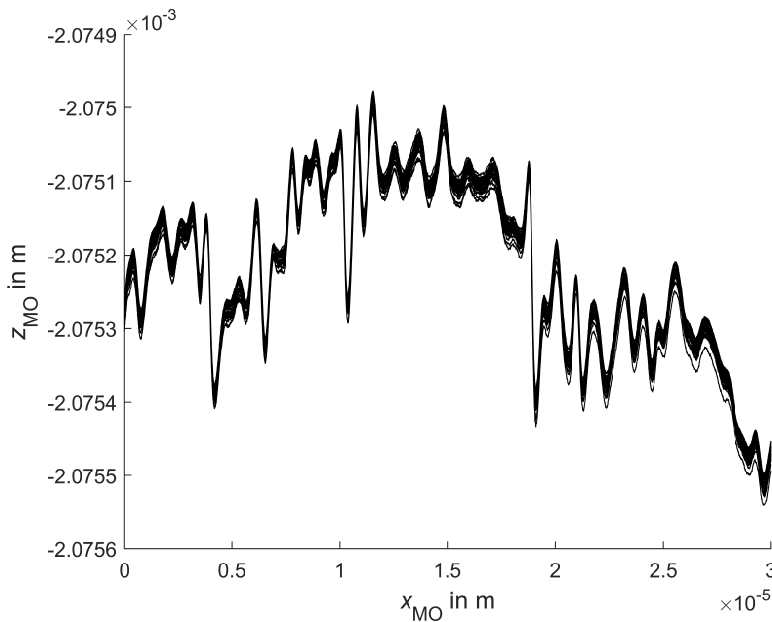


Bild 71: Darstellung von 25 wiederholten Scanmessungen mit axialer Nachregelung der z-Achse des Positioniersystems mit Bestimmung der Höhenwerte des Messobjektes z_{MO} aus der Differenz der Position des Nanokoordinatenmessgerätes z_{PT} und der Regelabweichung vom Arbeitspunkt der Kennlinie $z(K_{H_3/H_2, P_3})$ [P3].

Während die laterale Abtastung mit axialer Nachregelung über eine laterale Strecke von 30 μm bei einer Abtastgeschwindigkeit von 2 $\mu\text{m/s}$ lediglich 15 s benötigt, dauert dies bei der konventionellen Methode inklusive dem Rückfahren zur lateralen Startposition 35 min. Bei 25 Wiederholmessungen bedeutet dies 6 min im Vergleich zu 14 Stunden. Ungeachtet der nachfolgenden Betrachtungen zu Messabweichungen zeigt sich hier bereits eine immense Zeitersparnis von 99,3 %, die umso größer wird, je höher der axiale Messbereich ist. [P3]

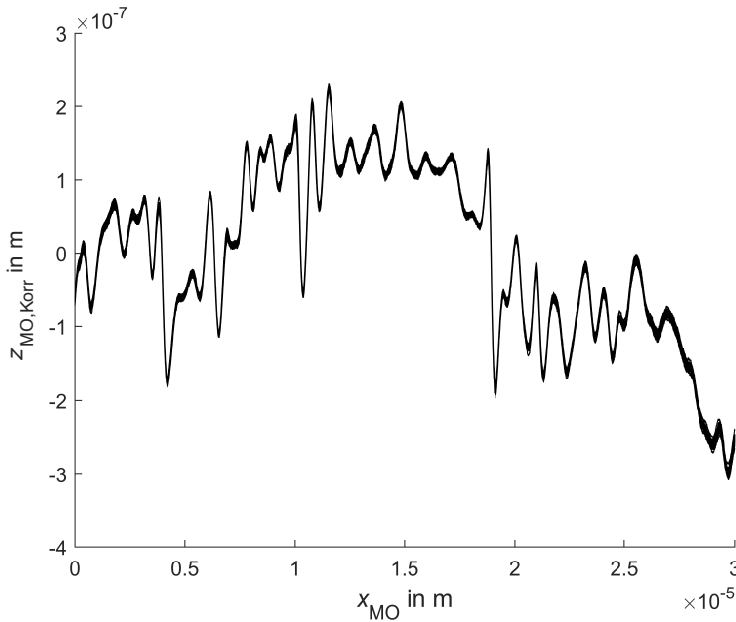


Bild 72: Darstellung von 25 wiederholten Scanmessungen mit axialer Nachregelung der z-Achse des Positioniersystems mit Bestimmung der Höhenwerte des Messobjekts z_{MO} aus der Differenz der Position des Nanokoordinatenmessgerätes z_{PT} und der Regelabweichung vom Arbeitspunkt der Kennlinie $z(K_{H_3/H_2,P_3})$ sowie Differenzbildung mithilfe des Mittelwertes aller 25 Messungen $z_{MO,korr} = z(K_{H_3/H_2,P_3}) - z_{PT} - \bar{z}_{MO} [P_3]$.

Bei Betrachtung der maximalen Spannweiten der Höhenwerte z_{MO} der 25 Wiederholmessungen über alle lateralen Messpositionen x_{MO} zeigt sich zunächst ein geringer, jedoch nicht signifikanter Unterschied zwischen beiden Scanmethoden mit $R_{\text{constant distance}}(z_{MO}) = 53,1 \text{ nm}$ und $R_{\text{stage scanning}}(z_{MO}) = 57,6 \text{ nm}$. [P3]

Unter der Annahme eines begrenzten Wärmestroms sei angenommen, dass die übertragene Wärmeenergie von der Zeit t abhängt. Respektive ist davon auszugehen, dass die Temperaturänderung des Sensors und des Messobjektes umso geringer ist, je kürzer das Zeitintervall der Messung ist. Wird weiterhin von einer axialen Drift zwischen den einzelnen Wiederholmessungen ausgegangen, lässt sich diese durch eine Differenzbildung aller Höhenwerte z_{MO} einer Messung mit deren Mittelwertbildung über alle Höhenwerte \bar{z}_{MO} korrigieren (s. Abb.72). Wird dies für die beiden Scanvarianten durchgeführt lässt sich jeweils erneut die maximale Spannweite $R(z_{MO})$, die maximale Standardabweichung $s_{\text{max}}(z_{MO})$ sowie die mittlere Standardabweichung $s(z_{MO})$ über alle axialen Höhenwerte z_{MO} der 25 Wiederholmessungen bestimmen. Bei Betrachtung von Tabelle 3 wird deutlich, dass dies im Fall des *constant*

distance scanning zu einer deutlichen Reduktion führt, wohingegen beim *stage scanning* kaum eine Verbesserung erzielt werden konnte. [P3]

Tabelle 3: Darstellung der maximalen Spannweite $R(z_{MO})$, der maximale Standardabweichung $s_{\max}(z_{MO})$ sowie die mittlere Standardabweichung $\bar{s}(z_{MO})$ über alle axialen Höhenwerte z_{MO} aus 25 Wiederholmessungen für die Scanverfahren des *constant distance scanning* und des *stage scanning* [P3].

	$R(z_{MO})$ in nm	$s_{\max}(z_{MO})$ in nm	$\bar{s}(z_{MO})$ in nm
<i>constant distance</i>	33,3	7,8	3,2
<i>stage scanning</i>	48,7	11,3	3,9

Damit erweist sich die neue Variante neben der Zeitersparnis auch als vorteilhaft bei Messungen ohne zusätzliche Temperierhaube unter entsprechenden Umgebungsbedingungen mit höheren Temperaturschwankungen [P3].

Für die axiale Nachregelung (*constant distance scanning*) des Positioniertisches ist in der Steuerung des Nanokoordinatenmessgerätes ein PI-Regler (engl. *proportional-integral controller*) realisiert. Mit den Standardregelparametern hängt damit die Regelabweichung $z(K_{H3/H2,P3})$ insbesondere von der Steigung der zu messenden Oberfläche sowie der Scangeschwindigkeit ab. Weiterhin werden die lateralen Positionierabweichungen ebenfalls von der Scangeschwindigkeit beeinflusst. Um eine optimale Scangeschwindigkeit zu finden, wurden daher Messungen mit axialer Nachregelung der z -Achse mit unbekannter Kontur sowie mit vorgegebener Sollkontur auf einem konvexen, spärlichen, silberbeschichteten Spiegel mit einer nominellen Brennweite $f_{\text{Spiegel}} = 19$ mm, respektive einem nominellen Radius $r_{\text{Spiegel}} = 38$ mm durchgeführt. Um weitere Messabweichungen zu minimieren wurden diese Messungen mit der Temperierhaube durchgeführt. Wie in Abbildung 73 zu erkennen ist, kann dabei ein Messobjekt nur solange kontinuierlich gescannt werden, solange die Regelabweichung $z(K_{H3/H2,P3})$ innerhalb des Kennlinienbereichs liegt, d. h. zwischen der Kennlinienuntergrenze K_{UG} und der Kennlinienobergrenze K_{UG} . Insbesondere beim Scannen einer unbekanntem Kontur, wie in diesem Beispiel einer Kugelfläche, führt dies mit zunehmender Steigung in Abhängigkeit des lateralen Abstands vom Kugelmittelpunkt zu einer Limitierung der maximal möglichen Scangeschwindigkeit oder einer Einschränkung des lateralen Scanbereichs (hier ± 3 mm). [P7]

Weiterhin ist es auch möglich mit dem Nanokoordinatenmessgerät statt einem Scan unbekannter Kontur, bzw. von einem Startpunkt linear zu einem Endpunkt zu scannen, eine Normgeometrie vorzugeben (hier eine Kreisbahn). Dies kann mit dem vorgestellten Sensor entlang dieser Geometrie mit

axialer Nachregelung (*constant distance scanning*) erfolgen oder, falls die Ist-Kontur des Messobjektes weniger als der Kennlinienbereich des Sensors von der vorgegebenen Soll-Kontur abweicht, ohne axiale Nachführung. Beide Varianten sind in Abbildung 74 dargestellt, wobei hier mit einer Scangeschwindigkeit von $v = 150 \mu\text{m}$ über eine Länge von 20 mm mit einer Höhendifferenz von über 1 mm gescannt wurde. [P7]

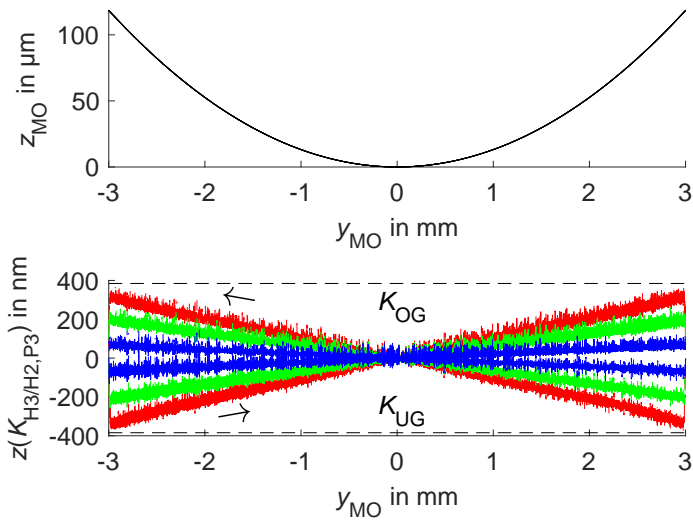


Bild 73: Darstellung der Höhenwerte z_{MO} eines Scans mit *constant distance scanning* und unbekannter Kontur eines konvexen Spiegels mit nominellem Radius $r_{\text{Spiegel}} = 38 \text{ mm}$ (oben) sowie der resultierenden Regelabweichungen $z(K_{H_3/H_2, P_3})$ bei unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten $v = 125 \mu\text{m}$ (rot), $v = 75 \mu\text{m}$ (grün) und $v = 25 \mu\text{m}$ (blau) [P7].

Wohingegen die gemittelten axialen Standardabweichungen über alle Messpunkte in $\bar{s}(z_{MO})$ mit höheren lateralen Scangeschwindigkeiten abnehmen, steigen die lateralen Standardabweichungen $\bar{s}(x_{MO})$ und $\bar{s}(y_{MO})$ aufgrund zunehmender Positionierabweichungen des Nanokoordinatenmessgerätes an. Bei sehr hohen Scangeschwindigkeiten ($1000 \mu\text{m/s}$ und $2000 \mu\text{m/s}$) scheinen sich neben den sonstigen Abweichungen des Sensors ebenfalls die Positionierabweichungen in z -Richtung bemerkbar zu machen. Wie in Abbildung 75 deutlich wird, steigen die Abweichungen $s(y_{MO})$ während der Beschleunigung des Positioniertisches zunächst an, bis ein Maximum erreicht wird. [P7]

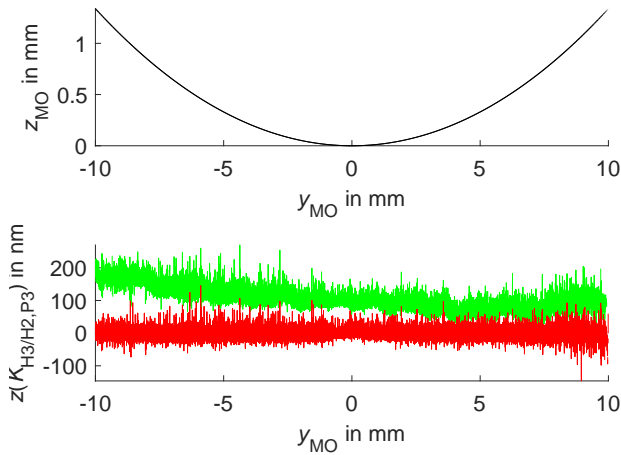


Bild 74: Darstellung der Höhenwerte z_{MO} eines Scans entlang einer vorgegebenen Sollkontur (Kreis) eines konvexen Spiegels mit nominellem Radius $r_{\text{Spiegel}} = 38 \text{ mm}$ (oben) sowie der resultierenden Regelabweichungen $z(K_{H3/H2,P3})$ mit axialer Nachführung (rot) und ohne axiale Nachführung (grün) [P7].

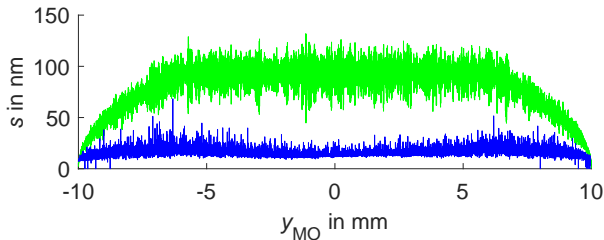


Bild 75: Darstellung der Standardabweichungen $s(y_{MO})$ und $s(z_{MO})$ bei einer Scangeschwindigkeit $v = 3 \text{ mm/s}$ [P7].

Um die Abweichungen in allen drei Achsen zu minimieren, kann eine kombinierte mittlere Standardabweichung

$$\bar{s}_k = \sqrt{\bar{s}^2(x_{MO}) + \bar{s}^2(y_{MO}) + \bar{s}^2(z_{MO})} \quad (68)$$

berechnet werden. In Abbildung 76 sind diese Standardabweichungen über verschiedene Scangeschwindigkeiten v aufgetragen. Hier ist ein Minimum bei $100 \mu\text{m/s}$ und $150 \mu\text{m/s}$ zu erkennen, weshalb die in Abbildung 77 dargestellten flächigen Kugelmessungen mit einer Scangeschwindigkeit $v=100 \mu\text{m/s}$ und mit Azimutwinkelschritten $\Delta\phi = 45^\circ$ erfolgten. [P7]

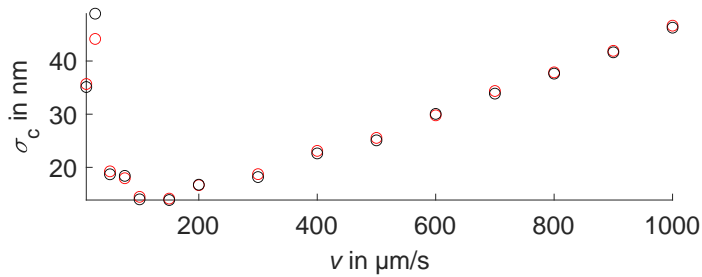


Bild 76: Darstellung der kombinierten mittleren Standardabweichungen $\bar{\sigma}_k$ über die Scangeschwindigkeit v [P7].

Bei der Durchführung von 22 Wiederholmessungen wurde ein Radius $r_{\text{mess,Spiegel}} = 38,031997 \text{ mm}$ ermittelt mit einer Standardabweichung $s(r_{\text{mess,Spiegel}}) = 48,1 \text{ nm}$. [P7]

Tabelle 4: Darstellung der maximalen Spannweite $R(z_{\text{MO}})$, der maximalen Standardabweichung $s_{\text{max}}(z_{\text{MO}})$ sowie der mittleren Standardabweichung $s(z_{\text{MO}})$ über alle axialen Höhenwerte z_{MO} aus 25 Wiederholmessungen eines konvexen Spiegels mit Scannen entlang einer vorgegebenen Sollkontur mit und ohne axiale Nachregelung [P7].

Scangeschwindigkeit v in $\mu\text{m/s}$	$\bar{\sigma}_x$ in nm	$\bar{\sigma}_y$ in nm	$\bar{\sigma}_z$ in nm
10	1,0/0,6	4,8/0,3	35/27
25	1,1/1,0	6,2/1,7	44/49
50	1,0/1,0	3,9/2,8	19/18
100	0,9/0,9	5,3/5,0	13/13
150	0,9/0,8	7,3/7,1	12/12
200	0,9/0,8	9,5/9,3	14/14
300	0,9/0,9	13/14	12/12
500	0,9/1,0	23/23	12/11
1000	1,4/1,4	44/44	15/14
2000	2,2/2,1	78/78	15/16

Die beschriebenen Messungen sind ebenfalls geeignet, um die in Kapitel 3.8 beschriebene Justierung des optischen Systems vorzunehmen bzw. zu überprüfen wie in Abbildung 78 dargestellt ist.

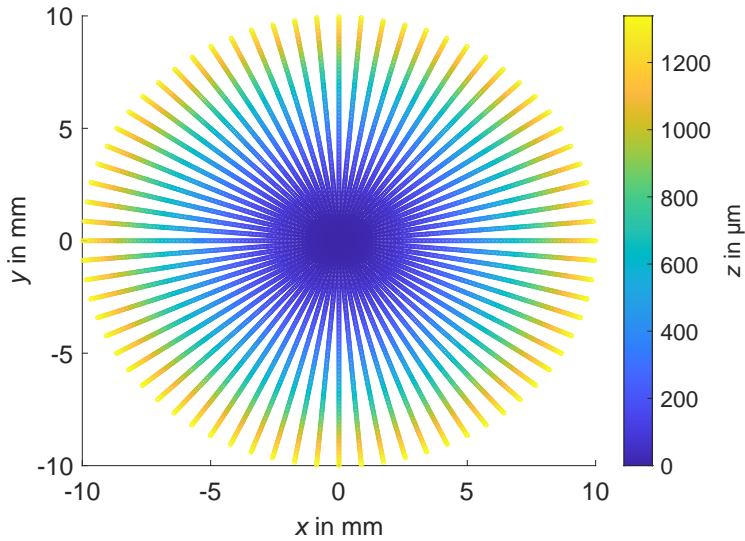


Bild 77: Messungen eines konkaven Spiegels mit einem nominellen Radius $r_{\text{Nenn,Spiegel}} = 38 \text{ mm}$ und Azimutwinkelschritten $\Delta\phi = 5^\circ$ [P7].

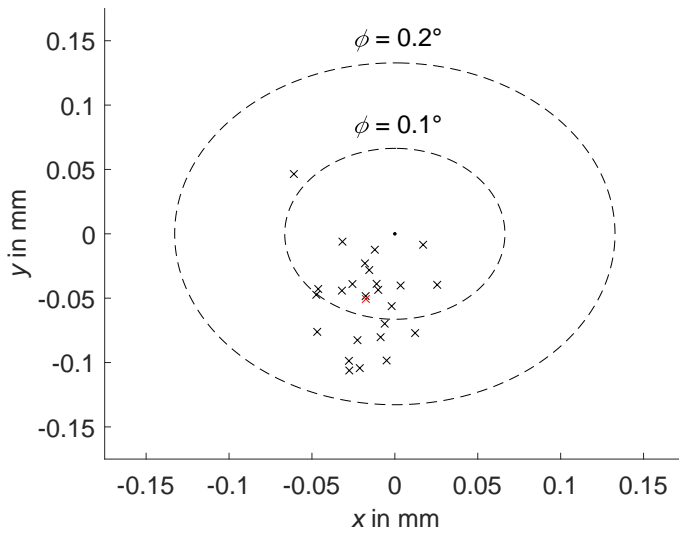


Bild 78: Bestimmung des Verkippungswinkels ϕ aus 25 Wiederholmessungen [P7].

3.10 Gittermessungen

Um die laterale Auflösung und optischen Übertragungsfunktionen des Sensors zu ermitteln, wurden zunächst Messungen ohne Fokusmodulation an einem Rechteckgitter [170] mit Ortsfrequenzen von 7,5-3300 LPPM in Linienpaaren pro Millimeter durchgeführt, welche etwa den Gitterabständen G zwischen $133 \mu\text{m}$ und $0,3 \mu\text{m}$ entsprechen (s. Abb. 79). In Abbildung 80 ist das normierte Eingangssignal V_E für unterschiedliche Ortsfrequenzen LPPM dargestellt. [P5]

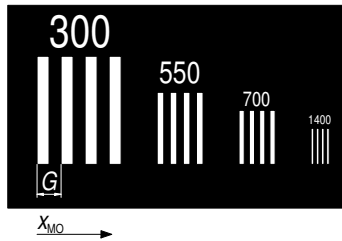


Bild 79: Beispielhafte Darstellung der Gitterstrukturen auf einem Gitternormal mit den Gitterabständen G [170].

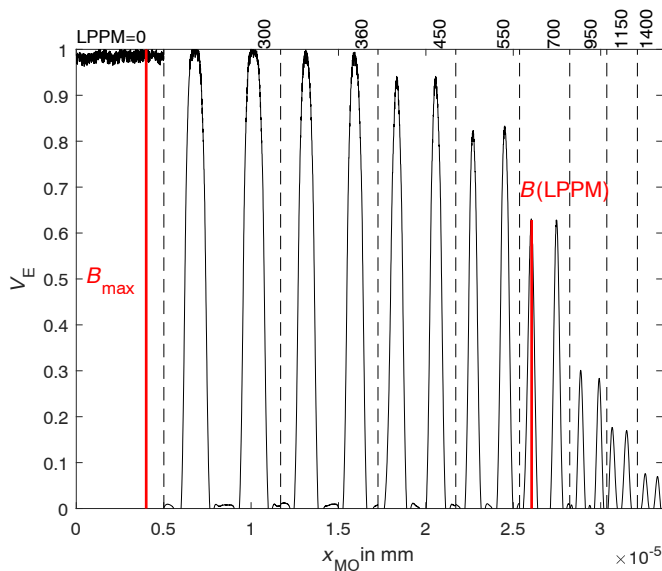


Bild 80: Gemessenes Eingangssignal V_E bei lateralem Scan ohne Fokusmodulation eines Gitternormals mit unterschiedlichen Gitterabständen und Linienpaaren pro Millimeter $LPPM$. [nach Messungen aus P5]

Aus dem Quotient der maximalen Amplitude B_{\max} (ermittelt an einer ebenen Stelle zwischen den Gitterstrukturen mit $\text{LPPM} = 0 \text{ mm}^{-1}$) und der gemessenen Amplitude $B(\text{LPPM})$ an der entsprechenden Gitterstruktur lässt sich zunächst die Kontrasttransferfunktion (Abk. KTF) wie folgt bestimmen [171, 172]:

$$\text{KTF}(\text{LPPM}) = \frac{B_{\max}}{B(\text{LPPM})}. \quad (69)$$

Die KTF kann durch eine Fourierreihenentwicklung auf ein Gitter mit sinusförmigem Graustufenverlauf umgerechnet werden, womit sich die Modulationstransferfunktion (Abk. MTF) bestimmen lässt [171, 172]

$$\text{MTF}(\text{LPPM}) = \frac{\pi}{4} [\text{KTF}(\text{LPPM}) + \frac{1}{3} \text{KTF}(3\text{LPPM}) - \frac{1}{5} \text{KTF}(5\text{LPPM}) + \dots]. \quad (70)$$

Beide Funktionen sind in Abbildung 81 dargestellt. Durch eine Regression der MTF lässt sich die Grenzfrequenz $\lambda_c = 1/667 \text{ mm} = 1,5 \mu\text{m}$ bestimmen, an der die MTF auf die Hälfte des maximalen Wertes gesunken ist.

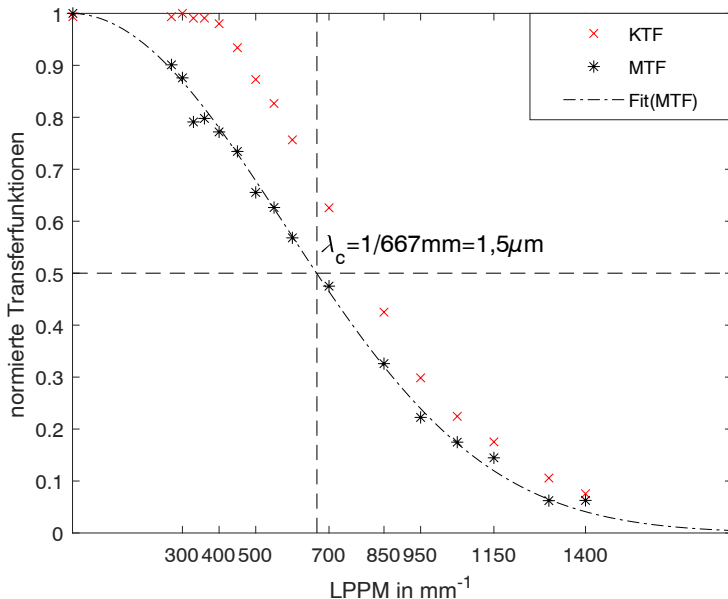


Bild 81: Kontrasttransferfunktion (KTF), Modulationstransferfunktion (MTF) und Regression der MTF über die Ortsfrequenz LPPM mit Grenzfrequenz λ_c . [nach Messungen aus P5]

Da die Genauigkeit des Sensors auch mit der topografischen räumlichen Auflösung in Zusammenhang steht, wurden weiterhin Messungen an einem Mikrostufenhöhennormal mit Gitterabständen G zwischen $6\ \mu\text{m}$ und $0,3\ \mu\text{m}$, respektive Ortsfrequenzen zwischen $166\ \text{LPPM}$ und $3333\ \text{LPPM}$ durchgeführt (s. Abb. 82 u. 83). [P5]

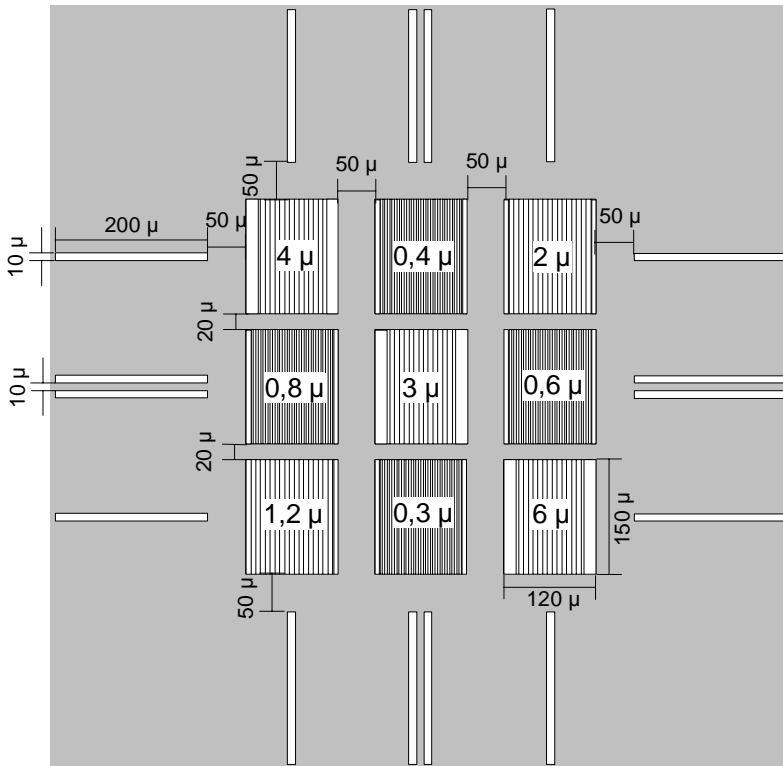


Bild 82: Auszug aus Datenblatt eines Mikrostufennormals [173] mit freundlicher Genehmigung von SiMETRICS GmbH.

Die Stufenstrukturen mit einer nominellen Höhe von $192\ \text{nm}$ wurden bei ausgeschalteter TAG-Linse konventionell über Maximumsuche des Eingangssignals V_E und mit Fokusmodulation und Auswertung über die Kennlinie $K_{\text{H}_3/\text{H}_2}$ gemessen. Die Stufenhöhen wurden jeweils durch lineare Regression über ein Drittel der Breite der Stufenplateaus (s. Abb. 83; rote Linien) nach [174] ausgewertet. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Insbesondere mit der Höhenbestimmung aus den Kennlinien $K_{\text{H}_3/\text{H}_2}$ sind hier bei $\text{LPPM} = 500\ \text{mm}^{-1}$ die geringsten Abweichungen zum nominellen Wert zu sehen. [P5]

Bei Betrachtung von Abbildung 84 wird weiterhin ersichtlich, dass über

eine Schwellwertbildung K_{S,H_2} des 2. Harmonischen Signals V_{A,H_2} (s. blau gestrichelte Linie) Messpunkte mit schlechter Signalqualität (hier Batwings in schwarz) effektiv gefiltert werden können (vgl. a. Abb. 83) [P5].

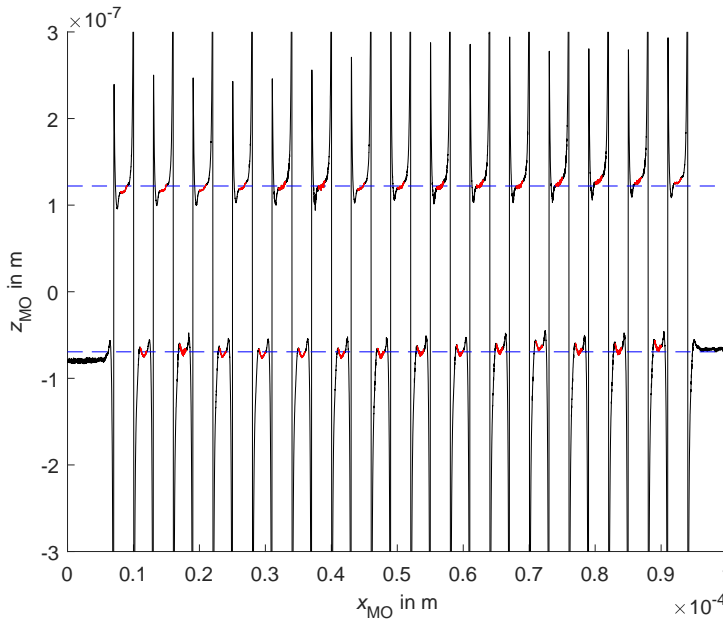


Bild 83: Stufenhöhenmessung mit Fokusmodulation Ermittlung der Messobjekthöhe z_{MO} mit der Kennlinie aus dem Quotientensignal K_{H_3/H_2} sowie der Stufenhöhenermittlung nach [174] durch lineare Regression über ein Drittel der Stufenplateaus (rot). [P5]

Tabelle 5: Stufenhöhenauswertung mit der nominellen Höhe $h_{nenn} = 192 \text{ nm}$ mit konventioneller Konfokalmikroskopie $h(z_{MO}(V_E))$, Fokusmodulation und Auswerten über die Kennlinie des Quotientensignals $h(z_{MO}(K_{H_3/H_2}))$ sowie des Ausgangssignals der 3. Harmonischen $h(z_{MO}(K_{H_3}))$ nach [174]. [P5]

LPPM in mm^{-1}	$h(z_{MO}(V_E))$ in nm	$h(z_{MO}(K_{H_3/H_2}))$ in nm	$h(z_{MO}(K_{H_3}))$ in nm
167	191,5	194,1	196,7
250	190,6	190,1	192,9
333	190,2	198,6	185,4
500	237,4	197,4	155,6

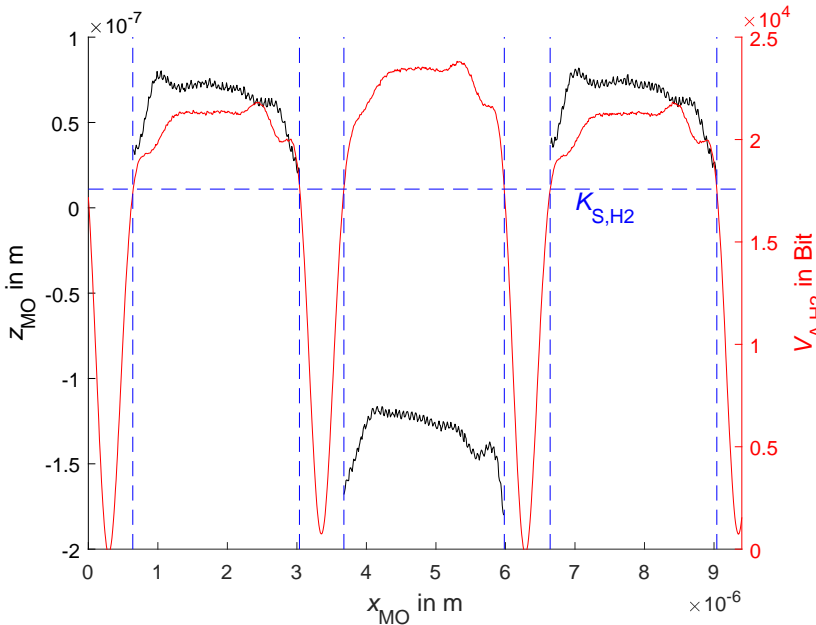


Bild 84: Ermittlung der Messobjekthöhe z_{MO} über Kennlinie des Quotientensignals $K_{H3/H2}$ sowie Filterung über Schwellwert $K_{S,H2}$ des Ausgangssignals der 2. Harmonischen $V_{A,H2}$ (rot). [P5]

3.11 Kollimationsmodulation

Im Folgenden soll eine in Abbildung 85 dargestellte alternative Fokusmodulation durch axiale Modulation der Kollimationslinse vorgestellt werden. Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, ist die Verwendung von modulierbaren Gradientenoptiken insbesondere aufgrund ihrer hohen Modulationsfrequenzen in der Nanomesstechnik sowie zur schnellen Nachregelung der z -Achse im *constant distance mode* vorteilhaft. Aufgrund der hohen Kosten sowie der begrenzten Möglichkeiten zur Miniaturisierung sind diese Optiken in anderen Bereichen der Fertigungsmesstechnik jedoch nur bedingt einsatzfähig bzw. ökonomisch.

Bei Betrachtung von Gleichung 35 sowie Abbildung 85 wird ersichtlich, dass eine Fokusmodulation auch durch Änderung der Gegenstandsweite g_K der Abbildung des Faserendes bezüglich der Kollimationslinse (8), respektive einer axialen Verschiebung der Kollimationslinse um z_K erfolgen kann. Eine sinusförmige Kollimationsmodulation mit der Amplitude A_K resultiert schließlich in einer approximativ sinusförmigen Fokusmodulation, mit einer in Abhängigkeit der Brennweiten der Kollimationlinse und der Brennweite des Objektivs proportionalen Amplitude A_F . Dadurch können die Anzahl

optischer Elemente, die Sensorgröße sowie der Aufwand für die Justierung des Systems reduziert werden.

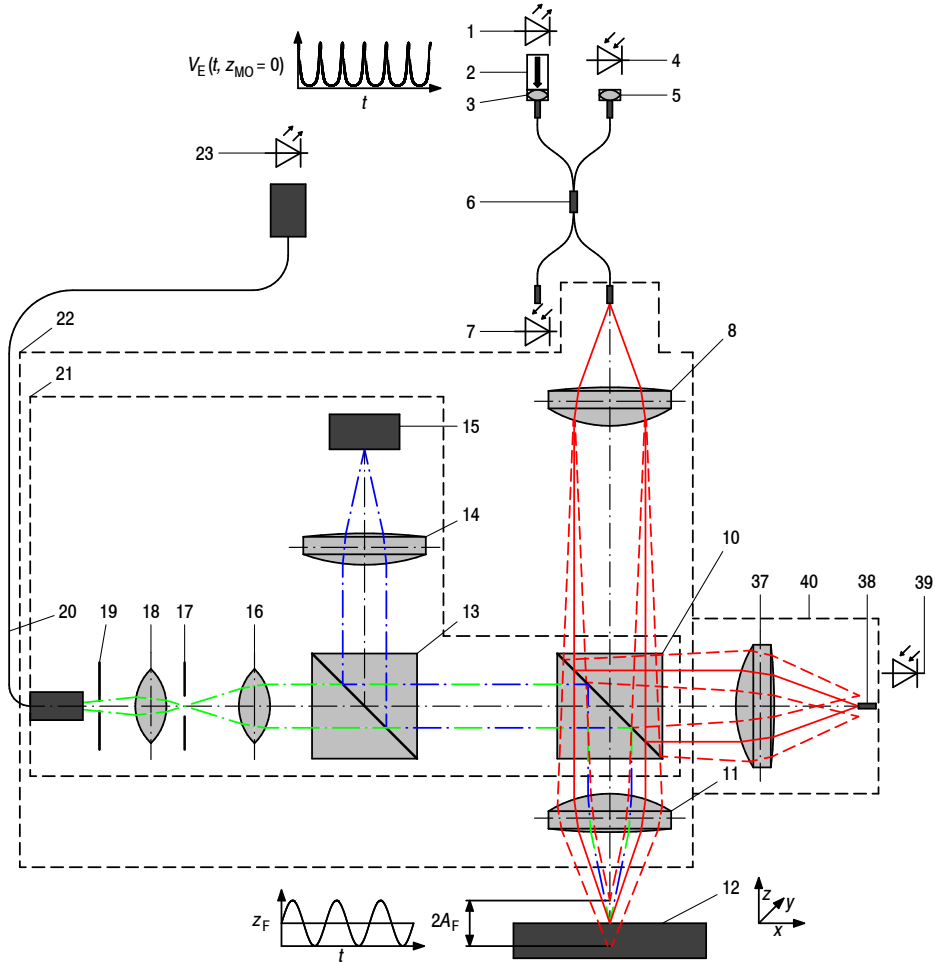


Bild 85: Optischer Aufbau eines fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors durch Kollimationsmodulation mit: 1. Laserquelle; 2. optischer Isolator; 3. Sammellinse; 4. Photodiode; 5. Sammellinse; 6. Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 7. optisches Leistungsmessgerät; 8. Kollimator; 10. Strahlteiler; 11. Objektiv; 12. Messobjekt; 13. Strahlteiler; 14. Tubuslinse; 15. Bildsensor; 16. Kondensorlinse; 17. Leuchtfeldblende; 18. Kollektorlinse; 19. Aperturblinse; 20. Lichtwellenleiter; 21. bildgebendes System; 22. Messkopf; 23. Weißlichtquelle; 37. Fokussierlinse; 38. Lichtwellenleiter; 39. Photodiode.

Im Vergleich zum *objective scanning* kann weiterhin ein feststehendes Mikroskopobjektiv verwendet werden, welches bezüglich der Abbildungsqualität des bildgebenden Systems (21) sowie der Numerischen Apertur

in Relation zum Arbeitsabstand (aufgrund der in der Linsenkombination des Mikroskopobjektivs vor der Fokussierung vergrößerten Abbildung) vorteilhaft ist.

Bei einer axialen Modulation der Kollimationslinse soll im Folgenden generell zwischen einer erzwungenen Schwingungsanregung mit beliebiger Frequenz und einer parametrischen Anregung in der Resonanzfrequenz des Systems unterschieden werden. Wohingegen bei einer erzwungenen Anregung die Position der Kollimationslinse erfasst werden muss (insbesondere bei Verwendung von Piezoaktoren aufgrund von Kriecheffekten), kann im Resonanzfall und der Annahme eines harmonischen Oszillators von einem konstant bleibenden Schwingungsmittelpunkt um die Nullpunktlage sowie einer konstanten Amplitude ausgegangen werden. Zudem ist die Amplitude der Anregung nur durch die Dämpfung des Systems limitiert und folglich wesentlich höher.

Insbesondere unter der Ausnutzung einer solchen resonanten Schwingung werden im Folgenden zwei innovative Kollimationslinsenmodulationslösungen auf Basis eines Piezobiegeschwingers sowie einer Tauchspulenanordnung vorgestellt.

Dabei wird zunächst der theoretische Zusammenhang zwischen Kollimations- und Fokusmodulation aufgezeigt, nachfolgend Untersuchungen zur Ermittlung und Messung der Resonanzfrequenzen sowie schließlich die technischen Realisierungen sowie Validierungsmessungen gezeigt.

3.11.1 Signalentstehung Kollimationsmodulation

Zur Bestimmung der Fokusmodulation als Funktion der Kollimationsmodulation kann wie in Kapitel 3.6.1 vorgegangen werden, wobei die Funktion um die Parameter der Gradientenoptik reduziert werden kann.

Mit der Brennweite der Kollimationslinse f_K und einer axialen Verschiebung der Kollimationslinse relativ zur Brennweite z_K ist die Gegenstandsweite der Beleuchtung zur Hauptebene der Kollimationslinse

$$g_K(t) = f_K - z_K \quad (71)$$

und unter der Annahme einer sinusförmigen Kollimationsmodulation mit der Frequenz ν_K ist die Position der Kollimationslinse

$$z_K = A_K \sin(2 \pi t \nu_K). \quad (72)$$

Damit ergibt sich zunächst wieder die Bildweite der Abbildung der Beleuchtung zur Kollimationslinse gemäß:

$$b_K(t) = \frac{1}{\frac{1}{f_K} - \frac{1}{g_K(t)}}. \quad (73)$$

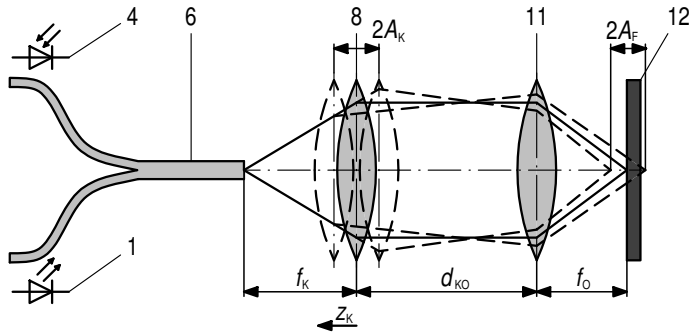


Bild 86: Skizze der Kollimationsmodulation mit 1. Laserquelle; 4. Photodiode; 6. Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 8. Kollimationslinse; 11. Objektiv; 12. Messobjekt.

Mit dem Abstand d_{KO} zwischen Schwingungsmittlebene der Kollimationslinse und der Hauptebene des Objektivs ergibt sich die Gegenstandsweite der Beleuchtung bezüglich des Objektivs

$$g_O(t) = d_{KO} - b_K(t) + A_K \sin(2\pi t \nu_K) \quad (74)$$

sowie folglich die Bildweite zum Objektiv

$$b_O(t) = \frac{1}{\frac{1}{f_O} - \frac{1}{g_O(t)}} \quad (75)$$

und schließlich wieder die modulierte Fokusposition relativ zur Brennebene des Objektivs

$$z_F(t) = f_O - b_O(t) \quad (76)$$

sowie durch Einsetzen der Gleichungen 97-75 in Gleichung 77

$$z_F(t) = f_O - \frac{1}{\frac{1}{f_O} - \frac{1}{d_{KO} - \frac{1}{\frac{1}{f_K} - \frac{1}{f_K + A_K \sin(2\pi t \nu_K)} + A_K \sin(2\pi t \nu_K)}}}, \quad (77)$$

bzw. in anderer Notation:

$$z_F(t) =$$

$$f_O - \left(\frac{1}{f_O} - \left(d_{KO} - \left(\frac{1}{f_K} - \frac{1}{f_K + A_K \sin(2\pi t \nu_K)} \right)^{-1} + A_K \sin(2\pi t \nu_K) \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (78)$$

Die Änderung der Gegenstandsweite des Objektivs aufgrund der Verschiebung der Kollimationslinse relativ zum Objektiv ist im vorliegenden optischen System im Vergleich zur Änderung der Bildweite $b_K(t)$ gering und damit vernachlässigbar, womit

$$g_O(t) = d_{KO} - b_K(t) \quad (79)$$

gilt und damit für die modulierte Fokusposition

$$z_F(t) = f_O - \left(\frac{1}{f_O} - \left(d_{KO} - \left(\frac{1}{f_K} - \frac{1}{f_K + A_K \sin(2\pi t \nu_K)} \right)^{-1} \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (80)$$

Mit Gleichung 80 lässt sich damit die relative Position z des modulierten Fokus zum Messobjekt beispielhaft darstellen (vgl. Abb. 87).

Ist der Abstand zwischen Kollimationslinse und Objektiv gering und vernachlässigbar ($d_{KO} = 0$) ist die relative Fokusposition

$$z_F(t, d_{KO} = 0) = f_O - \left(\frac{1}{f_O} - \left(\left(\frac{1}{f_K} - \frac{1}{f_K + A_K \sin(2\pi t \nu_K)} \right)^{-1} \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (81)$$

3 Fokusmodulierte Konfokalsensoren

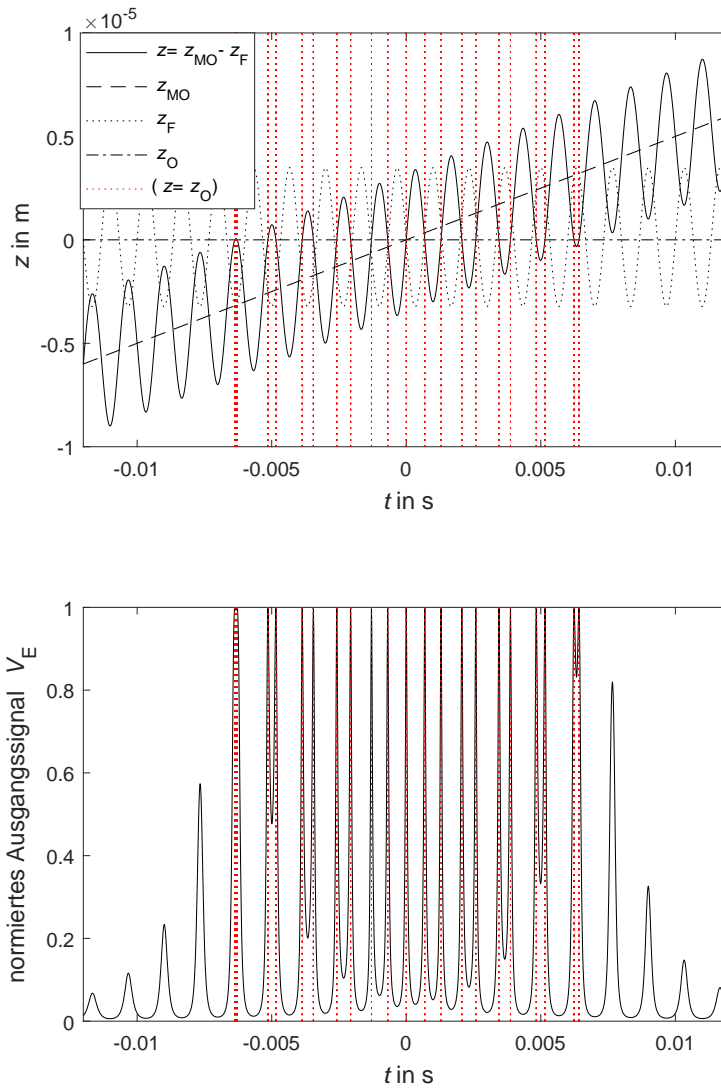


Bild 87: Numerische Berechnung des Eingangssignals V_E (unten), der relativen Fokusposition z_F , der Position des Messobjektes z_{MO} , der relativen Position $z = z_{MO} - z_F$ des Messobjektes zur modulierten Fokusposition sowie der Brennebene des Objektivs z_O (oben) mit $v_{PT} = 0,05$ m/s für $\nu_K = 750$ Hz, $A_K = 100$ μ m, $f_O = 2$ mm, $d_{KO} = 60$ mm.

3.11.2 Piezobiegeschwinger

Eine der innovativen Anordnungen zur Kollimationsmodulation beruht auf dem Prinzip von Piezobiegeschwingeraktoren. Die Basis hierfür bilden modifizierte Piezotonabnehmer (s. Abb. 88). Unter Ausnutzung des inversen Piezoeffekts können diese auch als Aktoren fungieren.

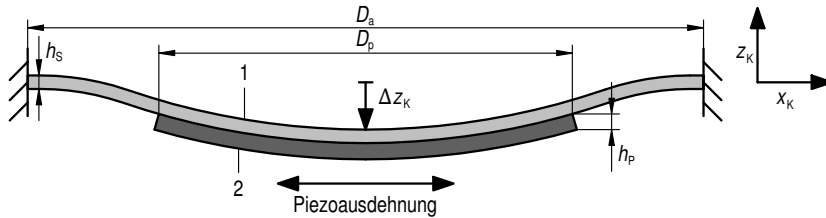


Bild 88: Radialsymmetrischer Piezobiegeaktor mit 1. Metallkreisscheibe und 2. Piezokreisscheibe. [in Anlehnung an 175]

Eine biegesteife, metallene Kreisscheibe (1) mit dem Durchmesser D_a und der Dicke h_s ist hierbei fest mit einer hierzu konzentrischen Piezoscheibe (2) mit einem geringeren Durchmesser D_p verbunden. Bei Anlegen einer positiven Spannung an den Piezo wird die radiale Längenausdehnung der Piezoscheibe durch die Metallkreisscheibe gehemmt, wodurch ein Biegemoment induziert wird, das zu einer Krümmung und damit einer axialen Auslenkung Δz_K des Mittelpunktes der Scheibe führt. Respektive führt das Anlegen einer negativen Spannung durch die von der Metallkreisscheibe gehemmte Kontraktion der Piezoscheibe zu einer Auslenkung in entgegengesetzter axialer Richtung. Durch eine feste Einspannung der Metallkreisscheibe am Umfang ergibt sich weiterhin die in Abbildung 88 skizzierte radialsymmetrische Biegelinie. [vgl. 175]

Durch die zusätzliche Einbringung einer konzentrischen kreisförmigen Apertur in den Piezotonabnehmer mit dem Durchmesser D_i mittels Laserschneiden wird zunächst ein optischer Durchgang für den Beleuchtungsstrahl geschaffen (s. Abb. 89). Weiterhin wird eine Kollimationslinse (3) aus Kunststoff mit der Metallscheibe (1) konzentrisch verklebt. Die Einspannung der Kreisscheibe erfolgt über zwei Kreisringe (4) mit dem Innendurchmesser D_a , die über zwei weitere Kreisringe mit Außengewinde in einem Tubus (6) mit Innengewinde axial fest verspannt sind. Die Metallkreisscheibe wird nicht direkt über die Gewindekreisringe (5) eingespannt, um radiale und tangentialen Vorspannung der Kreisscheibe beim Festziehen zu minimieren. Erfolgt die Anregung des Piezobiegeaktors in der Resonanzfrequenz des Systems, wird die Kollimationslinse mit einer harmonischen axialen Oszillation mit

der Amplitude A_K moduliert.

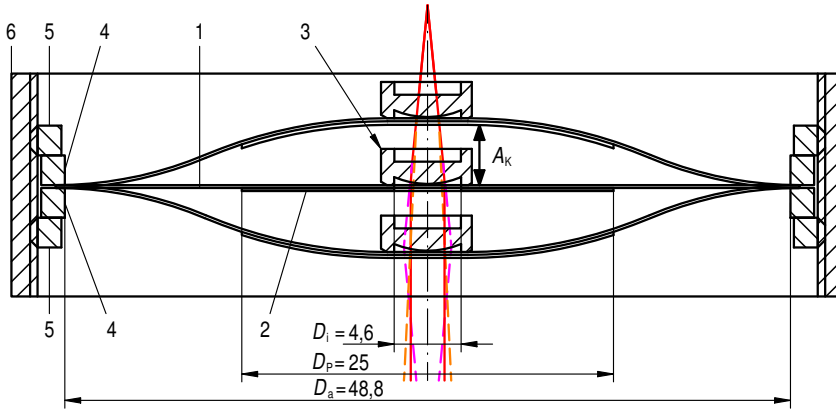


Bild 89: Skizze eines Piezobiegeschwingeraktuators zur Kollimationsmodulation mit: 1. Ringförmige Messingplatte; 2. Ringförmige Piezokeramik; 3. Kollimationslinse; 4. Metallringe; 5. Klemmringe mit Außengewinde; 6. Tubusrohr mit Innengewinde.

Um die Eigenfrequenz des Systems zu ermitteln, soll zunächst nur die Frequenz der Metallkreisscheibe betrachtet werden, da diese den größten Einfluss hat, wie im Folgenden noch gezeigt wird. Diese lässt sich nach [176] ermitteln

$$f_{k,l} = \frac{2\kappa_{k,l}^2}{\pi D_a^2} \sqrt{\frac{B}{\rho h_S}} \quad (82)$$

mit dem Durchmesser der Kreisscheibe D_a , der Höhe h und der Massendichte ρ_{KS} sowie den Eigenwerten $\kappa_{k,l}$ für die Wellenzahlen k in Umfangs- und l radialer Richtung, wobei die nullte Ordnung die höchste Auslenkung im Mittelpunkt der Kreisscheibe aufweist und daher genutzt werden soll. Die größte Amplitude weist dabei die erste Ordnung in Umfangsrichtung auf. Weiterhin führen die radialen höheren Ordnungen nur zu einer Verkippung, sodass hier nur die nullte Ordnung genutzt werden kann [176]. Damit ist die interessierende Frequenz der Kollimationsmodulation:

$$\nu_{K,cal} = f_{1,0} \quad (83)$$

Weiterhin kann die Biegesteifigkeit bestimmt werden:

$$B = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (84)$$

mit den Materialkennwerten des Elastizitätsmoduls E und der Querkontraktionszahl ν . Die Frequenzgleichungen stellen transzendente Gleichungen dar. Die Eigenwerte $\kappa_{k,l}$ lassen sich daher nicht explizit, sondern nur numerisch bestimmen. Für die hier relevante Eigenmode mit der Frequenz $f_{1,0}$ beträgt das Quadrat des Eigenwertes $\kappa_{1,0}^2$ nach [176] 10,2158. Durch Einsetzen von Gleichung 84 in 82 und Substitution der linken Seite mit Gleichung 83 ergibt sich für die zur Kollimationsmodulation zu nutzende Resonanzfrequenz:

$$\nu_K = \frac{2\kappa_{k,l}^2}{\pi D_a^2} \sqrt{\frac{Eh_s^2}{12\rho(1 - \nu^2)}}. \quad (85)$$

Weiterhin lässt sich die Dichte der verwendeten Kreisscheibe aus dem Quotient der Masse m und dem Volumen V bestimmen mit

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (86)$$

wobei sich das Volumen unter der Annahme, dass es sich bei der Kreisscheibe um einen Zylinder handelt, aus dessen geometrischen Abmaßen ermitteln lässt

$$V = 1/4 \cdot \pi \cdot D_a^2 \cdot h_s. \quad (87)$$

Durch Einsetzen aus den Gleichungen 84, 86 und 87 in 82 lässt sich damit die Eigenfrequenz einer solchen Kreisscheibe in Abhängigkeit der geometrischen Maße, des Gewichts und der Materialkennwerte approximativ wie folgt beschreiben:

$$f_{1,0} = \frac{1,664}{D_a} \sqrt{\frac{Eh_s^3}{m \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (88)$$

Damit wird ersichtlich, dass die Frequenz erhöht werden kann, indem Material mit höherer Steifigkeit und/oder geringerem Gewicht oder Kreisscheiben mit geringerem Durchmesser und/oder größerer Dicke verwendet werden. Gleichzeitig sinkt jedoch die Amplitude der Schwingung bei gleicher Erregungsenergie. Hier muss ein sinnvoller Kompromiss gefunden werden, sodass eine möglichst hohe Frequenz bei ausreichender Amplitude ermöglicht wird.

Zur Validierung wurden zunächst Messungen an verschiedenen Piezobiegeschwingern (ohne Apertur und Linse) durchgeführt. Die Durchmesser wurden mit einem DAkKS-kalibrierten Messschieber und die Höhe mit einer DAkKS-kalibrierten Bügelmessschraube gemessen. Das Material der Kreisscheiben wurde mithilfe eines Röntgenfluoreszenzspektroskops bestimmt, wobei eine Messinglegierung mit der Bezeichnung CuZn₃₇ ermittelt wurde. Laut Datenblatt des Deutschen Kupferinstituts ergeben sich hierfür die Materialkennwerte für die Querkontraktionszahl $\nu_{\text{CuZn}_{37}} = 0,34$, dem E-Modul $E_{\text{CuZn}_{37}} = 110 \text{ GPa}$ sowie einer Massendichte $\rho_{\text{CuZn}_{37}} = 8,44 \text{ g/cm}^3$ [177]. Die Berechnungen erfolgen mit Gleichung 85.

Um die Eigenfrequenzen der Piezobiegeschwinger zu messen, wurden Signale mit konstanter Amplitude und stetig steigender Frequenz (engl. *chirp*, „zirpen“) $V_{E,\text{chirp}}(t)$ in einem Zeitintervall $t \in [0; 15] \text{ s}$ mit der Soundkarte eines Computers (1) erzeugt und die Piezobiegeschwinger (2) hiermit angeregt (s. Abb. 90).

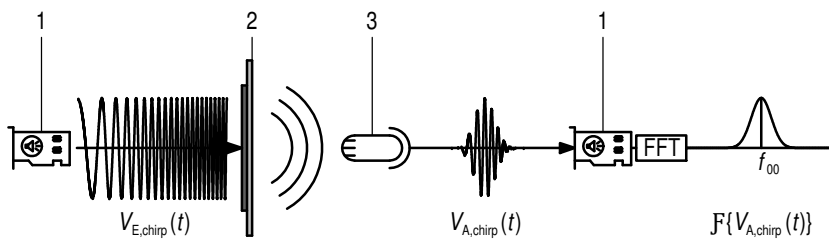


Bild 90: Skizze der Resonanzfrequenzbestimmung mit 1. Soundkarte; 2. Piezobieaktor; 3. Mikrofon.

Die von den Piezobiegeschwingern (2) emittierten Schallschwingungen wurden mit einem Mikrofon (3) erfasst und von der Soundkarte (1) digitalisiert. Über eine schnelle Fourier-Transformation (engl. *fast Fourier transformation*, Abk. FFT) wurden wie in Abbildung 91 dargestellt, die Beträge der Fourier-transformierten

$$|F_{A,\text{chirp}}(f)| = \mathcal{F}(V_{A,\text{chirp}}(t)) \quad (89)$$

in Abhängigkeit der Frequenz f ermittelt. Zur robusten Ermittlung der Resonanzfrequenz f_{00} und Filterung hochfrequenten Rauschens wurde eine Tief-

passfilterung der Funktion $|F_{A,\text{chirp}}(f)|$ durch Bildung eines gleitenden Mittelwertfilters

$$m_{\text{MA}}^{(n)}(f) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=f-n/2}^{f+n/2} |F_{A,\text{chirp}}(f)| \quad (90)$$

mit $n = 60$ vorgenommen, wobei die Abtastfrequenz bei 8 kHz lag und die Frequenz f_{00} an der Stelle des Maximums des gefilterten Signals $f(\max(m_{\text{MA}}))$ bestimmt wurde. Auf diese Weise wurden je 25 Wiederholmessungen durchgeführt, wobei jeweils die Mittelwerte der Resonanzfrequenzen $\bar{\nu}_{K,\text{mess}}$ und Standardabweichungen dieser Mittelwerte $s(\bar{\nu}_K)$ bestimmt wurden. In Abbildung 91 ist eine solche Auswertung beispielhaft für eine Piezoscheibe mit einem Außendurchmesser $D_a = 44,8$ mm dargestellt.

Mit den Gleichungen 82 und 83 können die Frequenzen $\nu_{K,\text{cal}}$ berechnet und mithilfe Finiten-Elemente-Methoden (Abk. FEM) [nach S5] simuliert werden (s. Abb. 92). Die Ergebnisse der Messungen, Berechnungen und Simulationen sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Einbringung einer Apertur sowie das Aufkleben einer Linse (bei Scheibe Nr. 5, Tab. 6) bewirken weder bei den Messungen noch in der FEM signifikante Änderungen der Eigenfrequenz im Vergleich zu den unbearbeiteten Piezoscheiben. Wohingegen die Apertur eine geringfügige Erhöhung bewirkt, verringert das zusätzliche Gewicht der Linse die Eigenfrequenz marginal (vgl. Tab. 6, Nr. 4 und Nr. 5), sodass sich beide Effekte gegenseitig nahezu aufheben.

Zum Vergleich der Berechnungsmethoden wurden jeweils die systematische Messabweichung zwischen Messwert und berechnetem Wert

$$\text{MA}_{\text{sys,mess,cal}} = \bar{\nu}_{K,\text{mess}} - \nu_{K,\text{cal}}, \quad (91)$$

zwischen Messwert und simuliertem Wert

$$\text{MA}_{\text{sys,mess,cal}} = \bar{\nu}_{K,\text{mess}} - \nu_{K,\text{sim}} \quad (92)$$

sowie die jeweiligen relativen systematischen Abweichungen

$$\text{MA}_{\text{rel,mess,cal}} = \frac{\bar{\nu}_{K,\text{mess}} - \nu_{K,\text{cal}}}{\bar{\nu}_{K,\text{mess}}} \quad (93)$$

und

$$\text{MA}_{\text{rel,mess,sim}} = \frac{\bar{\nu}_{K,\text{mess}} - \nu_{K,\text{sim}}}{\bar{\nu}_{K,\text{mess}}} \quad (94)$$

ermittelt.

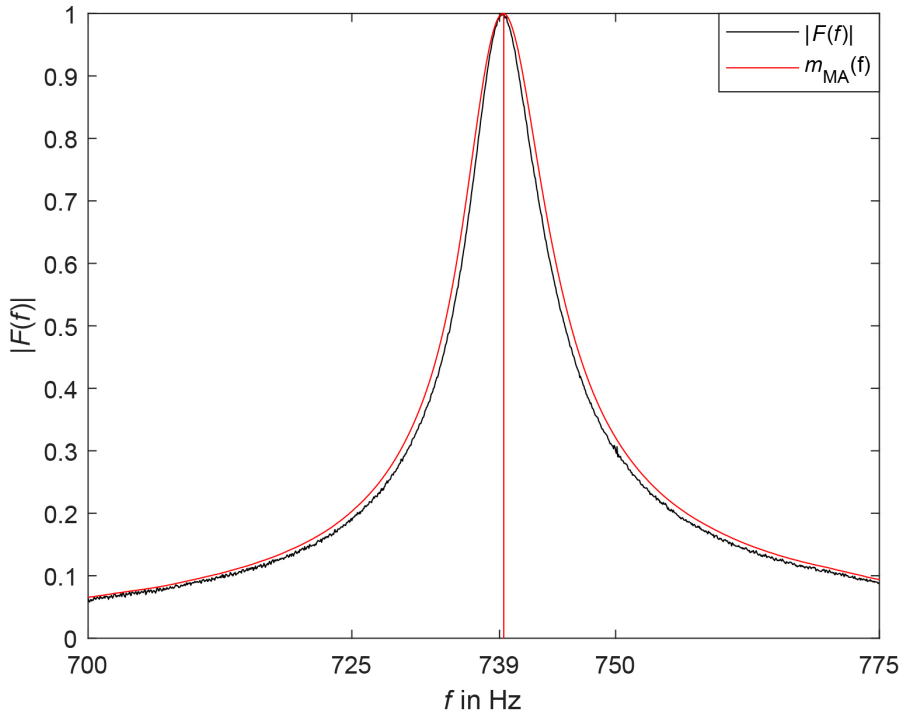


Bild 91: Normierter Betrag der Fourier-Transformation $|F(f)|$ und Bestimmung der Resonanzfrequenz durch Maximalwertsuche eines gleitenden Mittelwertfilters $m_{MA}(f)$ für Scheibe 4 aus Tabelle 6.

In Abbildung 93 ist ein Piezobiegeaktuator mit Apertur (links) sowie Piezobiegeaktuator mit aufgebrachtener Kollimationslinse zu sehen. Dieser wurde in eine laterale Positioniereinheit installiert, um die laterale Ausrichtung der Kollimationslinse zum Faserende zu ermöglichen.

Bei einem Ansteuersignal von ± 6 V ergibt sich für Scheibe 5 (vgl. Tab. 6) der gleiche Kennlinienbereich von etwa ± 400 nm wie mit einer TAG-Ansteuerleistung von 25 % (vgl. Abb. 58-61). Ein Vorteil dieser großen Scheibe ist weiterhin, dass diese direkt mit dem Lock-in-Verstärker getrieben werden kann. Bei der Durchführung von 25 Wiederholmessungen in einem Zeitraum 12 min und einer Bestimmung der Abweichungen über alle z -Werte $\Delta z = z(K_{H_3/H_2, P_3}) - z(Q_{H_3/H_2})$, wie in Kapitel 3.7.3 (S. 78) beschrieben, ergibt sich eine Standardabweichung $s(\Delta z) = 17$ nm ohne Temperierhaube (vgl. Tab. 1, S. 75).

Tabelle 6: Gemessene, berechnete und simulierte Frequenzen $\bar{\nu}_{K,mess}$, $\nu_{K,cal}$, $\nu_{K,sim}$ mit deren Standardabweichungen $s(\bar{\nu}_K)$ sowie die systematischen Abweichungen $MA_{sys,mess,cal}$ und $MA_{sys,mess,sim}$ und relativen systematischen Abweichungen $MA_{rel,mess,cal}$ und $MA_{rel,mess,sim}$.

Nr.	1	2	3	4	5
D_a	22,9 mm	24,8 mm	32,85 mm	44,8 mm	44,8 mm
D_i	-	-	-	-	4,6 mm
D_p	22 mm	19 mm	19 mm	26 mm	26 mm
h_s	0,15 mm	0,13 mm	0,15 mm	0,18 mm	0,18 mm
h_p	0,18 mm	0,19 mm	0,24 mm	0,25 mm	0,25 mm
$\bar{\nu}_{K,mess}$	2742 Hz	1986 Hz	1231 Hz	739 Hz	735 Hz
$s(\bar{\nu}_K)$	2,1 Hz	0,5 Hz	0,2 Hz	0,07 Hz	0,1 Hz
$\nu_{K,cal}$	2061 Hz	1511 Hz	1002 Hz	646 Hz	-
$\nu_{K,sim}$	2720 Hz	1982 Hz	1237 Hz	748 Hz	744 Hz
$MA_{sys,mess,cal}$	681 Hz	475 Hz	230 Hz	92 Hz	-
$MA_{sys,mess,sim}$	22 Hz	4 Hz	-5,6 Hz	-9 Hz	-9 Hz
$MA_{rel,mess,cal}$	0,23	0,24	0,19	0,13	-
$MA_{rel,mess,sim}$	0,008	0,002	-0,005	-0,008	-0,008

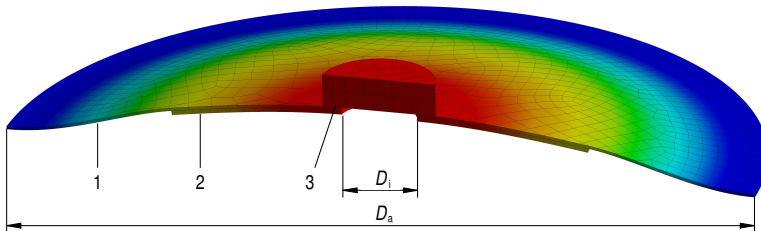


Bild 92: FEM-Simulation [nach S5] eines Piezobiegeschwingeraktuators zur Kollimationsmodulation mit: 1. Ringförmige Messingplatte, 2. ringförmiger Piezokeramik und 3. Kollimationslinse.

Bei der gezeigten Piezobiegeaktuorenanordnung handelt es sich um eine sehr günstige und kompakte Lösung zur Kollimationslinsenmodulation. Allerdings kann bei Temperaturänderungen aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Messing und Piezokeramik eine Art Thermo-

bimetalleffekt auftreten.

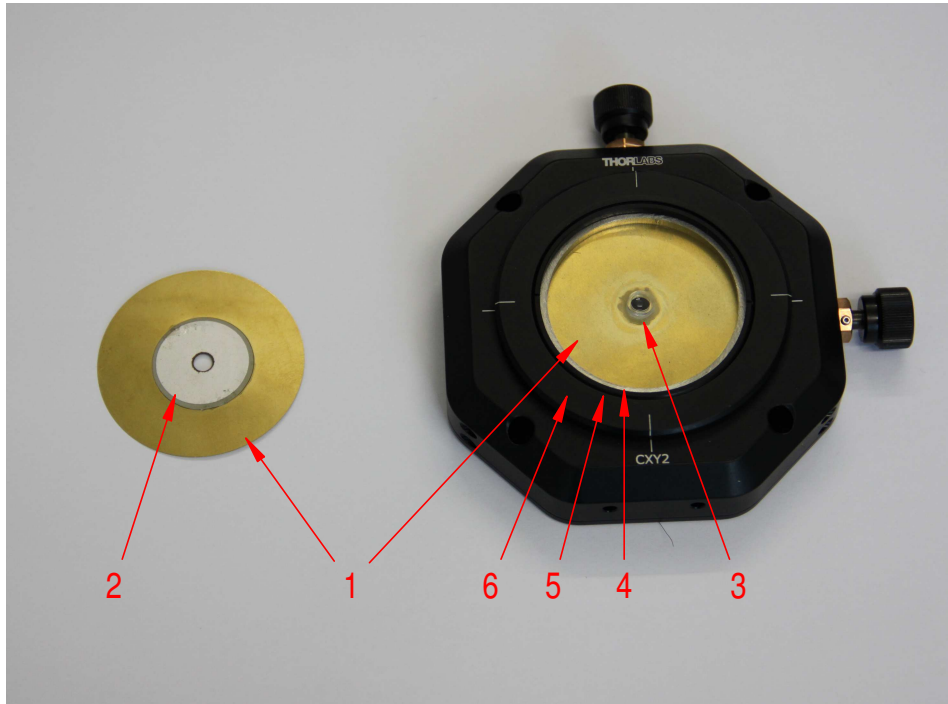


Bild 93: Abbildung eines Piezobiegeschwingeraktuator zur Kollimationsmodulation mit: 1. ringförmige Messingplatte, 2. ringförmiger Piezokeramik, 4. Metallringe, 5. Klemmringe mit Außengewinde und 6. Tubusrohr mit Innengewinde.

Damit verschiebt sich der Schwingungsmittelpunkt des Piezobiegeschwingers und respektive die mittlere Fokusposition. Es wäre daher vorteilhaft diese zu detektieren und gegebenenfalls durch eine entsprechende Regelung auszugleichen. Möglichkeiten einer solchen Detektion werden im Ausblick dieser Arbeit diskutiert. Alternativ wird im Folgenden eine Membran mit Tauchspulenaktor betrachtet, bei der derartige Thermobimetalleffekte nicht auftreten können.

3.11.3 Tauchspulenschwinger

Die im Folgenden dargestellte Variante zur axialen Kollimationslinsenmodulation basiert auf einem modifizierten Hochtöner. In die Membran (1) wird eine Apertur eingebracht und es wird eine Kollimationslinse (3) appliziert. Die Membran selbst befindet sich auf einer Leiterplatte mit Leiterbahnen für die Kontakte zur Tauchspule (2). Diese ist auf einen Kunststoffzylinder

gewickelt, der mit der Unterseite der Membran verklebt ist. Der Zylinder mit der Spule ist wiederum konzentrisch über einen Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten (4) angeordnet, der zusammen mit dem aus den ferromagnetischen Platten (8-10) gebildeten Topf ein permanentes Magnetfeld erzeugt. Bei Anlegen einer Spannung bzw. eines Stroms erzeugt dieser zusammen mit dem permanenten Magnetfeld des Topfes eine Lorentz-Kraft auf die Spule und so eine axiale Verschiebung der Membran und damit der Kollimationslinse. Im Gegensatz zur gezeigten Piezoanordnung können hier keine Thermobimetalleffekte auftreten.

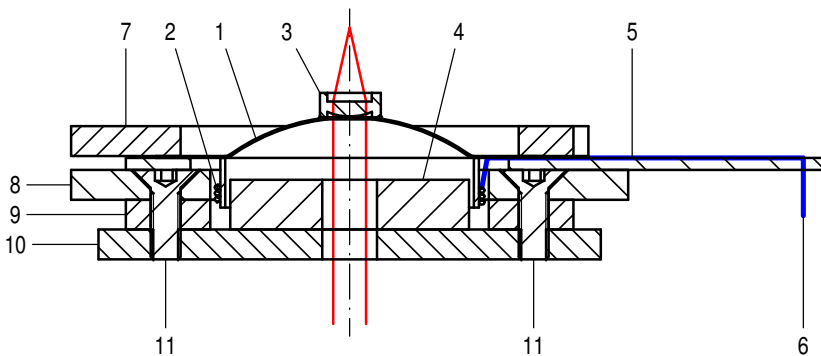


Bild 94: Skizze einer Tauchspulenschwingmembran zur Kollimationsmodulation mit: 1. Titanmembran; 2. Tauchspule; 3. Kollimationslinse; 4. Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet mit Durchgangsbohrung; 5. Leiterplatine mit Leiterbahnen zum Anschluss der Tauchspule; 6. Anschlusslaschen; 7. Deckscheibe aus paramagnetischem Aluminium; 8.-10. Topfplatten aus ferromagnetischem Baustahl und 11. Senkkopfschrauben zur Fixierung der Topfplatten.

Bei der Durchführung von 25 Wiederholmessungen und einer Bestimmung der Abweichungen über alle z -Werte $\Delta z = z(K_{H_3/H_2, P_3}) - z(Q_{H_3/H_2})$, wie in Kapitel 3.7.3 (S. 78) beschrieben, ergibt sich eine Standardabweichung $s(\Delta z) = 25 \text{ nm}$ ohne Temperierhaube (vgl. Tab. 1, S. 75).

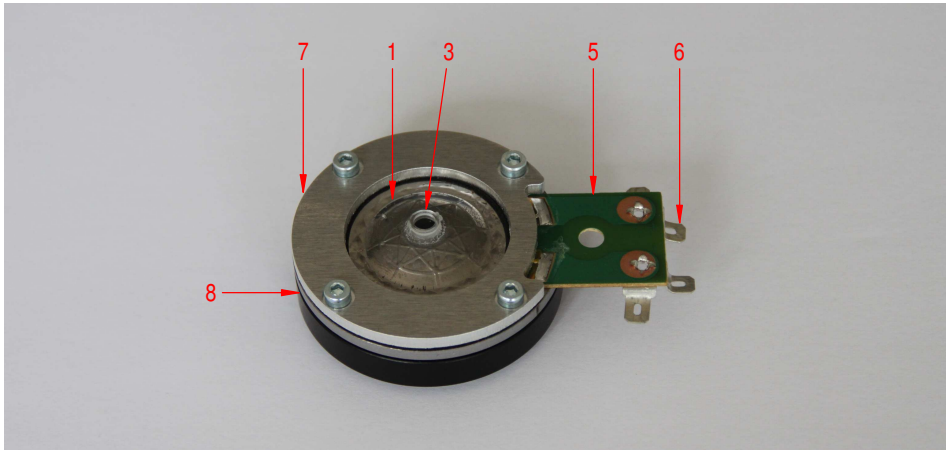


Bild 95: Skizze einer Tauchspulenschwingmembran zur Kollimationsmodulation mit: 1. Titanmembran; 3. Kollimationslinse; 5. Leiterplatine mit Leiterbahnen zum Anschluss der Tauchspule; 6. Anschlusslaschen; 7. Deckscheibe aus paramagnetischem Aluminium und 8. Topfplatten aus ferromagnetischem Baustahl.

3.11.4 Amplitudenermittlung

Bei den gezeigten Methoden der Signalverarbeitung wurde bislang stets eine Anregung im Resonanzfall und eine konstant bleibende Fokusmodulationsamplitude angenommen. Als Ausblick für weitere Forschungen und insbesondere mit den zuletzt gezeigten Varianten der Kollimationsmodulation wäre eine den Oberflächeneigenschaften dynamisch angepasste Fokusmodulationsamplitude gegebenenfalls vorteilhaft. Hierzu muss jedoch eine Signalverarbeitung umgesetzt werden, mit der es ermöglicht wird, die Fokusmodulationsamplitude A_F zu bestimmen, sofern diese nicht rein aus dem Ansteuersignal prediktiert werden soll. Eine Möglichkeit soll im Folgenden als Ausblick exemplarisch betrachtet werden. Unter der Annahme, dass der Intensitätsverlauf bei axialer Verschiebung z systemspezifisch konstant ist und im Wesentlichen von den Parametern der verwendeten optischen Komponenten abhängt (vgl. Kap. 3.6.1), kann dieser bei deaktivierter Fokusmodulation und kontinuierlicher axialer Abtastung mithilfe eines Positionierisches empirisch ermittelt oder durch die aufgeführten Formeln berechnet werden. Zur Charakterisierung des Intensitätsverlaufes kann beispielsweise die Standardabweichung oder wie im Folgenden gezeigt die Halbwertsbreite $FWHM_z$ (engl. *Full Width at Half Maximum*, Abk. FWHM) bestimmt werden, d. h. der axiale Abstand Δz zwischen den Positionen $z(V_E = 0,5)$ an denen der Intensitätsverlauf jeweils die Hälfte des maximalen Wertes aufweist (s. Abbildung 96). Mit der Verwendung des mathematischen Modells kann natürlich auch eine Korrelationsrechnung über den gesamten

Signalverlauf erfolgen.

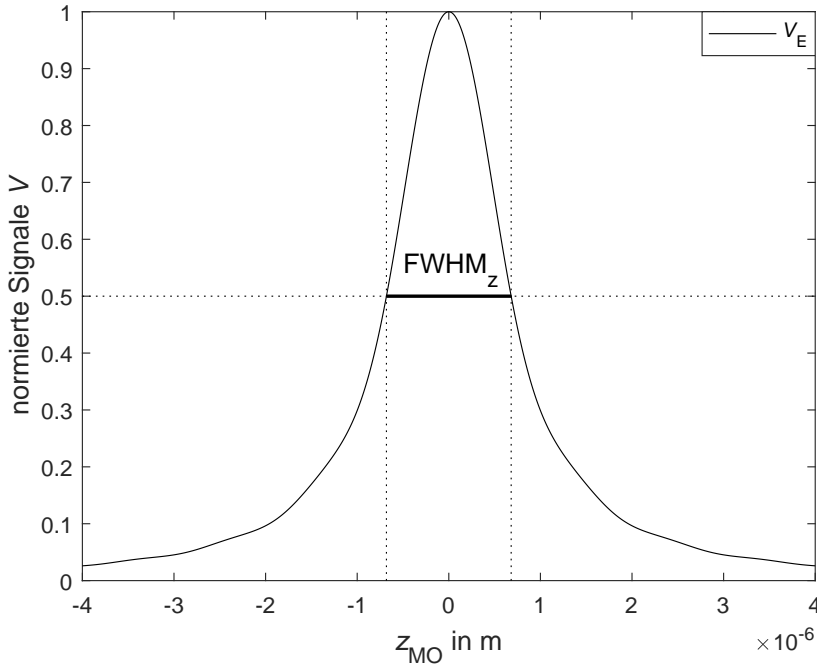


Bild 96: Numerische Berechnung des Eingangssignals V_E mit der Halbwertsbreite $FWHM_z$ über die axiale Position des Positioniertischs z_{PT} ohne Fokusmodulation.

Unter der Annahme einer der Kollimationsmodulation proportionalen Fokusmodulation (hier beispielhaft sinusförmig) ist das Referenzsignal V_R direkt aus dem Steuersignal der Modulationsoptik bekannt. Ist diese Näherung nicht zulässig, kann unter Berücksichtigung des Abstandes zwischen der Modulationsoptik und der Mikroskopoptik alternativ auch Gleichung 78 genutzt werden.

Durch Auftragen des Eingangssignals V_E über das Referenzsignal V_R statt über die Zeit t ergibt sich der in Abbildung 97 dargestellte Verlauf (s. a. Abb. 97). Unter oben getroffener Annahme einer konstanten Halbwertsbreite $FWHM_z$ lässt sich über das Verhältnis zur Halbwertsbreite $FWHM_R$ über das bereits normierte Referenzsignal V_R die Amplitude der Fokusmodulation wie folgt ermitteln:

$$A_F = \frac{FWHM_z}{FWHM_R} \quad (95)$$

Weiterhin lässt sich dann über die Position des Maximums $V_R(V_E = \max)$ die relative Position des Positioniertisches z_{MO} bestimmen, gemäß:

$$z_{MO} = \frac{V_R(V_E = \max) FWHM_z}{FWHM_R} \quad (96)$$

Eine echtzeitfähige Umsetzung der hier gezeigten Signalverarbeitung ist prinzipiell möglich, erfordert jedoch entsprechend leistungsfähige Hardware.

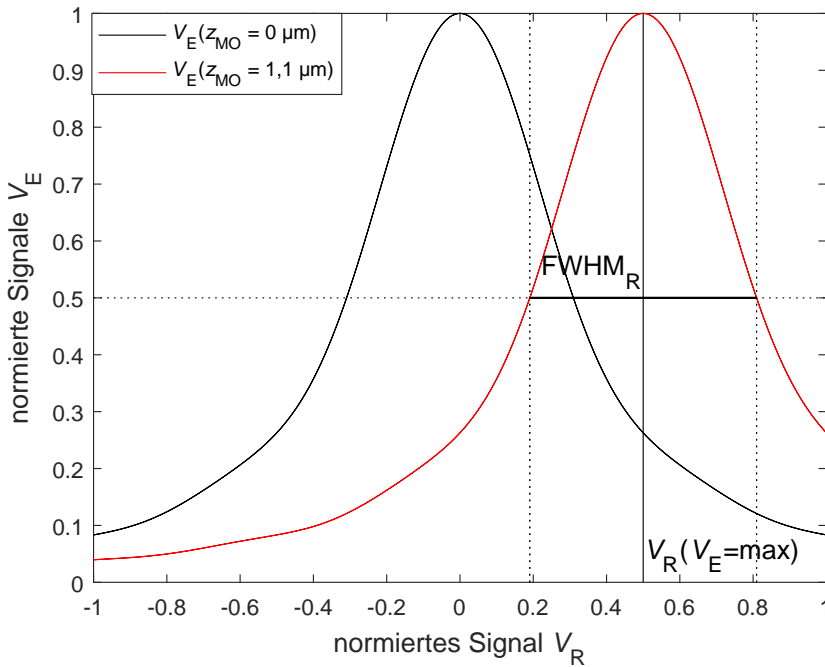


Bild 97: Numerische Berechnung des normierten Eingangssignals V_E für $z_{MO} = 0 \mu m$ und $z_{MO} = 1,1 \mu m$ über das Referenzsignal V_R .

Statt einer direkten Bestimmung der Fokusmodulationsamplitude A_F , ist eine Bestimmung der Kollimationsmodulationsamplitude A_K und der Position der Kollimationslinse z_K notwendig, wenn eine Verschiebung der Schwingungsmittlebene $z_{K,Offset}$ angenommen wird, womit die Position der Kollimationslinse

$$z_K = A_K \sin(2 \pi t \nu_K) + z_{K,Offset} \quad (97)$$

ist. Eine solche Verschiebung kann durch thermische Driften (insbesondere bei der Verwendung des Piezobiegeaktuators) ungewollt auftreten, könnte jedoch auch für eine hochdynamische axiale Nachregelung genutzt werden. Eine Möglichkeit, die Position der Kollimationlinse zu detektieren, wäre den bislang ungenutzten (rechten) Strahl am Strahlteiler (10) zu verwenden (s. Abb. 85). Hierzu könnte eine weitere Fokussierlinse (37), ein Lichtwellenleiter (38) und eine Photodiode (39) genutzt werden, wobei eine modifizierte Lock-in-Verstärkung wie zur Auswertung des Messsignals verwendet werden könnte (s. a. Kap. 3.6.2; S. 57).

Alternativ könnte hier auch eine Focault'sche Schneide in Kombination mit einer Doppeldiode platziert werden (s. a. Kap. 2.4.2; Abb. 11; S. 15).

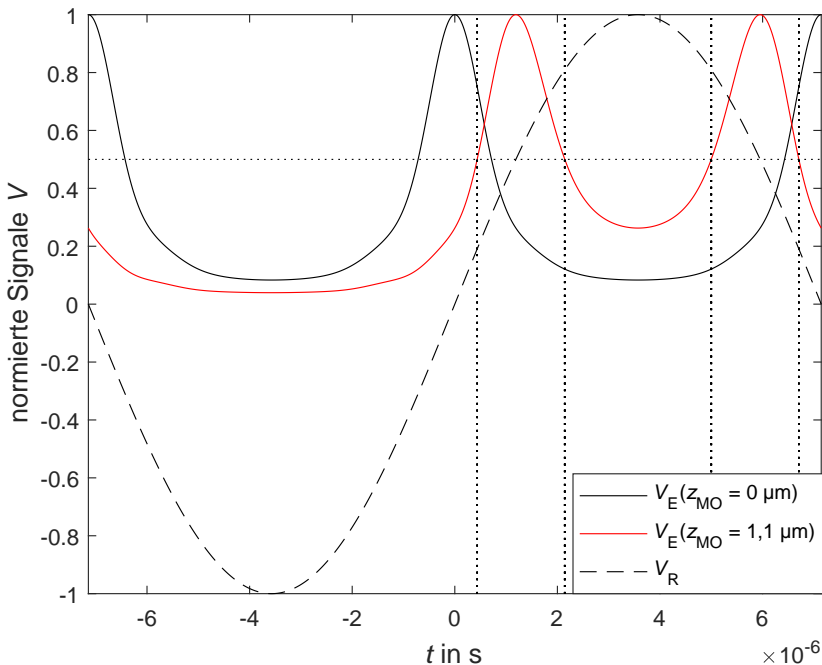


Bild 98: Numerische Berechnung des normierten Eingangssignals V_E für $z_{MO} = 0 \mu\text{m}$ und $z_{MO} = 1,1 \mu\text{m}$ sowie des normierten Referenzsignals V_R über die Zeit t .

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein hochfrequent fokusabstandsmodulierter fasergekoppelter Konfokalsensor für die axiale Nachführung (*constant distance scanning*) in einem Nanokoordinatenmessgerät konzipiert (s. Kap. 3.4), realisiert (s. Kap. 3.5), evaluiert (s. Kap. 3.7) und anhand verschiedener Messungen validiert (s. Kap. 3.9 u. 3.10). Ausgehend von theoretischen Überlegungen zur Signalanalyse wurde eine mathematische Beschreibung der Signalentstehung erstellt (s. Kap. 3.6.1) und zur Auslegung einer adäquaten Signalverarbeitung genutzt (s. Kap. 3.6.2). Mit den theoretischen Modellen der Signalentstehung und -verarbeitung wurde eine Monte-Carlo-Simulation zur Abschätzung signifikanter Beiträge zu Messabweichungen durchgeführt. Diese wurde durch reale Messungen validiert und es wurde eine aufgabenspezifische Vergleichs- und Wiederholpräzision des Sensors bestimmt (s. Kap. 3.7.3). Es wurde eine Methode zur optimalen Justierung des optischen Systems anhand von Kugelmessungen vorgestellt (s. Kap. 3.6.2). Eine Modulations-transferfunktion des optischen Systems wurde bestimmt (s. Kap. 3.10) und es wurden Messungen an Raunormalen sowie großflächige Messungen an einem konvexen Spiegel (s. Kap. 3.9) durchgeführt und die Messabweichungen bestimmt. Weiterhin wurden zwei neue Methoden zur Kollimationsmodulation gezeigt (s. Kap. 3.11) und es wurde ein Modell zur Signalentstehung und -verarbeitung entworfen (s. Kap. 3.11.1). Es wurden innovative Anordnungen auf Basis eines Piezobiegeschwingers (s. Kap. 3.11.2) sowie eines Tauchspulenantriebs (s. Kap. 3.11.3) gezeigt. Abschließend wurden neue Konzepte zur Amplituden- und Positionsermittlung dieser Kollimationsmodulation diskutiert (s. Kap. 3.11.3). Parallel wurde während der Untersuchungen zu den hier vorgestellten Konzepten dazu beigetragen, die Mess- und Umgebungsbedingungen stetig zu verbessern (s. Kap. 3.2).

Es konnte gezeigt werden, dass eine Fokusabstandsmodulierung im Vergleich zur konventionellen Konfokalmikroskopie enorme zeitliche Vorteile liefert und in Folge dessen auch zu geringeren Messabweichungen aufgrund geringerer zeitlicher, thermisch bedingter Driften führt (s. Kap. 3.9).

Bei den großflächigen Messungen ist zu erkennen, dass eine der Oberflächeneigenschaften dynamisch angepasste Scangeschwindigkeit zielführend wäre (s. Kap. 3.9, Abb. 74). Hierfür müssten einerseits Kriterien und Parameter gefunden werden und andererseits müsste eine Anpassung der Steuerung des Nanokoordinatenmessgerätes erfolgen. Als mögliche Kriterien könnte neben den Regelabweichungen $z(K_{H_3/H_2, P_3})$ das Ausgangssignal V_{A, H_2} der 2. Harmonischen genutzt werden. Weiterhin könnten lokale Qualitätskennwerte, wie aus dem Bereich der Computertomografie bekannt [178], anhand dieses Signals generiert werden, um daraus Einzelpunktunsicherheiten zu

ermitteln und diese für gewichtete Regressionen von Geometrieelementen zu nutzen [179].

Prinzipbedingt können mit dem Sensor keine Stufen kontinuierlich gescannt werden, deren Höhe die Fokusmodulation z_F übersteigt. Weiterhin führen laterale Fehlstellen wie Kratzer und steile Flanken zu einem Signalabbruch. Mit den gezeigten Varianten zur Kollimationsmodulation (s. Kap. 3.11) wäre es möglich, eine dynamisch, den Oberflächeneigenschaften angepasste Fokusmodulation, vorzunehmen. Hierzu wäre eine Bestimmung der Kollimationsmodulation erforderlich, die beispielsweise wie in Kapitel 3.11.4 beschrieben, erfolgen könnte.

Im Gegensatz zur Fokusmodulation mit der TAG-Linse stellen die Varianten der Kollimationsmodulation sehr kostengünstige Alternativen dar und es besteht die Möglichkeit zur Miniaturisierung und der Erstellung vakuumbeständiger Applikationen. Solche Sensoren könnten daher zukünftig auch in anderen Bereichen der Fertigungsmesstechnik genutzt werden.

Auch in anderen Bereichen wie der Fluoreszenzmikroskopie [180] sowie deren Formen der Zwei-Photonen- [181] und der Multi-Photonen-Fluoreszenzmikroskopie [182] könnten die gezeigten Applikationen und Algorithmen mit entsprechenden Lasern verwendet werden. Bei der Multiphotonenmikroskopie, könnten nichtlineare optischen Effekte der Frequenzverdopplung (engl. *second harmonic generation*, Abk. SHG) oder Frequenzverdreifung (engl. *third harmonic generation*, Abk. THG) genutzt werden. Eine solche THG wurde beispielsweise zur Positionsbestimmung von Glasoberflächen genutzt und veröffentlicht in [P9, P10].

Die gezeigten Signalverarbeitungsalgorithmen wurden in Hardwarebeschreibungssprache umgesetzt und auf einem modularen FPGA-Board synthetisiert und getestet [P2, S4], jedoch ist die hierbei verwendete Hardware nicht mehr Stand der Technik und könnte daher künftig durch eine eigene Schaltung ersetzt oder direkt in der Steuerung der Nanomessmaschine integriert werden, sodass weiterhin auch auf eine zusätzlich D/A- und A/D-Wandlung verzichtet werden könnte, wodurch sich das Signalrauschen reduzieren ließe. Zudem wäre die Integration einer Laser- und Detektionseinheit als Modul in der Steuerung der Nanomessmaschine sinnvoll.

Die gezeigten Varianten der Kollimationsmodulation weisen den Nachteil auf, dass Schwingungen auch auf das umgebende System und die Nanomessmaschine übertragen werden. Hier wäre es gegebenenfalls zielführend, eine Kollimationslinse und eine Objektivlinse gegenläufig schwingen zu lassen. Dadurch würde auch die Modulationsamplitude vergrößert und das System könnte miniaturisiert werden, sodass der Sensor beispielsweise in eine Standard Tasteraufnahme mit einem Durchmesser von 8 mm integriert werden könnte. Weiterhin wäre es auch denkbar, das Faserende axial zu modulieren, wodurch aufgrund der geringeren Masse höhere Frequenzen bei

geringerem Energieaufwand möglich wären.

Messungen im *constant height mode* ohne axiale Nachführung des Positioniertisches wären mit den gezeigten Varianten der Fokusmodulation insofern vorteilhaft gegenüber dem konventionellen *stage scanning*, als dass der gesamte Kennlinienbereich genutzt werden kann, um die Anzahl diskreter Scanhöhen signifikant zu reduzieren.

Mit den gezeigten Varianten der Kollimationslinsenmodulation und dem Ausblick ergeben sich viele neue Potentiale. Die Forschung auf diesem Gebiet sollte unbedingt in weiteren Arbeiten fortgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Hausotte, T. „Nanopositionier- und Nanomessmaschine“. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2002.
- [2] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T. und Büchner, H.-J. „Metrologische Grundlagen und Wirkungsweise der Nanopositionier- und Messmaschine NMM-1“. *Technisches Messen* 76.5 (2009), S. 227–234.
- [3] Hausotte, T. „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen - Geräte für hochpräzise makro bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen“. Habilitation. 2011.
- [4] DIN EN ISO 10360-1:2003-07. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) Teil 1: Begriffe (enthält Berichtigung AC:2002) (ISO 10360-1:2000 + Cor.1:2002)*.
- [5] Minsky, M. „Microscopy Appertus“. US 3,013,467. Dez. 1961.
- [6] Tsai, T.; McLeod, E. und Arnold, C. B. „Generating Bessel beams with a tunable acoustic gradient index of refraction lens“. *Optical Trapping and Optical Micromanipulation III* 6326.63261F (2006), 8pp.
- [7] Thalmann, Ru.; Meli, F. und Küng, A. „State of the Art of Tactile Micro Coordinate Metrology“. *Appl. Sci.* 6.150 (2016), 13pp.
- [8] Li, R.; Chen, C.; Li, D.; Fan, K.-C.; Cheng, Z.; Huang, Q. und Dang, X. „Ball Tips of Micro/Nano Probing Systems: A Review“. *Chin. J. Mech. Eng.* 30.2 (2017), S. 222–230.
- [9] Weckenmann, A.; Peggs, G. und Hoffmann, J. „Probing systems for dimensional micro- and nano-metrology“. *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), S. 504–509.
- [10] Petz, M.; Tutsch, R.; Christoph, R.; Andraes, M. und Hopp, B. „Tactile-optical probes for three-dimensional microparts“. *Measurement* 45 (2012), S. 2288–2298.
- [11] Abbe, E. „Messapparatur für Physiker“. *Zeitschrift für Instrumentenkunde.* (1890), S. 413–418.
- [12] Bryan, J. B. „The Abbé Principle Revisited: An Updated Interpretation“. *Prec. Eng.* 1.3 (1979), S. 129–132.
- [13] Kramer, J. A. „Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine“. *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), S. 2121–2128.
- [14] Hocken, R. J.; Trumper, D. L. und Wang, C. „Dynamics and control of the UNCC/MIT sub-atomic measuring machine.“ *CIRP Annals-manufacturing Technology* 50.1 (2001), S. 373–376.

- [15] Spaan, H. A. M.; Donker, R. L. und Widdershoven, I. „Isara 400 Ultra-precision CMM“. *VDI-Berichte* 2133 (2011), 5pp.
- [16] Balzer, F. G. „Entwicklung und Untersuchungen zur 3-D-Nanopositioniertechnik in großen Bewegungsbereichen“. Dissertation. Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2015.
- [17] *Zerodur . Zero Expansion Glass Ceramic*. Datasheet. 1035 ENGLISH 07112.0. Schott AG. 2011.
- [18] Balzer, F. G.; Hausotte, T.; Dorozhovets, N.; Manske, E. und Jäger, G. „Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli“. *Meas. Sci. Technol* 22.094018 (2011), 7pp.
- [19] Bouwhuis, G.; Van Rosmalen, G. und Schouhamer Immink, Kees. *Principles of Optical Disc Systems*. Bristol und Boston: AdamHilger LTD, 1985.
- [20] Brazas, J. C. und Gerber, R. E. „Laser Detector Grating Unit (LGDU) for producing laser errors, a push-pull tracking error, and differential phase tracking error signals“. Englisch. US 5,856,961. Jan. 1999.
- [21] Buetefisch, S.; Dai, G.; Danzebrink, H.-U; Koenders, L.; Solzbacher, F. und Orthnerb, M. P. „Novel design for an ultra high precision 3D micro probe for CMM applications“. *Procedia Engineering* 5 (2010), S. 705–712.
- [22] Claverley, J. D. und Leach, R. K. „A vibrating micro-scale CMM probe for measuring high aspect ratio structures“. *Microsyst Technol* 16 (2010), S. 1507–1512.
- [23] Lewis, A. J. „A fully traceable miniature CMM with submicrometre uncertainty“. *Proceedings of SPIE* 5190 (2003), S. 265–276.
- [24] Metz, D.; Ferreira, N. und Dietzel, A. „3D piezoresistive silicon micro-probes with stacked suspensions for tailored mechanical anisotropies“. *Sensors and Actuators A* 267 (2017), S. 164–176.
- [25] Meli, F.; Fracheboud, M.; Bottinelli, S.; Bieri, M.; Thalmann, R.; Breguet, J. M. und Clavel, R. „High precision, low-force 3D touch probe for measurements on small objects“. *EUSPEN Int. Topical Conf. (Aachen, Germany)* (2003), S. 411–414.
- [26] Meli, F.; Küng, A. und Thalmann, R. „Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe“. *Proceedings of SPIE* 58790S (2005), 8pp.
- [27] Schwenke, H.; Wäldele, F.; Weiskirch, C. und Kunzmann, H. „Opto-tactile Sensor for 2D and 3D Measurement of Small Structures on Coordinate Measuring Machines“. *CIRP Annals* 50.1 (2001), S. 361–364.

- [28] DIN EN ISO 25178-601:2011-01. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster) (ISO 25178-601:2010)*.
- [29] Weckenmann, A., Hrsg. *Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Bd. 2. 2012.
- [30] Krystek, M. „ISO Filters for Precision Engineering“. *Technisches Messen* 76.2 (2009), S. 133–159.
- [31] Schuler, C. A. „Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische Sensornachführung unter Anwendung nanometeraufgelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung“. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [32] Hertz, H. „Über die Berührung fester elastischer Körper“. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 91 (1881), S. 156–171.
- [33] Meli, F. und Küng, A. „AFM investigation on surface damage caused by mechanical probing with small ruby spheres.“ *MST* 18 (2007), S. 496–502.
- [34] Bos, E. J. C.; Schellekens, P. H. J. und Dietzel, A. H. „Aspects of tactile probing on a micro scale.“ *Proceedings of the euspen International Conference*. San Sebastian, 2009, 4pp.
- [35] Bos, E. J. C.; Schellekens, P. H. J. und Dietzel, A. H. „Aspects of tactile probing on the micro scale.“ *Precision Engineering* 35.2 (2011), S. 228–240.
- [36] Pril, W. O. *Development of High Precision Mechanical Probes for Coordinate Measuring Machines*. Technische Universität Eindhoven, 2002.
- [37] VDI/VDE 2602 Blatt 2:2008-10. *Oberflächenprüfung - Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten - Tastschnittverfahren - Aufbau, Messbedingungen, Durchführung*.
- [38] DIN EN ISO 4287:2010-06. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 3274 : 1996) (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009)*.
- [39] DIN ISO 16610-21:2013-06. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011)*.
- [40] DIN 4760:1982-06. *Gestaltabweichungen - Begriffe - Ordnungssysteme*.
- [41] DIN EN ISO 4288:1998-04. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1996)*.

- [42] Manske, E.; Hausotte, T.; Mastylo, R.; Machleidt, T.; Franke, K-H. und Jäger, G. „New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes“. *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 520–527.
- [43] Hofmann, N.; Mastylo, R. und Theska, R. „Ein kompakter Tastschnittsensor als Teil eines Multi-Sensor-Systems für Nanomessmaschinen“. *Technisches Messen* 82(7-8) (2015), S. 377–383.
- [44] Wiesendanger, Roland. *Scanning Probe Microscopy, Analytical Methods*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [45] Binnig, G. und Rohrer, H. „Scanning tunneling microscopy“. *Physica* 127B (1984), S. 37–45.
- [46] Binnig, G. und Rohrer, H. „Scanning tunneling microscopy“. *Surface Science* 126 (1983), S. 236–244.
- [47] Binnig, G. und Rohrer, H. „Raster-Tunnelmikroskop“. Deutsch. CH 643 397 A5. Mai 1984.
- [48] Binnig, G.; Quate, C. F. und Gerber, Ch. „Atomic Force Microscope“. *Physical Review Letters* 56.9 (1986), S. 930–933.
- [49] Synge, E. H. „A suggested method for extending the microscopic resolution into the ultramicroscopic region“. *Phil. Mag* 6 (1928), S. 356.
- [50] Betzig, E.; Lewis, A.; Harootunian, A.; Isaacson, M. und Kratschmer, E. „Near-Field Scanning Optical Microscopy (NSOM)“. *J. Biophysical Society* 49 (1986), S. 269–279.
- [51] Gomez, R. D.; Burke, E. R. und Mayergoyz, I. D. „Magnetic Imaging in the presence of external fields: Technique and applications.“ *J. Appl. Phys.* 79.8 (1996), S. 6441–6446.
- [52] Martin, Y. und Wickramasinghe, K. H. „Magnetic Imaging by Force Microscopy with 1000Å Resolution“. *Appl. Phys. Lett.* 50.20 (1987), S. 1455–1457.
- [53] Binnig, G.; Rohrer, H.; Gerber, Ch. und Weibel, E. „Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy“. *Physical Review Letters* 49.1 (1982), S. 57–61.
- [54] Tersoff, J. und Hamann, D. R. „Theory of the scanning tunneling microscope“. *Physical Review B* 31.2 (1985), S. 805–813.
- [55] Sun, Z. und Hausotte, T. „Entwicklung eines 3-D-fähigen Antastsystems auf Basis elektrischer Nahfeldwechselwirkungen für die Mikro- und Nanokoordinatenmesstechnik“. *GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme* 18 (2016), S. 156–161.

- [56] Hoffmann, J.; Schuler, A. und Weckenmann, A. „Construction and evaluation of a traceable metrological scanning tunnelling microscope“. *Measurement* 42 (2009), S. 1324–1329.
- [57] Hoffmann, J.; Weckenmann, A. und Schuler, A. „Mikrokoordinatenmesstechnik mit elektrischer Werkstückantastung“. *Technisches Messen* 76.2 (2009), S. 91–97.
- [58] Hoffmann, J. „Elektrische Werkstückantastung für Nanometer aufgelöste Oberflächen- und Koordinatenmesstechnik“. Dissertation. Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [59] Bowen, W. R. und Hilal, N. *Atomic Force Microscopy in Process Engineering*. Elsevier Ltd, 2009.
- [60] Maragliano, C.; Glia, A.; Stefanich, M. und Chiesa, M. „Effective AFM cantilever tip size: methods for in-situ determination“. *Meas. Sci. Technol.* 26.015002 (2015), 9pp.
- [61] Meyer, H.; Hug, H. J. und Bennewitz., R. *Scanning Probe Microscopy*. Bd. 1. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- [62] Fantner, G. E.; Schumann, W.; Barbero, R.; Deutschinger, A.; Todorov, V.; Gray, D.; Belcher, A.; Rangelow, I. W. und Youcef-Toumi, K. „Use of self-actuating and self-sensing cantilevers for imaging biological samples in fluid“. *Nanotechnology* 20.434003 (2009), 10pp.
- [63] Dukic, M.; Adams, J. D. und Fantner, G. E. „Piezoresistive AFM cantilevers surpassing standard optical beam deflection in low noise topography imaging“. *Scientific Reports* 5.16393 (2015), 11pp.
- [64] Gao, S.; Lu, M.; Li, W.; Shi, Y. und Li, Q. „Metrological atomic force microscope and traceable measurement of nano-dimension structures“. *IMEKO* 2.1 (2013), S. 12–15.
- [65] Vorbringer-Dorozhovets, N.; Hausotte, T.; Manske, E.; Shen, J. C. und Jäger, G. „Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope“. *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), 7pp.
- [66] Dorozhovets, N.; Hausotte, T.; Manske, E.; Jäger, G. und Hofmann, N. „Metrological scanning probe microscope“. *Proceedings of SPIE* 6188.61880L-1 (2006), 8pp.
- [67] Dai, G.; Pohlenz, F.; Danzebrink, H.-U.; Xu, M.; Hasche, K. und Wilkening, G. „Metrological large range scanning probe microscope“. *Rev. Sci. Instrum.* 75.4 (2004), S. 962–969.
- [68] Dai, G.; Koenders, L.; Fluegge, J. und Hemmleb, M. „Fast and accurate: high-speed metrological largescale AFM for surface and nanometrology“. *Meas. Sci. Technol.* 29.054012 (2018), 9pp.

- [69] Yacoot, A. und Koenders, L. „Recent developments in dimensional nanometrology using AFMs“. *Meas. Sci. Technol.* 22.122001 (2011), 12pp.
- [70] DIN EN ISO 25178-606:2013-12. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 604: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Fokusvariation) (ISO 25178-606:2015)*.
- [71] R., Danzl; Helml, F. und Scherer, S. „Focus variation - a new technology for high resolution optical 3D surface metrology.“ *10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*. Ljubljana, Slovenia, 2009, S. 484-491.
- [72] DIN EN ISO 25178-605:2014-06. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 605: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Punkt-Autofokus-Sensor) (ISO 25178-605:2014)*.
- [73] Maksutov, D. D. *Technologie der astronomischen Optik*. Bd. 1. Berlin: VEB Verlag Technik, 1954.
- [74] Kramer, P.; Day, P. E. und Bowhuis, G. „Vorrichtung zum Auslesen eines flachen reflektierenden Aufzeichnungsträgers“. Deutsch. DE 2322725. Nov. 1973.
- [75] Bouwhuis, Gijsbertus und Hazendonk, Teunis Johannes. „Optoelektronisches Fokusfehler Detektionssystem“. Deutsch. DE 2914122.8. Juni 1984.
- [76] Bricot, C. und Lehureau, J. C. „Fokussiereinrichtung“. Deutsch. DE 2501124.9. Aug. 1975.
- [77] Bricot, C.; Lehureau, J. C. und Puech, C. „Optical readout of videodisc, IEEE transactions on consumer electronics.“ *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 22.4 (1976), S. 304-308.
- [78] Kimura, Y.; Sugama, S. und Ono, Y. „Compact optical head using a holographic optical element for CD players“. *Appl. Opt.* 27.4 (1988), S. 668-671.
- [79] Kato, M.; Saimi, T.; Kadovaki, S. und Komma, Y. „Holographic servo-signal detection stabilized to the wavelength fluctuation and the mechanical misalignment in then optical heads“. *Proceedings of SPIE* 1078 (1989), S. 122-126.
- [80] Mastyl, R. „Optische und taktile Nanosensoren auf der Grundlage des Fokusverfahrens für die Anwendung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“. Diss. Technischen Universität Ilmenau, 2012.

- [81] Manske, E.; Jäger, G.; Füßl, R.; Balzer, F. G. und Machleidt, T. „Nanomess- und Nanopositioniergeräte für die nanometergenaue Positionierung, Messung und Bearbeitung von Oberflächen und Strukturen“. 16 (2012), S. 490–498.
- [82] DIN EN ISO25178-603:2013-02. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft -Teil 603: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (phasenschiebende interferometrische Mikroskopie) (ISO 25178-603:2013)*.
- [83] DIN EN ISO 25178-604:2013-12. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 604: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Weißlicht-Interferometrie) (ISO 25178-604:2013)*.
- [84] *Industriemikroskope LV150N/ LV150NL/ LV150NA/ LV100ND/ LV100DA-U, Eclipse LV*. Nikon Metrology NV.
- [85] Mirau, A.-H. „Interferometre“. FR 1011828TA. März 1952.
- [86] Köhler, A. „Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrophotographische Zwecke“. *Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie* Band 10. Heft 4 (1893), S. 433–440.
- [87] Davidovits, P. und Egger, M. D. „Scanning Laser Microscope“. *Nature* 223 (1969), S. 831.
- [88] Weber, K. „Vorrichtung zur optischen Abtastung mikroskopischer Objekte“. Deutsch. Dt. Pat. DE 1472293 (6330 Wetzlar). Jan. 1969.
- [89] DIN EN ISO 25178-607:2017-06. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 607: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (konfokale Mikroskopie) (ISO/DIS 25178-607:2017)*.
- [90] Wilson, T. und Sheppard, C. J. R. *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy*. London, 1984.
- [91] Maiman, T. H. „Stimulated Optical Radiation in Ruby“. *Nature* 4736 (1960), S. 493–494.
- [92] Sheppard, C.J.R. und A., Choudhury. „Image formation in the scanning microscope“. *Optica Acta* 24.10 (1977), S. 1051–1073.
- [93] Gu, M.; Sheppard, C. J. R. und Gan, X. „Image formation in a fiber-optical confocal scanning microscope“. *Opt. Soc. Am.* 38.8 (1991), S. 1755–1761.
- [94] Dabbs, T. und Glass, M. „Single-mode fibers used as confocal microscope pinholes“. *Appl. Opt.* 31.6 (1992), S. 705–706.

- [95] Dabbs, T. und Glass, M. „Fiber-optic confocal microscope“. *Appl. Opt.* 31.16 (1992), S. 3030–3035.
- [96] Gu, M. und Sheppard, C. J. R. „Signal level of the fibre-optical confocal scanning microscope“. *Opt. Soc. Am.* 8.11 (1991), S. 1621–1630.
- [97] Gu, M. und Sheppard, C. J. R. „Experimental investigation of fibre-optical confocal scanning microscopy: Including a comparison with pinhole detection“. *Micron* 24.6 (1993), S. 557–565.
- [98] Yang, L.; Wang, G.; Wang, J. und Xu, Z. „Surface profilometry with a fibre optical confocal scanning microscope“. *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000), S. 1786–1791.
- [99] DIN EN ISO 25178-602:2011-01. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde) (ISO 25178-602:2010)*.
- [100] Balzer, F. G.; Gerhart, U.; Hausotte, T.; Manske, E. und Jäger, G. „Fibre-coupled monochromatic zero-point sensor for precision positioning systems using laser interferometers“. *Measurement Science and Technology* 23.8 (2012), 8pp.
- [101] Balzer, F. G.; Gerhart, U.; Hausotte, T.; Albrecht, K.; Manske, E. und Jäger, G. „Application of a novel fibre-coupled confocal sensor in a nanopositioning and nanomeasuring machine.“ *Proceedings of the 12th euspen International Conference*. Stockholm, 2012.
- [102] Corle, T. R.; Fanton, J. T. und Kino, G. S. „Distance measurements by differential confocal optical ranging“. *Appl. Opt.* 26.12 (1987), S. 2416–2420.
- [103] Boettner, M. C. und Ouderkerk, S. J. „Scanning confocal microscope with oscillating objective lens“. US 5,880,465. März 1999.
- [104] *Upgrade your microscope with piezosystem jena, Compatible with Zeiss, Nikon, Olympus and Leica.* piezosystem jena GmbH. Stockholmer Straße 12; D-07747 Jena; Deutschland.
- [105] *PIFOC® Objektivscanner mit langem Stellweg, Hochpräziser Positionierer und Scanner für Mikroskopobjektive.* Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Auf der Römerstraße 1; D-76228 Karlsruhe; Deutschland.
- [106] *VCS-2020 Voice Coil Stage.* equipment solutions. 61 East Evelyn Avenue/Sunnyvale.
- [107] *LFA-3404 Linear Focus Actuator.* equipment solutions. 61 East Evelyn Avenue/Sunnyvale.

- [108] Young, J. Z. und F., Roberts. „A Flying-spot Microscope“. *Nature* 4241 (1951), S. 231.
- [109] Nipkow, P. „Elektrisches Teleskop“. Deutsch. DR 30105 (Berlin). Jan. 1885.
- [110] Wilke, V. „Optical Scanning Microscopy - The Laser Scan Microscope“. *Scanning* 7 (1985), S. 88–96.
- [111] White, J. G.; Amos, W. B. und Fordham, M. „An Evaluation of Confocal Versus Conventional Imaging of Biological Structures by Fluorescence Light Microscopy“. *The Journal of Cell Biology* 105 (1987), S. 41–48.
- [112] Egger, M. D. und Petr an, M. „New reflected-light microscope for viewing unstained brain and ganglion cells“. *Science* 157.786 (1967), S. 305–307.
- [113] Petran, M.; Hadravsky, M.; Egger, M. D. und Galambos, R. „Tandem-Scanning Reflected-Light Microscope“. *Journal of the optical society of America* 58.5 (1968), S. 661–664.
- [114] Braatz, P. O.; Chow, K.; Efron, U.; Grinberg, J. und Little, M. J. „A fast silicon photoconductor-based liquid crystal light valve“. *IEEE CH1504-0/79/0000-0540* (1979), S. 540–543.
- [115] Efron, U.; Grinberg, J.; Braatz, P. O.; Little, P. O.; Reif, P. G. und Schwartz, R. N. „The silicon liquid-crystal light valve“. *J. Appl. Phys.* 57.4 (1984), S. 1356–1366.
- [116] Gao, P. und Nienhaus, G. U. „Confocal laser scanning microscopy with spatiotemporal structured illumination“. *Optics Letters* 41.6 (2016), S. 1193–1196.
- [117] *3D-Surface Inspection in a new light*. Confovis GmbH. Ernst-Ruska-Ring 11; D-07745 Jena; Germany, 2010.
- [118] Schwertner, M. „Method and apparatus for optical imaging with low discrimination“. DE 102007018048A1. 2007.
- [119] Qiu, Z. R.; Qin, J.; Zhang, H. W. und Zhang, G. X. „Structure Design of A Laser Confocal Probe For Measuring the Micro-Sphere“. *J. Phys.: Conf. Ser.* 48 (2006), S. 641–646.
- [120] Qiu, Z. R.; Yao, K. N.; Chen, B. X.; Li, X. H. und Zhong, Y. „A study on the precision of a confocal probe from its fork frequency and amplitude“. *J. Phys.: Conf. Ser.* 181 (2009), 8pp.
- [121] Schick, A. und Doemens, G. „Optischer Abstandssensor“. Deutsch. Dt. Pat. DE 19608468C2 (80333 München). Jan. 1998.

- [122] Schick, A. und Doemens, G. „Konfokales Abbildungssystem mit geteiltem Retroreflektor“. Deutsch. Europ. Pat. WO 2002/008688 (80333 München (DE)). Mai 2003.
- [123] Belkner, J.; Hofmann, M.; Kirchner, J. und Manske, E. „Demonstration of aberration-robust high-frequency modulated differential confocal microscopy with an oscillating pinhole“. *Proceedings of SPIE* 11352.113520N (2020), 10pp.
- [124] Knollman, G. C.; Bellin, J. L. S. und Weaver, J. L. „Variable-Focus Liquid-Filled Hydroacoustic Lens“. *Journal of Acoustic Society of America* 49 (1970), S. 253–261.
- [125] Su., Norio und M., Shinzo. „Variable-focus liquid-filled optical lens“. *Appl. Opt.* 32.22 (1993), S. 4181–4186.
- [126] Krupenkin, T.; Yang, S. und Mach, P. „Tunable liquid microlens“. *Appl. Phys. Lett.* 82.3 (2003), S. 316–318.
- [127] Zhang, D.-Y.; Lien, V.; Berdichevsky, Y.; Choi, J. und Lo, Y.-H. „Fluidic adaptive lens with high focal length tunability“. *Appl. Phys. Lett.* 82.19 (2003), S. 3171–3172.
- [128] Sato, S. „Liquid-Crystal Lens-Cells with Variable Focal Length“. *J. Appl. Phys.* 18.9 (1979), S. 1679–1684.
- [129] Nose T. ans Sato, S. „A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field“. *Liquid Crystals* 5.5 (1989), S. 1425–1433.
- [130] McLeod, E.; Hopkins, A. B. und Arnold, C. B. „Multiscale Bessel beams generated by a tunable acoustic gradient index of refraction lens“. *Optics Letters* 31.21 (2006), S. 3155–3157.
- [131] McLeod, E. und Arnold, C. B. „Complex beam sculpting with tunable acoustic gradient index lenses“. 6483 (2007), 9pp.
- [132] McLeod, E. und Arnold, C. B. „Mechanics and refractive power optimization of tunable acoustic gradient lenses“. *J. Appl. Phys.* 102.033104 (2007), S. 1–9.
- [133] McLeod, E. und Arnold, C. B. „Optical analysis of time-averaged multiscale Bessel beams generated by a tunable acoustic gradient index of refraction lens“. *Appl. Opt.* 47.20 (2008), S. 3609–3618.
- [134] *The physics behind Tag Optics’ technology and the mechanism of action of using sound to shape light*. Tag Optics Inc. P.O. Box 1572; Princeton, NJ 08542; United States, 2013.
- [135] *Tunable ultra-fast focusing lens: TAG lens 2.0*. Tag Optics Inc. P.O. Box 1572; Princeton, NJ 08542; United States.

- [136] Theriault, C.; Guttenfelder, J. und Arnold, C. B. „TAG Lens: Revolutionizing Optical Microscopy With Ultra-High Speed Variable Focus.“ *Microsc. Microanal.* 20.3 (2014), S. 1092–1093.
- [137] Oku, H. und Ishikawa, M. „A Variable-Focus Lens with kHz Bandwidth Applied to Axial-Scan of A Confocal Scanning Microscope.“ *IEEE* 03.0-7803-7888-1 (2003), S. 309–310.
- [138] Day, R.; Lacot, E.; Stoeckel, F. und Berge, B. „Three-dimensional sensing based on a dynamically focused laser optical feedback imaging technique.“ *Appl. Opt.* 40.12 (2001), S. 1921–1924.
- [139] Meinert, T.; Weber, N.; Zappe, H. und Seifert, A. „Varifocal MOEMS fiber scanner for confocal endomicroscopy.“ *Optics Express* 22.25 (2014), S. 31529–31544.
- [140] Koukourakis, N.; Finkeldey, M.; Stürmer, M.; Leithold, C.; Gerhardt, N. C.; Hofmann, M. R.; Wallrabe, U.; Czarske, J. W. und Fischer, A. „Axial scanning in confocal microscopy employing adaptive lenses (CAL)“. *Optics Express* 22.5 (2014), S. 6025–6039.
- [141] Jabbour, J. M.; Malik, B. H.; Olsovsky, C.; Cuenca, R.; Cheng, S.; Jo, J. A.; Chen, Y.-S. L.; Wright, J. M. und Maitland, K. C. „Optical axial scanning in confocal microscopy using an electrically tunable lens.“ *Biomedical Optics Express* 5.2 (2014), S. 645–652.
- [142] Khan, S. A. und Riza, N. A. „Confocal microscopy based agile optical endoscope using liquid crystals.“ *IEEE* (2004), S. 10–11.
- [143] Yasuno, Y.; Makita, S.; Yatagai, T.; Wiesendanger, T. F.; Ruprecht, A. K. und Tiziani, H. J. „Non-mechanically-axial-scanning confocal microscope using adaptive mirror switching.“ *Optics Express* 11.1 (2003), S. 54–60.
- [144] Duocastella, M.; Vicidomini, G. und Diaspro, A. „Simultaneous multiplane confocal microscopy using acoustic tunable lenses.“ *Optics Express* 22.16 (2014), 9pp.
- [145] Moore, D. T. „Gradient-index optics: a review.“ *Appl. Opt.* 19.7 (1980), S. 1035–1038.
- [146] Olivier, N.; Mermillod-Blondin, A.; Arnold, C. B. und Beaufrepaire, E. „Two-photon microscopy with simultaneous standard and extended depth of field using a tunable acoustic gradient-index lens.“ *Optics Letters* 34.11 (2009), S. 1684–1686.
- [147] Duocastella, M.; Sun, B. und Arnold, C. B. „Simultaneous imaging of multiple focal planes for three-dimensional microscopy using ultra-high-speed adaptive optics.“ *Journal of Biomedical Optics*. 17.5 (2012), 4pp.

- [148] Duocastella, M. und Arnold, C. B. „Transient response in ultra-high speed liquid lenses“. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46.075102 (2013), 7pp.
- [149] Dean, K. M. und Fiolka, R. „Uniform and scalable light-sheets generated by extended focusing“. *Optics Express* 22.21 (2014), S. 26141–26152.
- [150] Zong, W.; Zhao, J.; Chen, X.; Lin, Y.; Ren, H.; Zhang, Y.; Fan, M.; Zhou, Z.; Cheng, H.; Sun, Y. und Chen, L. „Large-field high-resolution two-photon digital scanned light-sheet microscopy“. *Cell Research* 25 (2015), S. 254–257.
- [151] Chen, T.-H.; Ault, J. T.; Stone, H. A. und Arnold, C. B. „High-speed axial-scanning wide-field microscopy for volumetric particle tracking velocimetry“. *Exp Fluids* 58.41 (2017), 7pp.
- [152] Chen, T.-H.; Fardel, R. und Arnold, C. B. „Ultrafast z-scanning for high-efficiency laser micromachining“. *Light: Science & Applications* 7 (2018), 9pp.
- [153] DIN EN ISO/IEC 17025:2005. *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005)*.
- [154] Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH. *Anlage zur Akkreditierungs-urkunde D-K-17960-01-00 nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005*. Leiter: Andreas Gröschl. Stellvertreter: Tino Hausotte. 17.01.2018.
- [155] DIN EN ISO 1:2016-12. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Standardreferenztemperatur für die Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (ISO 1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 1:2016*.
- [156] VDI/VDE 2627 Blatt 1:2016-12. *Messräume Klassifizierung und Kenngrößen Planung und Ausführung*.
- [157] Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik. „<https://www.fmt.tf.fau.de>“ (20.03.2020).
- [158] Hausotte, T.; Percle, B. und Jäger, G. „Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine“. *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), 8pp.
- [159] Fourier, J. B. J. *Les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. 1827.
- [160] Hecht, E. *Optik*. Bd. 3. München Wien: Oldenbourg Verlag, 2001.
- [161] Goodman, Joseph W. *Introduction to Fourier Optics*. Bd. 3. Englewood, Colorado: Roberts & Company, 2005.
- [162] Sheppard, C. J. R. und Shotton, D. M. *Confocal Laser Scanning Microscopy*. Hrsg. von Goldby, Priscilla. Royal Microscopical Society Microscopy, 1997.

- [163] Sheppard, C. J. R. „Scanning Confocal Microscopy“. *Encyclopedia of Optical Engineering* (2003), S. 2525–2544.
- [164] Gu, M. und Sheppard, C. J. R. „Signal level of the fibre-optical confocal scanning microscope“. *Journal of modern optics* 8.11 (1991), S. 1755–1761.
- [165] Snyder, A. W. und Love, J. D. *Optical Waveguide Theory*. Chapman und Hall, 1983.
- [166] Liang, K. K.; Kino, G. S. und Khuri-Yakub, B. T. „Material Characterization by the Inversion of $V(z)$ “. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics* SU-32.2 (1985), S. 213–224.
- [167] Consens, C. R. „A balance-detector for alternating-current bridges“. *Proc. Phys. Soc.* 46 (1934), S. 818–823.
- [168] M., Walter C. „A Double Tube Vacuum Tube Voltmeter“. *Review of Scientific Instruments* 9 (1938), S. 10–12.
- [169] Michels, W. C. und Curtis, N. L. „A Pentode Lock-In Amplifier of High Frequency Selectivity“. *Review of Scientific Instruments* 12 (1941), S. 444–447.
- [170] *High resolution microscopy resolution target TC-RT01*. Edmund Optics GmbH. Isaac-Fulda-Allee 5, 55124 Mainz.
- [171] C., John W. „The Specification of Imaging Properties by Response to a Sine Wave Input“. *Journal of the optical society of America* 44.6 (1954), S. 468–471.
- [172] P.-P., Gabriello. „Determination of the Contrast and Modulation Transfer Functions for High Resolution Imaging of Individual“ (2009), 21pp.
- [173] *Resolution Standard Type RS-N*. SiMETRICS GmbH. Am Südhang 5; 09212 Limbach-Oberfrohna, 2009.
- [174] DIN EN ISO 5436-1:2000-11. *Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale Teil 1: Maßverkörperungen*.
- [175] Herz, M. H. A. M. „Optimierung der Förderrate einer piezoelektrischen Hochleistungs-Mikropumpe“. Dissertation. Technische Universität München, 2011.
- [176] Irretier, H. *Grundlagen der Schwingungstechnik 2, Systeme mit mehreren Freiheitsgraden, Kontinuierliche Systeme*. Bd. 1. Vieweg, 2001.
- [177] *Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing)*. Deutsches Kupferinstitut. Am Bonneshof 5; 40474 Düsseldorf.

- [178] Müller, A. M. und Hausotte, T. „Data fusion of surface data sets of X-ray computed tomography measurements using locally determined surface quality values“. *Journal of Sensors and Sensor Systems* 7 (2018), S. 551-557.
- [179] Müller, A. M. und Hausotte, T. „Improving geometry element regression analysis for dimensional X-ray computed tomography measurements using locally determined quality values“. *10th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT)* (2020), 6pp.
- [180] Xi, P., Hrsg. *Optical Nanoscopy and Novel Microscopy Techniques*. Bd. 1. 2015.
- [181] Diaspro, A., Hrsg. *Two-Photon Excitation Microscopy: A Superb Wizard for Fluorescence Imaging*. 2010.
- [182] Xu, C.; Zipfel, W.; Shear, J. B.; Williams, R. M. und Webb, W. W. „Multiphoton fluorescence excitation: New spectral windows for biological nonlinear microscopy“. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93 (1996), S. 10763-10768.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Hausotte, T.; Gröschl, A. und Schauder, J. „High-speed focal-distance-modulated fiber-coupled confocal sensor for coordinate measuring systems“. *Appl. Opt.* 57.14 (2018), S. 3907–3914.
- [P2] Gröschl, A. C.; Köhnen, S.; Schauder, J. und Hausotte, T. „Improvements of a high-speed focus distance modulated fibre-coupled confocal sensor for nanocoordinate measuring systems“. *Sensoren und Messsysteme* (2018), S. 98–101.
- [P3] Gröschl, A. C.; Schauder, J. und Hausotte, T. „Kontinuierliche laterale Abtastung von Oberflächen durch axiale Regelung des Arbeitsabstandes in einem Nanokoordinatenmessgerät mit einem hochfrequent fokusbandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensor“. *Technisches Messen* 85.S1 (2018), S. 26–32.
- [P4] Gröschl, A. C.; Schauder, J. und Hausotte, T. „Evaluation und Justierung eines neuartigen, hochfrequent fokusbandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensors für axial geregelte Oberflächenmessungen mit einem Nanokoordinatenmessgerät“. *Technisches Messen* 86.S1 (2019), S. 117–121.
- [P5] Gröschl, A. C.; Schauder, J. und Hausotte, T. „Evaluation of the optical performance of a novel high-speed focal-distancemodulated fibre-coupled confocal sensor“. *Proceedings of SPIE* 11056.110560N (2019), 8pp.
- [P6] Gröschl, A.; Schauder, J. und Hausotte, T. „Evaluation und Korrektur thermischer Driften eines hochfrequent fokusbandsmodulierten, fasergekoppelten konfokalen Punktsensors“. *Technisches Messen* 86.4 (2019), S. 216–226.
- [P7] Schauder, J.; Gröschl, A. C. und Hausotte, T. „Large range closed-loop scans with a focal-distance-modulated confocal sensor“. *Procedia CIRP* 94 (2020), S. 785–790.
- [P8] Schauder, J.; Albrecht, J.; Klöpzig, U.; Gröschl, A. C. und Hausotte, T. „Atomic force microscope with an adjustable probe direction and piezoresistive cantilevers operated in tapping-mode“. *Technisches Messen* 86(S1) (2019), S. 12–16.
- [P9] Strauß, J.; Cvecek, K.; Gröschl, A. C.; Alexeeva, I. und Schmidt, M. „Focus alignment method for laser manufacturing at submicron positional accuracy“. *Physics Procedia* 39 (2012), S. 800–806.
- [P10] Alexeev, I.; Strauss, J.; Gröschl, A. C.; Cvecek, K. und Schmidt, M. „Laser focus positioning method with submicrometer accuracy“. *Opt. Soc. Am.* 52.3 (2013), S. 415–421.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Schaudé, J. „Ansteuerung und Auswertung eines hochfrequenten abstandsmodulierten Konfokalsensors in einem Nanokoordinatenmessgerät“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S2] Schönemann, A. „Analyse und Setuptoolsoptimierung eines fasergekoppelten, fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors für den Einsatz in einem Nanomesssystem“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S3] Ressel, B. „Integration eines fokusabstandsmodulierten fasergekoppelten Konfokalsensors in eine Nanomessmaschine“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S4] Köhnen, S. „Digitale Signalverarbeitung mithilfe eines FPGA's für die Auswertung eines hochfrequenten abstandsmodulierten Konfokalsensors“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S5] Wimmer, M. „Recherche und Optimierung verschiedener Methoden zur axialen Fokusmodulation eines konfokalen, fasergekoppelten Sensors“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.

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
Zweistrahlschweißtechnik
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 Programoptimierung
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
Lebensdauerprognose 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 Untersuchen-
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 Herstellungsver-
fahren 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 Laserstrahltschweißen
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
Laserdurchstrahltschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibtschweißen 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 Crashtaughigkeit 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-
tschweißen 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 Laserstrahltiefschweißprozesses 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 Werkzeugoberflächen

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 Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge zur umformtechnischen
Herstellung höchstfester Leichtbau-
strukturteile
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 Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche 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 Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
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 Kon-
text 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 laserdirekt-
strukturierter 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 Formspulenumwicklungen für automobiler 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 Minimalmengens-
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.

Abstract

The development of the basics, the development and investigation of a robust, accurate, high-frequency focus-distance-modulated, confocal point sensor as well as its integration and validation in a nanocoordinate measuring system are described. In combination with fibre-coupled confocal lighting and detection, an adjustable, acoustically driven gradient-index liquid lens (TAG lens) as well as two innovative variants of collimation modulation for modulating the focus distance and a signal evaluation with lock-in-amplification that is new for confocal microscopy, the use of the sensor in a constant distance scanning mode in a nanocoordinate measuring system is shown by performing large area measurements. This results in a significant increase in the accuracy and reduction of the measurement uncertainty and the measurement time while maintaining the known advantages of the confocal measurement principle.

Es wird die Erarbeitung der Grundlagen, die Entwicklung und Untersuchung eines robusten, genauen, hochfrequent fokusabstandsmodulierten, konfokalen Punktsensors sowie dessen Integration und Validierung in einem Nanokoordinatenmesssystem beschrieben. In Kombination mit einer fasergekoppelten konfokalen Beleuchtung und Detektion, einer regelbaren, akustisch getriebenen Gradientenindex-Flüssigkeitslinse (TAG-Linse) sowie zweier innovativer Varianten einer Kollimationsmodulation zur Modulation des axialen Fokusabstandes und einer für die Konfokalmikroskopie neuartigen Signalauswertung mit Lock-in-Verstärker wird der Einsatz des Sensors in einer kontinuierlich lateral abtastenden Arbeitsweise mit konstantem Arbeitsabstand (engl. constant distance scanning mode) mithilfe eines Nanokoordinatenmesssystems anhand - im Bereich der Nanometrologie - großflächiger Messungen gezeigt. Daraus resultiert eine signifikante Steigerung der Genauigkeit, respektive eine Reduktion der Messunsicherheit sowie der Messzeit unter Beibehaltung der bekannten Vorteile des konfokalen Messprinzips.

