

FAU Studien aus dem Maschinenbau 452

Janik Schaudé

Untersuchungen zur rasterkraft-
und konfokalmikroskopischen
Charakterisierung nano-
metrologischer Referenzkörper

Janik Schaude

Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen
Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 452

Herausgeber/-innen:

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. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Janik Schaude

Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nano- metrologischer Referenzkörper

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Lehrstuhl für
Fertigungsmesstechnik (FMT)

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Erlangen

FAU University Press

2024

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.

Kontakt: Janik Schaude, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ([ror https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), ORCID: 0000-0001-5414-9394

Bitte zitieren als

Schaude, Janik. 2024. *Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 452. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-777-7

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 OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-776-0 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-777-7 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-777-7

**Untersuchungen zur rasterkraft- und
konfokalmikroskopischen Charakterisierung
nanometrologischer Referenzkörper**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Janik Schaudé, M.Sc.

aus Ehingen (Donau)

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

Tag der mündlichen
Prüfung: 20.06.2024

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

Vorwort

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

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber dieses Lehrstuhls, für die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske, Leiter des Instituts Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau, danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller, Inhaber des Lehrstuhls für Gießertechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Philipp Beckerle, Inhaber des Lehrstuhls für Autonome Systeme und Mechatronik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Allen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die konstruktive Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt hierbei den Kollegen aus dem Messzentrum, insbesondere Herrn Philipp Kaller und Christian Luca sowie Herrn Dr. Andreas Gröschl. Herrn Dr. Andreas Müller danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und die hilfreichen Kommentare.

Mein größter Dank gilt meiner geliebten Frau Olga. Danke für unsere wunderbaren Kinder, Deine Geduld und Unterstützung. Auch meinen Eltern, die es mir überhaupt erst ermöglichten, diesen Weg zu gehen, möchte ich besonders danken.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Theoretisch konzeptionelle Grundlagen	4
2.1.1 Metrologische Rückführbarkeit	4
2.1.2 Messunsicherheit	7
2.2 Messsysteme der Fertigungsmesstechnik	11
2.2.1 Kategorisierung	12
2.2.2 Metrologische Lücke	16
2.3 Positioniersysteme der Nanokoordinatenmesstechnik	18
2.3.1 Dreidimensionale Positioniersysteme	18
2.3.2 Positioniersysteme mit erhöhtem Freiheitsgrad	20
2.4 Ausgewählte Sensoren der Nanometrologie	23
2.4.1 Rasterkraftmikroskope	25
2.4.2 Mikrotaktile Tastsysteme	30
2.5 Problemfelder der mikrotaktilen Antastung	32
2.5.1 Grobgestalt der Tastkugel	33
2.5.2 Anziehende Kräfte	35
2.6 Charakterisierung einer (mikrodimensionalen) Kugel	38
2.6.1 Bestimmung der Grobgestalt	38
2.6.2 Bestimmung der Feingestalt	41
2.7 Konfokalmikroskopie	42
2.7.1 Aufbau und Modellierung	44
2.7.2 Weiterentwicklungen	48
2.8 Fokusbandsmodulierter Konfokalsensor	50
2.8.1 Aufbau und Modellierung	50
2.8.2 Signalauswertung	52
3 Handlungsbedarf und Zielsetzung	57
3.1 Handlungsbedarf	57
3.2 Zielsetzung	59
4 Rasterkraftmikroskopische Charakterisierung	61
4.1 Aufbau und metrologische Eigenschaften des Sensorsystems	62
4.1.1 Aufbau und Signalfluss	62
4.1.2 Metrologische Eigenschaften	63

4.2	Klemmender Sensorhalter	70
4.2.1	Aufbau	70
4.2.2	Metrologische Eigenschaften	71
4.3	Selbstaktuierender Messmodus	75
4.3.1	Aufbau	77
4.3.2	Metrologische Eigenschaften	77
4.4	Zusammenfassende Untersuchungen	79
4.4.1	Vergleich der unterschiedlichen Konfigurationen .	79
4.4.2	Untersuchungen zu den verbleibenden Abweichungen	80
4.4.3	Applikationsmessung	81
4.5	Fazit	82
5	Konfokalmikroskopische Charakterisierung	85
5.1	Messmodi des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors	86
5.1.1	Darstellung	86
5.1.2	Untersuchungen zum Auflösungsvermögen	93
5.2	Konfokalmikroskopische Kugelmessung	105
5.2.1	Steigungsabhängige systematische Messabweichungen	107
5.2.2	Bidirektionale Messung einer Mikrokugel	115
5.3	Fazit	121
6	Zielerreichung und Ausblick	123
6.1	Zielerreichung	123
6.2	Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	129

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ADU	Analog-Digital-Umsetzer
DAkkS	Deutsche Akkreditierungsstelle
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSP	Digitaler Signalprozessor (<i>digital signal processor</i>)
EN	Europäische Norm
FMT	Fertigungsmesstechnik
FPGA	im Feld programmierbare Gatteranordnung (<i>field programmable gate array</i>)
FWHM	Halbwertsbreite (<i>full width at half maximum</i>)
GPS	Geometrische Produktspezifikation
GUM	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>)
ISO	Internationale Organisation für Normung (<i>International Organization for Standardization</i>)
KMS	Koordinatenmesssystem
NPL	<i>National Physical Laboratory</i>
PI	proportional-integral
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RCT	Röntgen-Computertomografie
SFM	Rasterkraftmikroskop (<i>scanning force microscope</i>)
SI	Internationales Einheitensystem SI
STM	Rastertunnelmikroskop (<i>scanning tunneling microscope</i>)
TAG	akustisch modulierbare Gradienten-Index (<i>tunable acoustic gradient index</i>)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

Abkürzung	Beschreibung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIM	Internationales Wörterbuch der Metrologie (<i>Vocabulaire international de métrologie</i>)
WKS	Werkstückkoordinatensystem
WLI	Weißlichtinterferometer
μ -3D-KMS	mikrotaktil antastendes 3D-KMS

Formelzeichenverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_i		i -te Eingangsgröße des Modells der Messung
a_i	varius	Schätzwert von A_i
A_N		numerische Apertur
B		Ausgangsgröße des Modells der Messung
b	varius	Schätzwert von B
C	varius	Offset
c	m s^{-1}	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
D_{LIM}	m	lateraler Periodengrenzwert
d	m	Abstand / Auslenkung / Durchmesser
E	N m^{-2}	E-Modul
E_n		normierte Abweichung
\mathcal{F}		Fourier-Transformation
F	N	Kraft
f	m	Brennweite
g	m^{-1}	Ortsfrequenz
H	J	Hamaker-Konstante
h		Ordnung der Harmonischen
I		normierte Intensität
j		imaginäre Einheit
k		Erweiterungsfaktor

Symbol	Einheit	Beschreibung
l	m	Länge
\vec{M}	[m m m] ^T	Mittelpunkt
m		(Mess-)Funktion
N		Anzahl
n		Brechungsindex
O	J m ⁶	stoffspezifische Konstante
P_I	[m m m] ^T	Ist-Berührungspunkt
P_S	[m m m] ^T	Soll-Berührungspunkt
\vec{p}	[m m m] ^T	Antastvektor
q		Reflektivität
R	varius	phasenunabhängige Schwingungsamplitude
R_a	m	arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten
R_z	m	größte Höhe des Profils
r	m	Radius / radiale Koordinate
S	varius	Schwellwert
T	s	Periodendauer
t	s	Zeit
U	V	Spannung
u	varius	Standardmessunsicherheit
u_c	varius	kombinierte Standardmessunsicherheit
V	J m ¹²	stoffspezifische Konstante
v	s ⁻¹	Frequenz
w_{LJ}	J	Lennard-Jones-Potential
w_S	m	elastische Tasterschaftbiegung
X	varius	Sinusanteil einer Schwingung
x	m	Achse / Koordinate im kartesischen Koordinatensystem
Y	varius	Cosinusanteil einer Schwingung
y	m	Achse / Koordinate im kartesischen Koordinatensystem
Z	varius	Verstärkungsfaktor

Symbol	Einheit	Beschreibung
z	m	Achse / Koordinate im kartesischen Koordinatensystem
α	°	halber Öffnungswinkel
Γ		dimensionsloser Parameter
γ_a		normierte axiale Koordinate
γ_r		normierte optische Koordinate
Δ	varius	Abweichung
δ_i	varius	Sensitivitätskoeffizient von a_i
η	°	Azimutwinkel
θ	°	Polarwinkel
κ		kohärente Transferfunktion
λ	m	Wellenlänge
σ	varius	Standardabweichung
τ	m	Spotgröße
ϕ	°	Phase / Winkel

1 Einleitung

Vor nunmehr über vier Jahrzehnten prognostizierte NORIO TANIGUCHI mittels Extrapolation historischer Daten die zukünftige Entwicklung der Fertigungsgenauigkeit, wonach um die Jahrtausendwende eine Genauigkeit weit in den Nanometerbereich hinein, und somit bis zu einem Millionstel eines Millimeters, erreicht sein sollte [1]. Nun wurde aus Zukunft Vergangenheit und seine Vorhersage sollte sich als zutreffend erwiesen haben [2–4]. Insbesondere ist auch die hochpräzise Fertigung miniaturisierter dreidimensionaler Strukturen [5] sowie die Fertigung makroskaliger Bauteile mit nanoskaligen oder in Nanometern tolerierten Geometrielementen [6] möglich geworden. Anwendung finden die Fertigungsverfahren in vielen unterschiedlichen Bereichen, etwa in der Optik zur Herstellung von Freiformflächen [7, 8], in der Energietechnik zur Herstellung miniaturisierter Aggregate [9], in der Medizin zur Herstellung penetrierender Mikroelektroden [10] oder in der Konsumgüterindustrie zur Erzeugung dekorativer Effekte [11]. Ungeahnte Designfreiheiten werden außerdem durch die neu aufgekommenen und zunehmend auch zur Fertigung mikrodimensionaler Bauteile eingesetzten additiven Fertigungsverfahren ermöglicht [12–15].

Schon im Jahr 1959 stellte RICHARD FEYNMAN die Frage, warum Dinge nicht einfach in sehr viel kleinerem, nämlich in atomarem Maßstab hergestellt werden und zeigte das Potential der Manipulation einzelner Atome für vielfältigste Anwendungen auf [16]. Wie sich allerdings herausstellen sollte, ist eine einfache Skalierung makro- und mesoskaliger Fertigungsprozesse nicht möglich, da in den neuen Dimensionen zuvor vernachlässigbare Einflussfaktoren entscheidend werden können [17]. Dieser Umstand ergibt sich beispielsweise aus der unproportionalen Skalierung von Längen, Flächen und Volumen [18]. Skalierungseffekte treten insbesondere auch in der Fertigungsmesstechnik (FMT) auf, für welche die genannten Entwicklungen enorme Herausforderungen darstellen [19]. Die Geometrie der Bauteile verlangt die sehr anspruchsvolle Messung an hohen Aspektverhältnissen, beispielsweise innenliegender Mikrostrukturen [20]. Weiterhin birgt die Verwendung kleiner Antastkugeln oder die Messung weicher Materialien die Gefahr der plastischen Verformung der Messobjektoberfläche [21]. Auch kann eine stark variierende Oberflächennormale zu Messabweichungen beitragen [22–24]. Ungeachtet der Komplexität der Messaufgabe, ist für die Entscheidung über Konformität oder Nichtkonformität eines Bauteils dem Messwert auch die entsprechende Messunsicherheit beizuordnen [25]. Diese sollte, der auf GEORG BERNDT zurückgehenden goldenen Regel der Messtechnik [26] folgend, nicht

mehr als ein Zehntel der zu prüfenden Toleranz betragen. Die Anforderungen an die Messtechnik sind also enorm.

Hinsichtlich der Positioniersysteme existieren Lösungen, welche diesen Anforderungen insbesondere durch strikte Einhaltung des von ERNST ABBE formulierten Komparatorprinzips [27] in allen drei Achsen gerecht werden und dreidimensionale Relativbewegungen zwischen Sensor und Messobjekt über mehrere Millimeter mit einer Auflösung im Subnanometerbereich ermöglichen [28, 29]. Der Einsatz von ihrem Aufbau nach auf ALBERT MICHELSON zurückgehenden Interferometern [30] in Kombination mit frequenzstabilisierten Lasern ermöglicht weiterhin die Rückführung der Weglängenmessung [31]. Demgegenüber existiert hinsichtlich der Sensoren eine im Verlauf dieser Arbeit noch detailliert dargestellte metrologische Lücke, die es zu schließen gilt, um rückführbare Messungen auch an komplexen Geometrien mit Unsicherheiten im unteren Nanometerbereich durchführen zu können [19, 32]. Begünstigt wird die Schließung dieser Lücke nicht zuletzt durch die Errungenschaften der Fertigungstechnologie, welche Verbesserungen im gesamten Bereich der Metrologie maßgeblich ermöglichten und auch weiterhin ermöglichen, angefangen bei der genaueren Realisierung von Basiseinheiten [33] bis hin zur Fertigung neuartiger Sensorsysteme und -komponenten, etwa additiv gefertigter Gitterwerke zur Schwingungsisolierung [34] oder monolithisch hergestellter Parallelkinematiken als Teil mikrotakter Tastsysteme [35]. Die praxistaugliche Anwendung weiter Teile der immer wichtiger werdenden optischen Messtechnik wurde durch die schnelle Datenverarbeitung überhaupt erst ermöglicht [36]. Hinsichtlich der bestehenden metrologischen Lücke konnten die bereits erwähnten mikrotaktilen Tastsysteme zwar schon zu einer signifikanten Schließung derselben beitragen, zum Erreichen der geforderten Messunsicherheit bedürfen sie allerdings weiterer Verbesserungen [37]. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Als theoretische Grundlage der Arbeit werden in Abschnitt 2.1 zunächst die beiden eng verwandten Konzepte der Messunsicherheit und der metrologischen Rückführbarkeit eingeführt. In Abschnitt 2.2 wird der Stand der Technik hinsichtlich der Messsysteme der FMT sowie die bereits angesprochene metrologische Lücke dargestellt. Die beiden Abschnitte 2.3 und 2.4 widmen sich den in der Nanometrologie verwendeten Positioniersystemen und Sensoren, wobei bei Letzteren der Fokus auf die an den Rändern der metrologischen Lücke vorzufindenden Rasterkraftmikroskope und mikrotaktilen Tastsysteme gelegt wird. In den Abschnitten 2.5 und 2.6 werden die Problemfelder der mikrotaktilen Antastung sowie Möglichkeiten zu deren Behebung genauer untersucht, um darauf aufbauend in Kapitel 3 die Zielsetzung dieser Arbeit zu konkretisieren.

2 Stand der Forschung und Technik

Grundlage einer jeden sinnvollen inhaltlichen Auseinandersetzung bildet ein gemeinsames Verständnis der verwendeten Begrifflichkeiten. Um es mit den Worten CARL VON CLAUSEWITZ' auszudrücken: „(...) erst, wenn man sich über Namen und Begriffe verständigt hat, darf man hoffen, in der Betrachtung der Dinge mit Klarheit und Leichtigkeit vorzuschreiten, darf man gewiß [sic!] sein, sich mit dem Leser immer auf demselben Standpunkt zu befinden“ [38, S. 110]. Das Internationale Wörterbuch der Metrologie (*Vocabulaire international de métrologie*, VIM) [39] definiert die wichtigsten Begriffe der Metrologie, sodass auf diese Definitionen ohne explizite Nennung derselben zurückgegriffen werden kann. Bei von nun an erstmaliger Verwendung eines Begriffs aus dem VIM wird auf dieses mit der entsprechenden Nummer des Begriffs nach dem Schema „**Metrologie** (VIM, 2.2)“ verwiesen. Im VIM stehen die Begriffe im Nominativ Singular. Zum Zwecke der Lesbarkeit werden sie im Folgenden auch in anderem Kasus und, sofern es die Bedeutung zulässt, Numerus eingeführt. Nicht definiert ist im VIM der im Deutschen gebräuchliche Begriff „Messtechnik“. Dieser wird im Folgenden als Synonym zum Begriff „Metrologie“ verwendet.

An verschiedenen Stellen wird auf aktuelle Normung verwiesen. In Deutschland ist das Deutsche Institut für Normung (DIN) für die Normung und Standardisierung zuständig. Das internationale Pendant ist die Internationale Organisation für Normung (*International Organization for Standardization*, ISO). Weiterhin gibt es auf europäischer Ebene Europäische Normen (EN). Nähere Erläuterungen und Anwendungshinweise finden sich oftmals in Richtlinien, die vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) in Zusammenarbeit mit dem Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) herausgegeben werden. Auch auf diese wird an mancher Stelle verwiesen. Wesentlich über deren Definition hinausgehend werden in diesem Kapitel zunächst die **metrologische Rückführbarkeit** (VIM, 2.41) und die **Messunsicherheit** (VIM, 2.26) eingeführt. Anschließend wird mit den Koordinatenmesssystemen (KMS) auf die vielleicht wichtigsten **Messsysteme** (VIM, 3.2) der FMT sowie die bereits angesprochene metrologische Lücke eingegangen. In Anlehnung an [40] wird FMT in einem engen Sinne verstanden als der Teil der Metrologie, der sich während des Herstellungsprozesses technischer Güter mit der **Messung** (VIM, 2.1) dimensioneller **Größen** (VIM, 1.1) befasst. Abschließend werden Positioniersysteme der Nanokoordinatenmesstechnik und **Sensoren** (VIM, 3.8) der Nanometrologie dargestellt. Die Definitionen der Nanokoordinatenmesstechnik und der Nanometrologie werden an entsprechender Stelle gegeben.

2.1 Theoretisch konzeptionelle Grundlagen

Im Zeitalter des internationalen Warenverkehrs und dem seit der Industriellen Revolution üblichen Zusammensetzen von Produkten aus austauschbaren, weil passenden, Komponenten, sind international vergleichbare und korrekte¹ **Messwerte** (VIM, 2.10) im Bereich der FMT unabdingbar [41]. Auf der anderen Seite können Messungen stets gänzlich oder teilweise unbekanntem Einflüssen unterworfen sein [42, Kapitel 1.2], sodass ein **Messergebnis** (VIM, 2.9) nur ein Schätzwert für den Wert der **Messgröße** (VIM, 2.3) sein kann [43]. Diesem scheinbaren Widerspruch aus dem notwendigerweise zweifelbehafteten Ergebnis einer Messung bei gleichzeitig geforderter Korrektheit und (internationaler) Vergleichbarkeit desselben wird in der Metrologie mit den beiden unlösbar verbundenen Konzepten Messunsicherheit und metrologische Rückführbarkeit begegnet [44], welche im Folgenden dargestellt werden.

2.1.1 Metrologische Rückführbarkeit

Der **Größenwert** (VIM, 1.19) ist definiert als „Zahlenwert und Referenz, die zusammen eine Größe quantitativ angeben“ [VIM, 1.19]. Bei einer Messung wird dieser Wert einer Größe empirisch ermittelt [VIM, 2.1]. Der Forderung nach **metrologischer Vergleichbarkeit von Messergebnissen** (VIM, 2.46) lässt sich augenscheinlich dadurch Rechnung tragen, für Größenwerte derselben **Größenart** (VIM, 1.2) dieselbe Referenz zu nutzen. Eine **Maßeinheit** (VIM, 1.9) ist eine mögliche Referenz, durch Vereinbarung definiert, mittels derer sich jede Größe gleicher Art quantitativ als Verhältnis zum Größenwert eben dieser Maßeinheit ausdrücken lässt. Mehrere Größen unterschiedlicher Art bilden, sofern sie mittels widerspruchsfreier Gleichungen zueinander in Beziehung gesetzt sind, ein **Größensystem** (VIM, 1.3). Durch Vereinbarung lässt sich eine Teilmenge eines Größensystems so auswählen, dass sich keine der Größen der Teilmenge durch eine andere Größe dieser Teilmenge ausdrücken lässt. In diesem Fall wird eine Größe dieser Teilmen-

¹ Die Begriffe „vergleichbar“ bzw. „Vergleichbarkeit“ und „korrekt“ bzw. „Korrektheit“ sind hier zunächst dem allgemeinen Sprachgebrauch entsprechend verwendet. Mit Korrektheit soll die leicht nachvollziehbare, allgemein gehaltene, aber leider auch idealisierte, Forderung ausgedrückt werden, dass die empirisch bestimmte Eigenschaft eines Anschauungsobjekts mit der tatsächlichen Eigenschaft desselben übereinstimmt. Mit Vergleichbarkeit wird gefordert, dass sich mehrere Resultate einer Bestimmung einer Eigenschaft eines Anschauungsobjekts ineinander überführen lassen. Dies wäre beispielsweise nicht der Fall, wenn der Durchmesser eines perfekt runden Anschauungsobjekts in einen Fall als (korrekt bestimmtes) Vielfaches der Länge eines Referenzobjekts A und im anderen Fall als (korrekt bestimmtes) Vielfaches der Länge eines Referenzobjekts B angegeben wird, ohne dass das Verhältnis von A zu B bekannt ist.

ge als **Basisgröße** (VIM, 1.4) bezeichnet. International ist auch über den Bereich der Metrologie hinaus in der DIN EN ISO 80000-1 [45] das **Internationale Größensystem ISQ** (VIM, 1.6) mit den Basisgrößen Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke festgelegt. Darauf aufbauend sind im **Internationalen Einheitensystem SI** (VIM, 1.16, SI) auch die zugehörigen **Basiseinheiten** (VIM, 1.10) definiert, welche in Tabelle 1 ersichtlich sind. Die Vorsätze für **Vielfache** (VIM, 1.17) und **Teile** (VIM, 1.18) einer Einheit sind in [VIM, 1.16, Anmerkung 5] und identisch in [45, S. 6.5.4] festgelegt. Andere Einheiten, wie etwa das Newton (N) für die **abgeleitete Größe** (VIM, 1.5) Kraft, sind **abgeleitete Einheiten** (VIM, 1.11) und lassen sich in den Basiseinheiten darstellen ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$).

Tabelle 1: Basisgrößen und Basiseinheiten des SI [VIM, 1.16].

Basisgröße Name	Basiseinheit	
	Name	Zeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	Ampere	A
thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Die dimensionelle Messtechnik befasst sich primär mit der Messung der Basisgröße Länge mit der Basiseinheit Meter bzw. mit der Messung davon abgeleiteter Größen, etwa dem ebenen Winkel [41], einer **Größe der Dimension Eins** (VIM, 1.8). Ab 1984 war der Meter über die Lichtgeschwindigkeit definiert als die Länge der Strecke, welche Licht im Vakuum innerhalb eines Zeitintervalls von $1/(299\,792\,458)$ einer Sekunde zurücklegt (im Original auf Englisch: „*The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of $1/(299\,792\,458)$ of a second*“ [46]). Mit der Neudefinition des Meters im Jahr 2019 wurde die bis dahin lediglich implizit festgelegte Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c mit dem **Zahlenwert der Größe** (VIM, 1.20) $299\,792\,458$ und der Einheit m s^{-1} explizit festgelegt und hierüber der Meter definiert [47]. Praktisch führte dies zu keiner Änderung. Die Definition eignet sich zur Messung großer Distanzen (beispielsweise der Distanz der Erde zum Mond) über die Laufzeitmessung eines Lichtimpulses. Für

die Realisierung der Längeneinheit Meter mit besonders hoher **Genauigkeit** (VIM, 2.13), wenngleich über kürzere Distanzen, typischerweise kleiner als wenige Meter, werden interferometrische Aufbauten in Kombination mit Lichtquellen bekannter Frequenz ν eingesetzt. Hierbei ist die Frequenz ν des Lasers mit dessen Wellenlänge λ im Vakuum über $c = \nu \cdot \lambda$ verknüpft. Als **intrinsisches Normal** (VIM, 5.10) wurde speziell für die Nanometrologie und Messungen im unteren Nanometer- und Pikometerbereich auch der Wert des Atomabstands von Silizium festgelegt. In [48] ist die Verwendung dieses **Normals** (VIM, 5.1) näher beschrieben. [49]

Metrologische Rückführbarkeit ist im VIM unter Verwendung des noch nicht genannten Begriffs **Kalibrierung** (VIM, 2.39) definiert als „Eigenschaft eines Messergebnisses, wobei das Ergebnis durch eine dokumentierte, ununterbrochene Kette von Kalibrierungen, von denen jede zur Messunsicherheit beiträgt, auf eine Referenz bezogen werden kann“ [VIM, 2.41]. Handelt es sich bei der Referenz um eine Maßeinheit, so wird von **metrologischer Rückführbarkeit auf eine Einheit** (VIM, 2.43) gesprochen. Im speziellen Fall, dass es sich bei der Maßeinheit um eine Basiseinheit des SI handelt, kann auch von „Rückführbarkeit auf das SI“ [VIM, 2.43, Anmerkung] gesprochen werden. Auf das SI rückführbare Messergebnisse derselben Größenart sind metrologisch vergleichbar. Die zur Rückführung eines Messergebnisses notwendige **metrologische Rückführungskette** (VIM, 2.42), welche durch eine **Kalibrierhierarchie** (VIM, 2.40) definiert ist, wird in der Literatur oftmals als Rückführungspyramide dargestellt [50–55]. Die Verbreiterung nach unten illustriert die sich mit der Abfolge der Kalibrierungen erhöhende Messunsicherheit [VIM, 2.40, Anmerkung 1]. Historisch bedingt wurden nationale Metrologieinstitute an die Spitze der Pyramiden gesetzt. Nachdem seit 2019 allerdings alle Basiseinheiten über den **vereinbarten Wert** (VIM, 2.12) von sieben definierenden Konstanten festgelegt sind, ist die Definition einer Einheit von deren Realisierung getrennt [47]. **Primärmessverfahren** (VIM, 2.8), welche eine Einheit bzw. ein **Primärnormal** (VIM, 5.4) realisieren, lassen sich somit auch außerhalb nationaler Metrologieinstitute aufbauen und die metrologische Rückführbarkeit eines Messergebnisses lässt sich auch ohne Vorhandensein eines **internationalen** (VIM, 5.2) oder **nationalen Normal**s (VIM, 5.3) der gemessenen Größenart in der metrologischen Rückführungskette gewährleisten. Die Verwendung einer definierenden Konstante als intrinsisches Normal als Referenz zur Herstellung der metrologischen Rückführbarkeit ist in der entsprechenden Normung ausdrücklich erlaubt [56, A.2.1]. Ein Beispiel für ein Primärnormal für den Meter ist der Nanometerkomparator der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), dem nationalen Metrologieinstitut Deutschlands [57]. In [P₁] wird auf den zeitlichen Aspekt der Rückführung eingegangen.

2.1.2 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit, oder auch kurz nur Unsicherheit genannt, tauchte bereits in der Definition der metrologischen Rückführbarkeit auf und ist mit dieser somit untrennbar verbunden [44]. Dies bedeutet jedoch nicht, dass rückführbare Messergebnisse notwendigerweise eine geringe, sondern dass sie überhaupt eine Messunsicherheit besitzen [52]. Messunsicherheit ist im VIM definiert als „nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist“ [VIM, 2.26]. Bei jeder Messung kann es aus unterschiedlichsten Gründen zu **Messabweichungen** (VIM, 2.16) kommen, sodass ein Messergebnis nur ein Schätzwert für den **wahren Wert** (VIM, 2.11) der Messgröße sein kann [43]. Die Messunsicherheit dient der Quantifizierung der unvermeidbaren Unzulänglichkeit einer Messung und der damit einhergehenden Zweifelhaftigkeit hinsichtlich der Abwesenheit von Messabweichungen. Positiv betrachtet handelt es sich bei der Messunsicherheit somit um ein, wenngleich umgekehrt proportionales, Maß für die Qualität einer Messung [43]. Im Allgemeinen ist die Messunsicherheit nicht vernachlässigbar und somit Bestandteil eines Messergebnisses [VIM, 2.9, Anmerkung 2]. Sie ist beispielsweise bei der Bewertung der Konformität bzw. Nichtkonformität eines Bauteils unerlässlich [25].

Eine wichtige Rolle in der dimensionellen Messtechnik spielt die Temperatur, da aufgrund der zumeist von null verschiedenen thermischen Längenänderung eines Messobjekts die geometrischen Eigenschaften desselben von seiner Temperatur abhängen [54, S. 36 ff.]. Auch wirkt sich die Temperatur meist als weitere **Einflussgröße** (VIM, 2.52) auf das Messsystem selbst aus. Zum Erreichen einer entsprechend geringen Messunsicherheit ist daher bei der Definition einer geometrischen Messgröße wie der Länge eines Messobjekts die entsprechende Referenztemperatur zu spezifizieren, da ansonsten die aus der unzureichenden Definition der Messgröße herrührende Komponente der Messunsicherheit (**Eigenunsicherheit** (VIM, 2.27)), welche die erreichbare Messunsicherheit nach unten hin begrenzt, nicht vernachlässigt werden kann und das Erreichen der geforderten geringen Messunsicherheit verhindert [43]. In der Praxis ist es allerdings nicht möglich, die Messgröße vollumfänglich nach ihrer Definition zu realisieren, sodass sich die realisierte Messgröße von der definierten Messgröße unterscheidet [43]. Es ist daher notwendig, die sich durch die unzureichende Realisierung der Messgröße sowie durch die Messung selbst ergebenden **systematischen Messabweichungen** (VIM, 2.17) abzuschätzen (**Bias der Messung** (VIM, 2.18)) und entsprechend eine **Korrektur** (VIM, 2.53) durchzuführen [VIM, 2.3, Anmerkung 3].

Insbesondere bei hochgenauen Messungen lässt sich die im Allgemeinen entsprechend umfangreich spezifizierte Messgröße zumeist nicht hinreichend realisieren, sodass eine direkte Messung derselben nicht möglich ist. Stattdessen wird der indirekten **Messmethode** (VIM, 2.5) folgend der Wert der definierten Messgröße durch Messung anderer Größen und eines **Modells der Messung** (VIM, 2.48) ermittelt [58, S. 3.8.2]. Die definierte Messgröße ist hierbei die **Ausgangsgröße des Modells der Messung** (VIM, 2.51) B und mittels der **Messfunktion** (VIM, 2.49) m über

$$B = m(A_1, \dots, A_N) \quad (1)$$

eindeutig aus den N **Eingangsgroößen des Modells der Messung** (VIM, 2.50) berechenbar, wobei A_i ($i = 1, \dots, N$) die i -te Eingangsgroöße kennzeichnet. Der Schätzwert der Messgröße b wird anhand der Schätzwerte von A_i (a_i) eingesetzt in Formel 1 errechnet. Die Komplexität des Modells der Messung, d. h. insbesondere auch die Anzahl der berücksichtigten Eingangsgroößen, sollte stets in einem sinnvollen Verhältnis zur geforderten Genauigkeit der Messung stehen, was insbesondere die bewusste Nichtberücksichtigung unwesentlicher Größen impliziert [42, Kapitel 3].

Zumeist ist m auch die Grundlage für das Standardverfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit, welches im Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*, GUM) [43] festgelegt ist. Die **Standardmessunsicherheit** (VIM, 2.30) u von b , $u(b)$, errechnet sich als **kombinierte Standardmessunsicherheit** (VIM, 2.31) u_c für den Fall unkorrelierter Eingangsgroößen nach

$$u_c(b) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_i^2 \cdot u^2(a_i)} \quad (2)$$

aus den u der a_i sowie deren Sensitivitätskoeffizienten δ_i , welche sich nach

$$\delta_i = \frac{\partial m}{\partial A_i}(a_1, \dots, a_N) \quad (3)$$

aus der partiellen Ableitung von m nach A_i an der Stelle (a_1, \dots, a_N) , im folgenden Arbeitspunkt genannt, errechnen [43, S. 19]. Voraussetzung dieser analytischen Bestimmung der δ_i ist somit die partielle Differenzierbarkeit von m im Arbeitspunkt bezüglich aller A_i [42, S. 59 ff.]. Bei signifikanten Nichtlinearitäten von m , oder aber wenn alle δ_i null werden, muss anstelle der bisher betrachteten linearen Näherung von m eine Näherung höherer

Ordnung, sofern dies mathematisch möglich ist, durchgeführt werden [43, S. 19, 42, S. 75 ff.]. Alternativ lässt der GUM auch die numerische bzw. die experimentelle Bestimmung der δ_i [43, S. 19 f.], bzw. eine leichte Verschiebung des Arbeitspunkts [42, S. 80], zu. Für korrelierte Eingangsgrößen müssen für die Berechnung von $u_c(b)$ auch noch die Korrelationskoeffizienten der Eingangsgrößen berücksichtigt werden [43, S. 21 ff.]. Sollten die bisher genannten Methoden zur Bestimmung der δ_i nicht praktikabel sein, oder aber wenn die Voraussetzungen des zentralen Grenzwertsatzes [43, G.2] nicht (sicher) gegeben sind und daher nicht davon ausgegangen werden kann, dass B normalverteilt ist, ist im Supplement 1 des GUM eine alternative Methode zur Berechnung der Messunsicherheit auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation beschrieben [59]. Die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation ist im Vergleich zum Standardverfahren die allgemeinere Methode und findet aufgrund ihrer methodischen Einfachheit insbesondere auch bei komplexen Modellen der Messung bzw. bei durch codierte Algorithmen errechneten Messwerten, etwa bei der Verwendung von *Stitching*-Algorithmen [P2], Anwendung [60].

Der GUM lässt zur Ermittlung der Standardmessunsicherheit einer Eingangsgröße sowohl statistische Analysen einer Menge von Messwerten, welche unter definierten Messbedingungen erhalten wurden (**Ermittlungsmethode A der Messunsicherheit** (VIM, 2.28)), als auch andere Methoden basierend auf wissenschaftlichem Beurteilen der zur Verfügung stehenden Informationen (**Ermittlungsmethode B der Messunsicherheit** (VIM, 2.29)) [43, S. 10 ff.] zu. Standardmessunsicherheiten werden, unabhängig der Methode ihrer Ermittlung, gleich behandelt und prinzipiell als gleichwertig angesehen [43, S. 6]. Weiterhin wird bei der Angabe der Messunsicherheit nicht differenziert in Komponenten, welche sich aus systematischen oder aber im Gegensatz dazu aus zufälligen Effekten ergeben [43, S. 54]. Demgegenüber war es bis zur Einführung des GUM üblich, systematische und **zufällige Messabweichungen** (VIM, 2.19) sowohl unterschiedlich handzuhaben, als auch getrennt anzugeben [61, 42, S. 309]. Die Abkehr von dieser Ungleichbehandlung blieb nicht ohne Kritik, denn systematische und zufällige Komponenten der Unsicherheit unterscheiden sich hinsichtlich ihres Effekts [62]. So können systematische Messabweichungen die Folge haben, dass bei der Prüfung der Bauteile einer Charge (nahezu) sämtliche Messergebnisse größere Messabweichungen haben als dies aufgrund der angegebenen Unsicherheit zu erwarten wäre. Dies nicht etwa, weil die angegebene Unsicherheit falsch angegeben wurde, sondern weil eine systematische Messabweichung alle Ergebnisse gleichsam negativ beeinflusste. Korrekt angegeben kann die Unsicherheit in diesem Fall dennoch sein, wenn bei anderen Chargen im Gegenzug (nahezu) sämtliche Messabweichungen in einem kleineren Bereich liegen, als aufgrund der angegebenen Unsicherheit zu erwarten gewesen wäre. [63]

Da systematische Messabweichungen somit beispielsweise dazu führen können, dass ganze Chargen intakter Bauteile zurückgewiesen werden, oder aber fehlerhafte Chargen freigegeben werden, sollten signifikante systematische Messabweichungen stets identifiziert und korrigiert werden. Die im GUM diesbezüglich zu findende, eindringliche Empfehlung [43, Bemerkung zu 6.3.1] entkräftet jedoch die Kritik an der Gleichbehandlung systematischer und zufälliger Messabweichungen. Denn der GUM geht davon aus, dass signifikante, systematische Messabweichungen identifiziert und korrigiert wurden [43, S. 5].

Nach der Darstellung der Ermittlung der Messunsicherheit bleibt die Frage nach ihrer Interpretation. Auf die Frage, was die Messunsicherheit eigentlich ist, gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansichten, wobei sich diese grob in das Lager derer, die einem frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff folgen [64], und derjeniger, welche dem nach THOMAS BAYES benannten Wahrscheinlichkeitsbegriff folgen [65], einteilen lassen. Der GUM lässt beide Wahrscheinlichkeitsauffassungen zu [43, C.2.1 und E.3.5]. Ein Umstand, der letztendlich die Anhänger beider Lager unzufrieden zurücklässt [66, 64, Kapitel 14, 42, S. 310 ff.]. In der Praxis steht jedoch weniger die Interpretation, als die Verwendung des Messergebnisses im Vordergrund [67]. Da die Verwendung der Messunsicherheit in der FMT beispielsweise durch Normung beim Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen klar festgelegt ist [25], erübrigt sich die Frage nach ihrer Interpretation. Es findet sich daher in der Literatur aus diesem Bereich zumeist nicht einmal ein Hinweis auf die eben angesprochenen statistischen Kontroversen [51, 54, 68–71]. Auch an dieser Stelle soll hierauf nicht weiter eingegangen werden. Bei der Prüfung der **metrologischen Verträglichkeit von Messergebnissen** (VIM, 2.47) ist die Verwendung der Messunsicherheit ebenfalls klar geregelt [72, 73]. Während hierbei beispielsweise bei optischen Messsystemen oftmals nicht korrekte Messungen, d. h. Messungen, bei denen die Messunsicherheit als zu klein eingeschätzt wurde, aufgedeckt werden [74, 75], liefern taktile Messsysteme im Allgemeinen metrologisch verträgliche Messergebnisse mit geringen Messunsicherheiten [76, 77]. Der Grund hierfür dürfte weniger in einer sich unterscheidenden Interpretation der Messunsicherheit zu suchen sein, als vielmehr in einem die Realität nicht hinreichend genau abbildenden Modell der Messung [43, S. 7]. Denn nach Formel 1 und 2 tragen nur die Eingangsgrößen von m zur Unsicherheit bei. Validieren lässt sich die hinreichende Genauigkeit von m , und somit auch das Messergebnis, nur durch Vergleichsmessungen, idealerweise mittels eines alternativen **Messverfahrens** (VIM, 2.6) [43, F.2.5].

2.2 Messsysteme der Fertigungsmesstechnik

Nach der Darstellung der konzeptionellen Grundlagen der Metrologie im vorherigen Abschnitt, wird in diesem Abschnitt der Stand der Technik hinsichtlich der Messsysteme der FMT zunächst kategorisiert, um anschließend die bereits in der Einleitung angesprochene metrologische Lücke in der Nanometrologie darzustellen. In Anlehnung an [78] wird Nanometrologie verstanden als der Teil der FMT, welcher sich mit der Messung einer Größe mit einem Größenwert zwischen 1 nm und 1 µm befasst, oder mit der Messung einer Größe mit beliebigem Größenwert mit einem **Höchstwert der Messunsicherheit** (VIM, 2.34) von weniger als 100 nm.

Eine Kategorisierung von Messsystemen ist anhand unterschiedlicher Kategorien möglich, etwa dem zugrundeliegenden **Messprinzip** (VIM, 2.4) oder dem Einsatzort innerhalb des Produktentstehungsprozesses [79]. Im Nachfolgenden wird die Kategorisierung jedoch anhand der bewältigbaren Messaufgaben vorgenommen. Die Hauptaufgabe der FMT besteht darin zu prüfen, ob die tatsächlichen Gestaltabweichungen eines Werkstücks innerhalb der vorgegebenen Toleranz liegen. Die Geometrische Produktspezifikation (GPS) [80], d. h. die Spezifikation der Sollgestalt eines Werkstücks und der zulässigen Abweichungen des tatsächlichen Werkstücks hiervon, ist in einem umfangreichen Normensystem international einheitlich festgelegt [81]. Abweichungen von der Nenngeometrie werden unterschieden in Maß-, Form- und Lageabweichungen. Hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit wird zumeist zwischen der Form und der Rauheit unterschieden [82]. [83]

Lage-, Maß- und Formabweichungen sind nicht unabhängig voneinander, denn beispielsweise können letztere die Folge haben, dass ein Größenmaß vom Ort der Erfassung und Auswertung am Größenmaßelement abhängt [84]. Aufgrund der Vielzahl relevanter Einflussfaktoren bei der Fertigung miniaturisierter Bauteile [85], kann bei diesen meist nicht von vernachlässigbaren Formabweichungen ausgegangen werden. Zur Messung eines solchen Bauteils muss daher in der Regel ein KMS eingesetzt werden, da dieses bei einer adäquaten Anzahl und Verteilung an Messpunkten Maß-, Form- und Lageabweichungen in einer Messung erfassen und anschließend separieren kann. Hierzu erfasst ein KMS zunächst Messpunkte an einem Messobjekt in einem gemeinsamen Koordinatensystem, um anschließend Messgrößen, etwa den Durchmesser und die Formabweichung einer Bohrung, anhand der Auswertung der Beziehung mehrerer Messpunkte zueinander zu berechnen. Der Einsatz von KMS ist auch dann notwendig, wenn anhand der Messdaten tiefergehende Auswertungen als lediglich die Prüfung der Einhaltung der Spezifikation vorgenommen werden sollen, wie dies etwa bei mikrostrukturierten [86] oder Freiformflächen [87] sinnvoll sein kann. [88, S. 57 ff.]

2.2.1 Kategorisierung

Die Idee, die Position eines Punkts im Raum durch Angabe einer Menge an Zahlen anzugeben, war schon den alten Griechen bekannt. Diese Menge an Zahlen wird als Koordinaten bezeichnet. Das bekannteste Koordinatensystem ist das kartesische Koordinatensystem, bei welchem die drei senkrecht aufeinanderstehenden Achsen sowie die entsprechenden Koordinaten zumeist mit den Buchstaben x , y und z bezeichnet werden. [89, S. 105]

Lange war die FMT dennoch auf die Verwendung von **Messgeräten** (VIM, 3.1) beschränkt, welche lediglich die Messung von Zweipunktmaßen erlauben, wie etwa Bügelmessschrauben [90] oder Messuhren [91]. In Anlehnung an [88] lässt sich dies unter dem Begriff konventionelle FMT zusammenfassen. Auch die Messung eines Winkels mittels eines Sinuslineals [92] fällt hierunter [88]. [93]

Seit über 100 Jahren werden Tastschnittgeräte zum Messen der Oberflächenbeschaffenheit verwendet [94]. Bei diesen wird eine die Oberfläche taktil antastende Tastspitze über eben diese geführt und hierbei die Auslenkung der Tastspitze detektiert, sodass das Profil der Oberfläche in der Form $z(x)$ aufgenommen wird [95]. Aus diesem Profil werden anschließend Messgrößen anhand der Auswertung der Beziehung der Messpunkte zueinander berechnet [96]. Ein Tastschnittgerät ist daher ein KMS nach der auf der vorherigen Seite genannten Definition. Weiterhin existieren Messgeräte zur Messung der Oberflächentopographie, welche eine flächenhafte Messung durchführen und entsprechend Messwerte der Form $z(x,y)$ liefern [97]. Für eine ausführliche Darstellung der Oberflächenmesstechnik sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur [98–100] verwiesen. Gemein ist diesen Messgeräten, welche zu den Oberflächenmessgeräten gehören und unter dem Begriff Oberflächenkoordinatenmessgeräte zusammengefasst werden können, dass die Beziehung $z(x)$ bzw. $z(x,y)$ mathematisch eindeutig ist, d. h. jedem lateralen Punkt auf der Oberfläche wird exakt eine Höhe z zugewiesen. Senkrechte Flanken oder gar Hinterschneidungen werden entsprechend nicht erfasst. Bei der taktilen Antastung führen auch steile Flanken aufgrund der finiten Größe des Antastelements und einer nicht erkennbaren Abweichung des Ist-Berührungspunkts P_I vom Soll-Berührungspunkt P_S zu Abweichungen des erfassten vom wahren Profil. In Bild 1 ist dies dargestellt. Während die Spitzen des wahren Profils lediglich abgerundet erfasst werden, wird die erfasste Tiefe von Tälern reduziert [101]. An den Spitzen spiegelt sich die Form des Antastelements in das erfasste Profil. Für hochgenaue Messungen sind diese systematischen Abweichungen signifikant und müssen daher korrigiert werden. Dies ist jedoch selbst bei Kenntnis der Geometrie des Antastelements nur bis zu einem gewissen Grad möglich, sodass der aus der

Geometrie des Antastelements resultierende Unsicherheitsbeitrag durchaus der dominierende sein kann [102, 103]. [104]

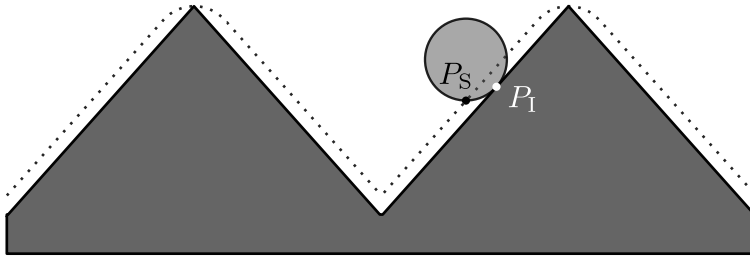


Bild 1: Nicht erkennbare Abweichung von P_1 und P_S führt zu Abweichung des erfassten Profils (gepunktete Linie) vom wahren Profil. Bild modifiziert nach [104].

Aus dem bisher Gezeigten erschließt sich, dass ein Wert für die **Auflösung** (VIM, 4.1) nicht hinreichend ist, um die Grenzen der Einsetzbarkeit eines KMS zu quantifizieren. So findet sich in der DIN EN ISO 25178-600 [97] mit dem Abtastintervall in x -Richtung sowie dem Digitalisierungsschritt in z -Richtung eine Auflösung in Richtung der Antastung und eine senkrecht dazu. Weiterhin beschreibt die topographische räumliche Auflösung die Fähigkeit des Messgeräts zur Unterscheidung nah beieinanderliegender Geometrielemente. Für ein taktil antastendes Messgerät lässt sich die topographische räumliche Auflösung mittels des Radius der Tastspitze quantifizieren. Bei einem optisch antastenden Messgerät kann beispielsweise das nach ERNST ABBE benannte Abbe-Limit [105] oder das nach JOHN RAYLEIGH benannte Rayleigh-Kriterium [106] herangezogen werden. Dies sind jedoch theoretische Werte, welche insbesondere bei optisch antastenden Messgeräten lediglich die physikalisch bedingten unteren Grenzen und nicht notwendigerweise die in der Praxis erreichten Fähigkeiten angeben [107]. Allgemeingültig ist hingegen der empirisch ermittelte laterale Periodengrenzwert, welcher als „räumliche Periode eines sinusförmigen Profils, für die das höhenbezogene Ansprechverhalten einer Übertragungsfunktion des Messgeräts auf 50 % abfällt“ [97] definiert ist. Der laterale Periodengrenzwert ist nicht nur von der räumlichen Periode der Struktur, sondern auch von deren Amplitude abhängig [108]. Es ist daher üblich, die Grenzen der Einsetzbarkeit eines Oberflächenkoordinatenmessgeräts in einem nach MARGARET STEDMAN benannten Diagramm darzustellen, auf dessen Abszisse die Ortsfrequenz einer sinusförmigen Struktur und auf dessen Ordinate die entsprechende Amplitude aufgetragen ist, wobei die Strukturen gekennzeichnet werden, welche vollständig übertragen werden [109]. [97]

Wie bereits dargestellt, sind die Oberflächenkoordinatenmessgeräte in der Erfassung von Messpunkten in einer Dimension insofern beschränkt, als dass

sie jedem lateralen Punkt in der dritten Dimension nur einen Wert zuweisen können. In Anlehnung an [110] wird ein solches KMS als 2,5D-KMS bezeichnet. Eine Möglichkeit ein 3D-KMS zu realisieren, welches auch zur Erfassung senkrechter Flanken oder gar Hinterschneidungen fähig ist, besteht darin, einen dreidimensional antastenden Sensor in einem Positioniersystem mit drei translatorischen Freiheitsgraden einzusetzen, wie dies bei taktil antastenden 3D-KMS heute Stand der Technik ist [111, 112]. Jedoch lassen sich auch eindimensionale Sensoren als Teil eines 3D-KMS einsetzen, sofern der Freiheitsgrad des Positioniersystems entsprechend erhöht wird, wie dies bei KMS mit Gelenkarmen und meist fünf oder mehr Drehachsen [113] oder dem Einsatz eines Dreh-Schwenktasters [88, S. 82 f.] mit zwei Rotationsachsen in einem Positioniersystem mit drei Linearachsen der Fall ist. In Unterabschnitt 2.3.2 wird auf solche Positioniersysteme mit erhöhtem Freiheitsgrad, wie sie in der Nanometrologie Anwendung finden, detailliert eingegangen.

Die in der optischen Messtechnik eingesetzten Bildsensoren liefern keine Topografiewerte der Form $z(x)$ bzw. $z(x,y)$, sondern lediglich Intensitätswerte in der Form $I(x,y)$. Dimensionelle Messgrößen lassen sich aus diesen somit lediglich in lateraler Richtung ableiten. Topografiewerte lassen sich jedoch auch mittels optischer Messtechnik erzeugen, sofern entsprechende Auswertelgorithmen auf in unterschiedlichen axialen Positionen oder Richtungen aufgenommene Aufnahmen angewandt werden. Als Beispiel hierfür ist die Triangulation, die Konfokalmikroskopie oder die Fokusvariation zu nennen, wobei es sich bei nach diesen Prinzipien arbeitenden Messsystemen um 2,5D-KMS handelt. Ein optisch messendes 3D-KMS lässt sich wiederum durch Anwendung entsprechender Algorithmen auf in unterschiedlichen Richtungen aufgenommene Topografiewerte realisieren. Hierbei kann die Positionierung des oder der Sensoren der unterschiedlichen Aufnahmen bekannt sein, die Einzelansichten lassen sich jedoch auch auswerten, wenn die relative Position der Sensoren der Einzelaufnahmen unbekannt ist, allerdings hinreichende Überlappungsbereiche zwischen den Aufnahmen bestehen oder aber Referenzmarken am Messobjekt angebracht wurden, anhand derer sich auch die relativen Positionen der Sensoren zueinander ermitteln lassen. [114–117]

Nach ERNST ABBE ergibt sich die Grenze des Auflösungsvermögens eines Mikroskops „... für rein centrale [sic!] Beleuchtung durch Division der Wellenlänge mit dem Sinus des halben Öffnungswinkels (...)“ [105]. Entsprechend begrenzt ist das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops, da sichtbares Licht eine Wellenlänge von etwa 380 nm bis 780 nm aufweist [36]. Eine Ausnahme ergibt sich bei Verwendung einer Mikrokugel, mittels derer ein Lichtmikroskop mit einer Auflösung senkrecht zur Antastrichtung auch unterhalb der Beugungsbegrenzung realisierbar ist [118]. In einem erstmalig

VON MAX KNOLL und ERNST RUSKA gebauten Elektronenmikroskop werden Elektronen mit einer wesentlich geringeren Wellenlänge von weit unter einem Nanometer eingesetzt, was zu einer drastischen Verbesserung des Auflösungsvermögens führt [119]. Darauf aufbauend geht das Rasterelektronenmikroskop auf MANFRED VON ARDENNE zurück [120]. Auch bei einem Elektronenmikroskop handelt es sich zunächst lediglich um einen lateral messenden Sensor. Als solcher findet er beispielsweise Anwendung in Metrologieinstituten zur Kalibrierung ein- oder zweidimensionaler Messgrößen auf sehr flachen, nanometrologischen **Maßverkörperungen** (VIM, 3.6) [121, 122]. Ein auf dem Prinzip der Elektronenmikroskopie beruhendes 3D-KMS ist die Rastertransmissionselektronenmikroskopie unter Aufnahme und Auswertung einer Reihe von Bildern unterschiedlicher axialer Position, ähnlich der Konfokalmikroskopie [123], sowie die auf elektronenmikroskopische Aufnahmen unter unterschiedlichen Winkeln angewandte Tomografie [124]. Die Anwendbarkeit beider Verfahren ist jedoch auf äußerst dünne Messobjekte beschränkt. [125–128]

Bei der Röntgen-Computertomografie (RCT) wird das Messobjekt durchdringende Röntgenstrahlung eingesetzt. Auch bei dieser werden zunächst Rekonstruktionsalgorithmen eingesetzt, um aus den einzelnen, in unterschiedlichen Rotationen des Messobjekts aufgenommenen Projektionen die dreidimensionalen Volumendaten des Messobjekts zu errechnen. Üblich ist der Einsatz lediglich einer Rotationsachse für die Positionierung des Messobjekts zwischen Strahlungsquelle und Detektor. Allerdings wurde auch der Einsatz einer mehrdimensionalen Positioniereinheit, etwa eines Hexapods, zur Vermeidung von Artefakten in den Volumendaten gezeigt [129]. Mittels weiterer Algorithmen werden aus den Volumendaten die Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialien extrahiert. Damit ermöglicht es die RCT, sowohl die außen- als auch die innenliegende Geometrie eines Messobjekts zerstörungsfrei zu erfassen. Weiterhin wurde auch die Messung von Oberflächenkennwerten gezeigt [130]. [131]

Wie in Abschnitt 2.1 ausführlich dargelegt, ist ein wesentlicher Aspekt in der Metrologie die Rückführbarkeit und damit verbunden die Berechnung der Messunsicherheit eines Messwerts. Aufgrund der guten Modellierbarkeit der taktilen Antastung [110, 132] ist es bei taktil antastenden 3D-KMS möglich, aufgabenspezifisch die Messunsicherheit einer aus der Auswertung der Beziehung mehrerer Messpunkte zueinander errechneten Messgröße zu bestimmen [133]. Selbst bei komplexen Aufgaben problemlos anwendbar ist die Bestimmung der Unsicherheit auf Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation [134–139]. Wie Vergleichsmessungen zeigen, sind diese Messergebnisse zumeist auch metrologisch verträglich [76, 77]. Demgegenüber wurde dieses Maß an Verständnis der optischen Antastung noch nicht erreicht, und

so liefern optisch antastende KMS oftmals metrologisch nicht verträgliche Messergebnisse [74, 75]. Auch bei der RCT ist aufgrund der Komplexität der Messung allein das Aufstellen der Messfunktion und somit die Berechnung der Messunsicherheit nach dem Standardverfahren des GUM kaum möglich. Oftmals wird daher auf eine Substitutionsmessung ausgewichen, bei welcher neben dem eigentlichen Messobjekt auch ein hinreichend ähnliches und kalibriertes Prüfnormal gemessen wird [140, 141]. Kalibrierte Prüfnormale, welche eine die Ähnlichkeitsbedingung erfüllende Messgröße mit hinreichend geringer Messunsicherheit aufweisen, sind jedoch nicht immer verfügbar. Dass die bei der RCT angegebenen Messunsicherheiten oftmals nicht korrekt sind, zeigte sich in internationalen Vergleichen [142–144]. [131, 145]

2.2.2 Metrologische Lücke

In Bild 2 ist eine Klassifikation bestehender Messsysteme in Anlehnung an [19] ersichtlich, wobei aufgrund der im vorherigen Unterabschnitt erläuterten Unmöglichkeit, das Auflösungsvermögen eines mehrdimensionalen Messsystems als Skalar zu quantifizieren, dieses lediglich qualitativ angegeben ist. Für diese rein qualitative Angabe des Auflösungsvermögens eines mehrdimensionalen Messsystems wird der Begriff „Strukturauflösung“ verwendet. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dieser Begriff in anderen Quellen auch in anderer Weise verwendet wird [146]. Leicht identifizierbar ist die metrologische Lücke hinsichtlich hochauflösender 3D-KMS. Aufgrund ihrer Beschränktheit auf äußerst dünne Messobjekte sind in diesem Bild die im vorherigen Unterabschnitt erwähnten und auf dem Prinzip der Elektronenmikroskopie beruhenden 3D-KMS nicht aufgeführt.

An den Rändern der metrologischen Lücke finden sich die Rastersondenmikroskope, die taktil antastenden 3D-KMS sowie die Röntgen-Computertomografen. Zwar werden letztere auch für die Messung miniaturisierter Bauteile eingesetzt, die erreichbare **Messpräzision** (VIM, 2.15) [147–149] bzw. sofern angegeben die Messunsicherheit [150] liegt allerdings meist bereits im μm -Bereich. Auch bei sogenannten nano-(Röntgen-)Computertomografen ist die Kantenlänge eines Voxels nicht kleiner als mehrere 100 nm [151, 152]. Ein Voxel ist das dreidimensionale Pendant zum zweidimensionalen Pixel und seine Größe somit die untere Grenze des Auflösungsvermögens eines Röntgen-Computertomografen [131]. Weiterhin ist die Rückführung bzw. die Errechnung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit bei der RCT noch Gegenstand der Forschung [153], wengleich hinsichtlich einer automatisierten Errechnung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit durch Simulation Fortschritte erzielt werden konnten [154, 155]. Dennoch ist der Einsatz der RCT für die Nanometrologie, d. h. bei

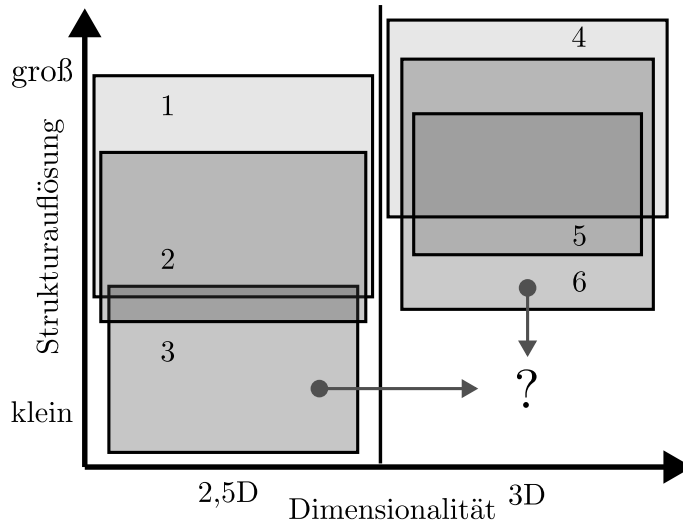


Bild 2: Klassifikation bestehender Koordinatenmesssysteme: 1 optisch antastende 2,5D-KMS; 2 Tastschnittgeräte; 3 Rastersondenmikroskope; 4 optisch antastende 3D-KMS; 5 Röntgen-Computertomografen; 6 taktile antastende 3D-KMS. Die Variation der Breite der Quadrate dient lediglich zu Illustrationszwecken und bedeutet keine weitere Unterteilung der beiden Kategorien der Dimensionalität. Bild modifiziert nach [19].

geforderten Messunsicherheiten von weniger als 100 nm, nach derzeitigem Stand noch nicht absehbar.

Zur teilweisen Schließung der metrologischen Lücke konnten im Wesentlichen zwei Entwicklungen beitragen, welche in Bild 2 als graue Pfeile dargestellt sind: Zum einen die Miniaturisierung der im Makroskaligen bewährten taktile antastenden 3D-Tastsysteme, kurz meist mikrotaktile Tastsysteme genannt [37]. Während dies als *top down approach* bezeichnet wird, ist die zweite Möglichkeit die als *bottom up approach* bezeichnete Anwendung eines Rastersondenmikroskops als Teil eines 3D-KMS [21]. Das verbreitetste Rastersondenmikroskop ist das Rasterkraftmikroskop (*scanning force microscope*, SFM) [156]. Bekannt ist sowohl die Verwendung eines eindimensionalen rasterkraftmikroskopischen Sensors in einem Positioniersystem mit erhöhtem Freiheitsgrad [P3], als auch die Erhöhung der Dimensionalität eines Rasterkraftsensors, wie beispielsweise in [157] gezeigt. Sowohl die Rasterkraftmikroskopie und deren Weiterentwicklungen als auch die mikrotaktile Tastsysteme werden detailliert in Abschnitt 2.4 dargestellt. Um ein 3D-KMS zu bilden, bedürfen beide Sensorarten der Integration in ein geeignetes, mindestens dreidimensionales, im Falle eines eindimensionalen SFM sogar fünfdimensionales, Positioniersystem. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt daher zunächst dargestellt.

2.3 Positioniersysteme der Nanokoordinatenmesstechnik

Als Nanokoordinatenmesstechnik ist im Folgenden die Anwendung eines 3D-KMS in der Nanometrologie zu verstehen. Die hierfür nach den Darstellungen des vorherigen Abschnitts in Frage kommenden Messsysteme sind eine Kombination aus einem mindestens dreidimensionalen Positioniersystem mit einem entsprechenden Sensor. In diesem Abschnitt werden die Positioniersysteme der Nanokoordinatenmesstechnik vorgestellt, wobei zunächst auf die dreidimensionalen Positioniersysteme eingegangen wird, um anschließend die Positioniersysteme mit erhöhtem Freiheitsgrad darzustellen. Letztere erlauben es, auch einen eindimensionalen Sensor als Teil eines 3D-KMS zu betreiben.

Die Positioniersysteme der Nanokoordinatenmesstechnik zeichnen sich im Allgemeinen durch die Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips [27] bzw. des davon von JAMES BRYAN für den mehrdimensionalen Fall abgeleiteten Bryan-Prinzips [158] aus. Als Längenmesssysteme werden aufgrund der geforderten Genauigkeit meist Laserinterferometer eingesetzt, welche in Kombination mit frequenzstabilisierten Lasern die Rückführung der Weglängenmessung ermöglichen. [159]

Nicht beschrieben werden im Folgenden Positioniersysteme, welche aufgrund eines sehr eingeschränkten **Messbereichs** (VIM, 4.7) entlang der z-Achse lediglich zur Messung ebener Messobjekte verwendet werden können, wie beispielsweise [160–162]. Ebenfalls nicht dargestellt werden Positioniersysteme, welche translatorisch eine Positionierung lediglich in zwei Freiheitsgraden erlauben, wie beispielsweise [163, 164].

2.3.1 Dreidimensionale Positioniersysteme

Um die Jahrtausendwende entstanden mit der Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1 [165] und etwas später mit der *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine* [166] Positioniersysteme, welche auf Grundlage einer Spiegelecke, deren Position mittels dreier Interferometer gemessen wird, die hochgenaue Positionierung eines Messobjekts relativ zu einem feststehenden Sensor über einen Bereich von mehreren Millimetern in allen drei Achsen ermöglichen. Das Grundprinzip der NMM-1 ist in Bild 3 dargestellt. Das Messobjekt befindet sich auf einer Zerodurecke mit verspiegelten, orthogonal angeordneten Außenflächen, welche als Messspiegel der drei Interferometer dienen, sodass diese Spiegelecke das Koordinatensystem der NMM-1 definiert. Das Messsystem, bestehend aus den drei Michelson-Interferometern sowie dem Sensor, ist feststehend. Die Relativbewegung zwischen Sensor

und Messobjekt erfolgt über die Bewegung der Spiegelecke inklusive des sich darauf befindlichen Messobjekts. Die drei Messachsen der Interferometer sowie der Antastpunkt des Sensors schneiden sich in einem Punkt. Da somit das Abbe'sche Komparatorprinzip in allen drei Achsen eingehalten wird, wird dieser Punkt als Abbe-Punkt bezeichnet. Zusätzlich wird mittels zweier Autokollimatoren die Drehung der Spiegelecke um die x - und y -Achse erfasst und durch entsprechende Ansteuerung der insgesamt vier z -Antriebe auf null geregelt. [167]

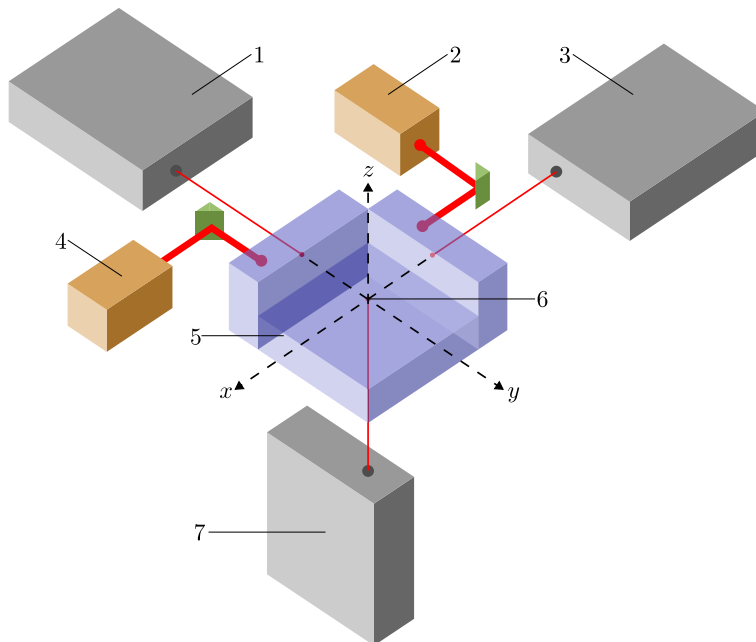


Bild 3: Grundprinzip der NMM-1: 1 y -Interferometer; 2 Autokollimator zur Detektion der Drehung um die y - und z -Achse; 3 x -Interferometer; 4 Autokollimator zur Detektion der Drehung um die x - und z -Achse; 5 Spiegelecke; 6 Abbe-Punkt; 7 z -Interferometer. Bild modifiziert nach [168].

Das Messvolumen der NMM-1 beträgt $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, die Auflösung der Interferometer weniger als $0,1\text{ nm}$. Aufgrund des Aufbaus sind für die Positioniergenauigkeit die Abweichungen der mechanischen Führungen kaum relevant. Demgegenüber wirken sich die Orthogonalitäts- und Ebenheitsabweichungen der Spiegelecke auf die Positioniergenauigkeit aus. Aufgrund der geforderten Genauigkeit sind die Fertigungsabweichungen der Spiegelecke signifikant und werden nach entsprechender messtechnischer Erfassung korrigiert. Weiterhin hat die Unsicherheit der Interferometer (inklusive der Unsicherheit der Brechzahlbestimmung und der Frequenz-

stabilität des Lasers), welche in [168, 169] detailliert behandelt wird, sowie die thermische Ausdehnung des Messkreises, welche allerdings durch die Verwendung ausdehnungsarmer Materialien minimiert wird, einen hohen Einfluss auf die Positioniergenauigkeit der NMM-1. Unter entsprechend kontrollierten Messbedingungen kann die Positionierungsunsicherheit der NMM-1 in allen drei Achsen im gesamten Messvolumen als Standardmessunsicherheit mit unter 7 nm angegeben werden [170, S. 73 ff.]. [28]

Aufgrund ihrer Kompatibilität lassen sich eine Vielzahl unterschiedlichster Sensoren in die NMM-1 integrieren. Eine Übersicht hierzu findet sich beispielsweise in [171] und [28, Kapitel 9 und 10]. Ferner erlaubt die Steuerung die Bewältigung ganz unterschiedlicher Messaufgaben [172]. Die NMM-1 kann somit als ideale Plattform zur Untersuchung der metrologischen Eigenschaften von Sensoren angesehen werden und wird in dieser Funktion auch im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. Die hierfür verwendete NMM-1 befindet sich im Messraum des Messzentrums des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik, welcher als Messraum der Güteklasse A nach der VDI/VDE 2627 Blatt 1 [173] die Durchführung von Messungen bei einer Temperatur von 20,0 °C mit einer maximalen Abweichung von 0,2 K erlaubt. Durch den Einsatz einer speziellen Temperierhaube mit einer Temperaturstabilität von 17 mK über einen Zeitraum von 24 h lässt sich der Einfluss von Temperaturdriften auf das Messergebnis nochmals erheblich reduzieren [P4]. Eine detaillierte Darstellung der Mess- und Umgebungsbedingungen findet sich in [174, S. 32 f.].

Eine Übersicht weiterer Positioniersysteme der Nanokoordinatenmesstechnik ist beispielsweise in [28, S. 6 ff. und S. 19 ff.] zu finden. Als jüngere Entwicklungen sind die auf der NMM-1 aufbauende NPMM-200 mit einem wesentlich vergrößerten Messvolumen von 200 mm × 200 mm × 25 mm [29], eine unter Beteiligung mehrerer in Ilmenau ansässiger Institutionen entstandene Positioniereinheit mit einem zylindrischen Messvolumen von 100 mm Durchmesser und 10 mm Höhe [175] sowie ein System der *Hefei University of Technology* mit einem Messvolumen von 50 mm × 50 mm × 50 mm [176] zu nennen.

2.3.2 Positioniersysteme mit erhöhtem Freiheitsgrad

Vom Eidgenössischen Institut für Metrologie METAS wurde ein fünfsichtiges Positioniersystem vorgestellt, bei welchem die zwei zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgrade durch zwei seriell angeordnete Rotationsachsen zur Positionierung des Messobjekts erreicht werden [177]. Diese Objektrotation verringert jedoch das nutzbare Messvolumen und kann außerdem aufgrund der sich ändernden Lage des Messobjekts zur lagerungsabhängigen Verformungen desselben führen [178, S. 22].

Am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik wurde in die NMM-1 eine Rotationskinematik zur Sensorrotation bestehend aus zwei gestapelten Rotationsachsen integriert. In Bild 4 ist diese schematisch dargestellt. Die erste Rotationsachse (2), eine ANT95R-180 der Firma Aerotech, Vereinigte Staaten von Amerika, mit einem Bewegungsbereich von 180° ist fluchtend zur z-Achse der NMM-1 angeordnet. Die zweite Rotationsachse (3), eine SR-2812 der Firma SmarAct, Deutschland, mit einem Bewegungsbereich von 360° , ist über ein Winkelstück (4) unter einem Winkel von 45° zur ersten Rotationsachse montiert. Aufgrund der Größe der Rotationskinematik ist zu deren Integration in die NMM-1 die Vergrößerung des aus Zerodur bestehenden metrologischen Rahmens derselben (1) durch Abstandsstücke aus Invar (3) notwendig. Das Messobjekt (8), welches, wenn nötig, auf einem Distanzstück platziert wird, befindet sich auf der Spiegelecke (9) und wird mit dieser bewegt, wobei die Bewegung mittels der Interferometer der NMM-1 erfasst wird. Im Bild zu sehen ist das Interferometer der y-Achse (7) sowie der z-Achse (10). Um eine Kollision der Rotationskinematik und der Spiegelecke zu vermeiden, muss der Sensor in etwa 5 mm über dem Abbe-Punkt positioniert werden. Aufgrund der bereits im vorherigen Abschnitt dargestellten Winkelregelung der Spiegelecke um die x- und y-Achse werden die sich daraus ergebenden Abweichungen erster Ordnung jedoch reduziert. [179]

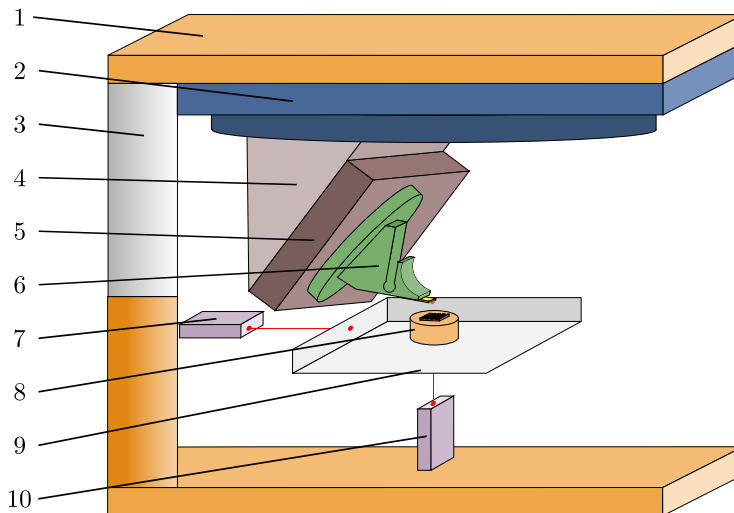


Bild 4: In die NMM-1 integrierte Rotationskinematik: 1 Zerodur-Rahmen der NMM-1; 2 erste Rotationsachse; 3 Invar-Abstandsstücke; 4 Winkelstück; 5 zweite Rotationsachse; 6 Sensor; 7 y-Interferometer; 8 Messobjekt auf Distanzstück; 9 Spiegelecke; 10 z-Interferometer. Bild modifiziert nach [P5].

In diese Rotationskinematik wurden schon unterschiedliche Sensoren (6) integriert, etwa ein feststehender Tunnelstromsensor [180], ein faseroptischer Sensor [181], ein oszillierender Tunnelstromsensor [182] sowie das auch in Bild 4 dargestellte SFM [P3, 183]. Die Rotationskinematik erlaubt die Einstellung der Antastrichtung des Sensors auf einer kompletten Hemisphäre, wobei hieraus bei idealer Justage der Rotationsachsen und des Sensors keine translatorische Verschiebung des Antastpunkts resultiert. In der Praxis ist eine exakte Positionierung des Antastpunkts im Schnittpunkt der beiden Rotationsachsen jedoch nicht möglich. Weiterhin weisen Rotationsachsen Abweichungen wie etwa Taumeln oder Plan- bzw. Rundlauf auf. Daher ist mit einer Variation der Antastrichtung auch eine translatorische Verschiebung des Antastpunkts verbunden. Diese Verschiebung lässt sich prinzipiell zwar durch Referenzieren an einem aus allen Rotationswinkeln messbaren Objekt, etwa einer auf der Spiegelecke platzierten Kugel, korrigieren. Die Formabweichungen dieses Referenzobjekts begrenzen jedoch die Genauigkeit der Korrektur [180]. [179]

Wie in Unterabschnitt 2.3.1 dargestellt, wird in der NMM-1 der Einfluss der Abweichungen der Kinematik auf das Messergebnis nahezu ausgeschlossen, indem ein interferometrisches Referenzmesssystem zur Positionserfassung genutzt wird. In einer von der TU Ilmenau in die NMM-1 integrierten Rotationskinematik wurde dieses Vorgehen auch auf die Rotationskinematik selbst ausgeweitet. Die Rotationskinematik erlaubt die Einstellung der Antastrichtung eines Sensors bis zu einem Winkel von 60° gegenüber der z-Achse der NMM-1 und eine volle Drehung um eben diese. Der etwas eingeschränkte Einstellbereich gegenüber der z-Achse ermöglicht jedoch die Positionierung des Antastsensors bzw. von dessen Antastpunkt im Abbe-Punkt. Gleichzeitig sind mit dem Antastsensor drei kartesisch angeordnete Abstandssensoren starr verbunden, welche in Verbindung mit einer zum Abbe-Punkt konzentrisch angeordneten Referenzhemisphäre mit einem Durchmesser von 400 mm das Referenzmesssystem bilden. Indem die Abstandssensoren kontinuierlich den Abstand zu eben dieser feststehenden Referenzhemisphäre messen, lassen sich durch die Kinematik verursachte translatorische Verschiebungen des Antastsensors detektieren. Somit wird der Einfluss der Abweichungen der Rotationskinematik auf das Messergebnis nahezu ausgeschlossen. Demgegenüber haben Abweichungen des Referenzmesssystems, das heißt insbesondere Formabweichungen der Referenzhemisphäre, einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis und müssen entsprechend korrigiert werden. Bei der NMM-1 existieren Verfahren, die Abweichungen der Spiegelecke sowohl im eingebauten als auch im nicht eingebauten Zustand zu erfassen, wobei die durch den Einbau selbst verursachten Formabweichungen relativ gering sind [170]. Im Gegensatz dazu führen aufgrund ihrer Größe bei

der Referenzhemisphäre Änderungen der Lagerung bereits zu Formabweichungen im Mikrometerbereich, sodass die Messung der Formabweichungen der Referenzhemisphäre im nicht eingebauten Zustand unter Nachbildung der Lagerung im Einbauzustand mit einem hohen Aufwand verbunden wäre. Als Alternative wurde ein Verfahren gezeigt, die Formabweichungen der Referenzhemisphäre unter Verwendung der drei Interferometer der NMM-1 im eingebauten Zustand zu messen. Hierzu wird zunächst der Antastsensor durch einen Retroreflektor ersetzt und die Spiegelecke der NMM-1 ausgebaut. Somit lässt sich die Position des Retroreflektors direkt durch die Interferometer der NMM-1 messen. Aus der Differenz zwischen der durch die Abstandssensoren des Referenzmesssystems errechneten translatorischen Verschiebung des Antastpunkts bei einer Rotation und der mittels der Interferometer der NMM-1 gemessenen tatsächlichen Verschiebung lassen sich die Abweichungen der Referenzhemisphäre von der idealen Kugelform errechnen. Als Abstandssensoren des Referenzmesssystems werden kommerzielle Fabry-Pérot-Interferometer [184] eingesetzt. Als Fabry-Pérot-Interferometer werden auf CHARLES FABRY und ALFRED PÉROT zurückgehende optische Anordnungen bezeichnet, bei denen mittels teildurchlässiger Spiegel ein optischer Resonator erzeugt wird [185, S. 836 ff.]. Das Verfahren zur Bestimmung der Formabweichungen der Referenzhemisphäre im eingebauten Zustand erwies sich als in der Praxis nicht vollumfänglich durchführbar, da die relativ hohen Formabweichungen der Referenzhemisphäre zu Signalabbrüchen bei den Abstandssensoren führten. Da die verwendeten Abstandssensoren prinzipbedingt lediglich relative Längenänderungen erfassen, führt dies zu sogenannten Zählfehlern. Die Verwendung einer Referenzhemisphäre mit geringeren Fertigungsabweichungen würde dieses Problem jedoch beheben. Gänzlich unberücksichtigt blieben aber die Formabweichungen des Kugelreflektors, gleichwohl diese die Genauigkeit der Kalibrierung der Referenzhemisphäre entsprechend reduzieren. [178]

2.4 Ausgewählte Sensoren der Nanometrologie

Neben den im vorherigen Abschnitt dargestellten Positioniersystemen hängt die Durchführbarkeit einer Messung sowie die erreichbare Strukturauflösung und Messunsicherheit in der Koordinatenmesstechnik auch von den metrologischen Eigenschaften des Sensors ab. Hinsichtlich der Sensoren existiert die in Unterabschnitt 2.2.2 dargestellte metrologische Lücke, die es zu schließen gilt, um nanometrologische Messungen auch an komplexen Geometrien mit hohen Aspektverhältnissen bei stark variierenden Oberflächennormalen durchführen zu können. Auf der einen Seite dieser Lücke stehen die Rastersondenmikroskope, welche auf das Rastertunnelmikroskop (*scanning tunneling microscope*, STM) [186] zurückgehen, für dessen

Erfindung GERD BINNIG und HEINRICH ROHRER 1986 mit dem Nobelpreis gewürdigt wurden [187]. Die Grundzüge eines STM wurden bereits 1972 von RUSSELL YOUNG, JOHN WARD und FREDERIC SCIRE vorgestellt [188]. Der heute am weitesten verbreitete Vertreter der Rastersondenmikroskope ist das SFM, welches insbesondere auch die Messung nicht leitfähiger Proben ermöglicht [189]. Auch in der Nanometrologie werden bei Weitem am häufigsten SFMs eingesetzt [190], der Einsatz von STMs [180, 182, 191, 192] bildet die Ausnahme. Gemein ist dem STM und dem SFM die ganz hervorragende und bis in den Pikometerbereich reichende axiale und laterale Auflösung, wobei im Allgemeinen jedoch lediglich flache Objekte gemessen werden können [193]. Im nachfolgenden Unterabschnitt 2.4.1 werden die Grundlagen der SFMs, deren Anwendung in der Nanometrologie und Ansätze zur Erweiterung der Einsatzgrenzen zum Messen von Objekten mit variierender Oberflächennormale sowie an hohen Aspektverhältnissen dargestellt. Auf der anderen Seite der metrologischen Lücke stehen die mikrotaktilen Tastsysteme. Diese ermöglichen bei Verwendung kugelförmiger Tastelemente und der Erfassung des Antastkraftvektors in allen drei Freiheitsgraden eine dreidimensionale Antastung [110]. Die zum Erreichen der Strukturauflösung notwendige Miniaturisierung des Tastelements bedingt allerdings eine überproportionale Reduktion der Antastkraft, um eine unzulässig hohe Flächenpressung zu vermeiden [21]. Der Stand der Technik bei den mikrotaktilen Tastsystemen wird in Unterabschnitt 2.4.2 dargestellt.

Das Messprinzip beider Sensoren beruht auf der abstandsabhängigen Kraftwechselwirkung zwischen Tastelement und Messobjekt. Die Kraft F zwischen zwei Objekten lässt sich hinsichtlich ihrer Reichweite in absteigender Sortierung in die vier Kategorien Gravitationskraft, elektromagnetische Kraft, schwache Kernkraft sowie starke Kernkraft einteilen [194, S. 10]. Als Messprinzip für die dimensionelle Metrologie eignen sich lediglich Kräfte, die eine starke Abstandsabhängigkeit zeigen. Denn nur bei diesen hängt die auf das Tastelement einwirkende Kraft lediglich von je nach Tastelement einem oder mehreren Atomen der lokalen Messobjektoberfläche und folglich vom Abstand des Tastelements zu eben diesen ab. Weiter entfernte Atome beeinflussen das Tastelement praktisch nicht, was für die Auflösung sowohl in Richtung der Antastung als auch senkrecht dazu entscheidend ist. [195]

F kann sowohl abstoßend als auch anziehend sein. Nach GUSTAV MIE lässt sich das Potential und davon abgeleitet F zwischen zwei Körpern von geringem Abstand als Summe einer anziehenden sowie einer abstoßenden Kraft,

welche jeweils stark abstandsabhängig ist, darstellen [196]. Ein Spezialfall des Mie-Potentials ist das nach JOHN LENNARD-JONES benannte Potential

$$w_{LJ}(d) = -\frac{O}{d^6} + \frac{V}{d^{12}} \quad (4)$$

mit den beiden stoffspezifischen Konstanten O und V . In Bild 5 ist das Lennard-Jones-Potential und die davon abgeleitete Kraft $F = -\partial w_{LJ}/\partial d$ in Abhängigkeit des Abstands d dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich wird, überwiegen bei einem geringen Abstand die abstoßenden Kräfte (repulsives Kraftregime), während bei einem größeren Abstand die anziehenden Kräfte überwiegen (attraktives Kraftregime). Der Ursprung dieser Kräfte kann mannigfaltig sein. Eine Übersicht hierzu findet sich beispielsweise in [189, S. 37-54] und [195, S. 54-60]. [197]

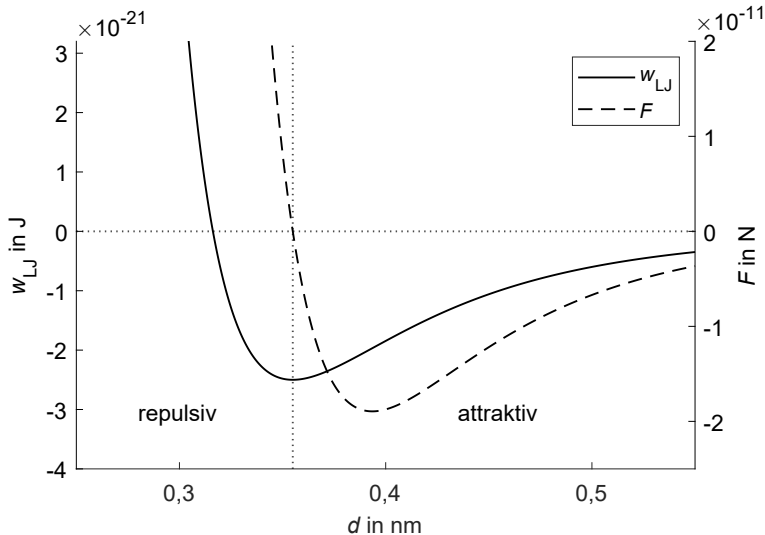


Bild 5: Lennard-Jones-Potential w_{LJ} und davon abgeleitet die Kraft $F = -\partial w_{LJ}/\partial d$ in Abhängigkeit des Abstands d für $O = 1 \cdot 10^{-77} \text{ J m}^6$ und $V = 1 \cdot 10^{-134} \text{ J m}^{12}$. Bei einem geringen Abstand überwiegen die abstoßenden Kräfte (repulsives Kraftregime), bei einem größeren Abstand die anziehenden Kräfte (attraktives Kraftregime). Bild modifiziert nach [197].

2.4.1 Rasterkraftmikroskope

Das Grundprinzip eines SFM ist in Bild 6 dargestellt. Eine an einem Biegebalcken, dem sogenannten Cantilever, angebrachte feine Spitze (Spitzenradien bis zu wenigen Nanometern sind möglich) wird über die Oberfläche eines Messobjekts geführt und erfährt durch diese eine Kraft, welche eine Bie-

gung des Cantilevers verursacht. Diese Biegung wird mittels entsprechender Sensorik detektiert. Am weitesten verbreitet ist die Detektion der Biegung mittels optischer Strahlumlenkung, bei welcher die Rückseite des Cantilevers verspiegelt ist und einen Lichtstrahl auf eine Quadrantendiode umlenkt. Die Biegung und Torsion des Cantilevers verursacht eine durch die Quadrantendiode detektierbare Verschiebung der Position des ankommenden Lichtstrahls. Weiterhin bekannt ist die Biegungsdetektion mittels interferometrischer und kapazitiver Verfahren sowie mittels STM. Auch die Kombination mehrerer Verfahren der Auslenkungsmessung wurde gezeigt [198, 199]. Ein Nachteil dieser Verfahren, insbesondere der optischen Strahlumlenkung, ist der erhebliche Justageaufwand. Eine Alternative hierzu sind selbstsensierende Cantilever, bei welchen beispielsweise piezoresistive Sensoren direkt auf dem Cantilever appliziert sind und sich so die Biegung des Cantilevers als elektrisches Signal abgreifen lässt [200]. Selbstsensierende Cantilever erreichen ein mit der optischen Strahlumlenkung vergleichbares Signal-Rausch-Verhältnis [201]. [195]

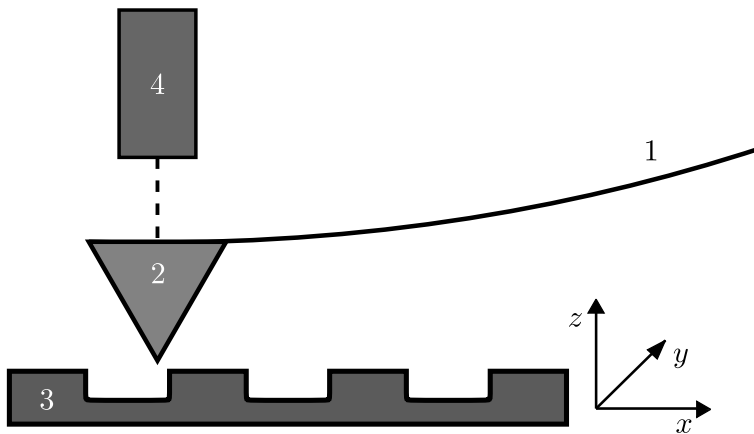


Bild 6: Grundprinzip eines SFM: 1 Cantilever; 2 Spitze; 3 Messobjekt; 4 Biegungsdetektion. Bild modifiziert nach [190].

Zunächst wurden SFMs lediglich im sogenannten Kontakt-Modus in Analogie zu miniaturisierten Tastschnittgeräten im repulsiven Tastregime betrieben. Während der Cantilever über die Messobjektoberfläche geführt wird, wird dessen Auslenkung und damit die Kraft zwischen Spitze und Messobjektoberfläche durch entsprechende Regelung des Abstands zwischen Spitze und Messobjektoberfläche konstant gehalten. Der zur flächenhaften Aufnahme einer Messobjektoberfläche notwendigen Abrasterung derselben verdankt das SFM im Deutschen seinen Namen. Im Kontakt-Modus dringt die Spitze aufgrund elastischer oder plastischer Verformung der Messobjektoberfläche

ein wenig in diese ein, sodass mehrere Atome der Messobjektoberfläche einen signifikanten Beitrag zur auf die Spitze wirkenden Kraft leisten. Entsprechend ist in diesem Modus die Bestimmung des Atomgitters als durchschnittlicher Abstand der Atome zwar möglich [202, 203], die Detektion einzelner Fehlstellen, d. h. das Erreichen echt atomarer Auflösung, im Allgemeinen jedoch nicht. Eine Ausnahme bilden Messungen in einer Flüssigkeit [204]. [195]

Im Gegensatz zum statischen Kontakt-Modus wird der Cantilever in dynamischen Messmodi zumeist mittels eines Piezoaktors oder aber selbstaktierend mittels auf dem Cantilever applizierter Heizelemente [205] in der Nähe seiner mechanischen Eigenfrequenz zur Schwingung angeregt [195]. Eine ausführliche Beschreibung der dynamischen Messmodi, welche oftmals gänzlich kontaktlos nur im attraktiven Kraftregime operieren [206], ist in [207] zu finden. Im kontaktlosen Modus sind Messungen mit echt atomarer Auflösung, wenngleich lediglich im Ultrahochvakuum, möglich [208].

Im intermittierenden Messmodus wird der Cantilever ebenfalls zu einer Schwingung mit einer Amplitude von ca. 20 nm bis 100 nm angeregt. Im Gegensatz zum kontaktlosen Modus berührt der Cantilever jedoch bei jeder Oszillation das Messobjekt. Der intermittierende Messmodus stellt keine extremen Anforderungen an die Messumgebung, reduziert im Vergleich zum Kontakt-Modus jedoch insbesondere die wirkenden Querkräfte. Dies kann hauptsächlich bei weichen Messobjekten zu einer signifikanten Verbesserung des Auflösungsvermögens beitragen [209]. [210]

SFMs finden Anwendung in vielen unterschiedlichen Bereichen, etwa der Physik, der Chemie sowie der Biologie [189]. Je nach Anwendungsbereich unterscheiden sich die Anforderungen an das SFM, beispielsweise hinsichtlich der Auflösung, des Messbereichs, der Messgeschwindigkeit oder der Umgebungsbedingungen. Im Bereich der dimensionellen Metrologie sind vor allen Dingen die Reproduzierbarkeit und die Rückführbarkeit der gewonnenen Messergebnisse sowie ein adäquater Messbereich von zentraler Bedeutung [190]. Die weit verbreitete Kombination aus SFM und piezoelektrischem Röhrenscanner erfüllt diese Anforderungen zumeist nur unzureichend [211]. Demgegenüber sind die sogenannten metrologischen SFMs, welche eine Kombination aus rasterkraftmikroskopischem Sensor und den bereits in Unterabschnitt 2.3.1 dargestellten Positioniersystemen sind, speziell auf diese Anforderungen angepasst [212, 213]. Metrologische SFMs dienen insbesondere in nationalen Metrologieinstituten als Grundlage von **Referenzmessverfahren** (VIM, 2.7) der Oberflächenmesstechnik mit Unsicherheiten im unteren Nanometerbereich und darunter [214]. Je nach geforderter Genauigkeit und Messaufgabe müssen die aufgrund der Geometrie der Spitze des Cantilevers verursachten Messabweichungen (vgl. Unterabschnitt 2.2.1) korrigiert wer-

den [102, 215–218]. Eine Übersicht hierzu angewandter Verfahren ist in [219] zu finden.

Zunächst war die Halbleiterindustrie und wenig später allgemein der Trend zur Miniaturisierung Impulsgeber zur Erhöhung der Dimensionalität von SFMs, um diese zur Messung vertikaler Merkmale oder gar Hinterschneidungen einzusetzen [220]. Im Bereich der Halbleiterindustrie werden entsprechende Merkmale, wie etwa der Flankenwinkel, die Flankenrauheit sowie die Linienbreite, zusammenfassend als *critical dimensions* bezeichnet [221]. Eine Übersicht über die rasterkraftmikroskopische Messung von *critical dimensions* in der Halbleiterindustrie ist in [221], eine über die Metrologie in der Halbleiterindustrie im Allgemeinen in [222] zu finden. Als ein Weg der Realisierung von auf dem Prinzip der Rasterkraftmikroskopie beruhenden 3D-KMS wurden modifizierte Cantilever vorgestellt, wie diese exemplarisch in Bild 7 dargestellt sind. Die Verwendung abgeflachter Spitzen (1) ist in der Halbleiterindustrie weit verbreitet [157, 221]. Durch entsprechende Anpassung des Cantilevers konnte auch eine wesentliche Reduktion der Anisotropie der Steifigkeit desselben erreicht werden [223]. Die aufgrund der Aufnahme von Messpunkten an der gesamten Umfangslinie der Spitze notwendige Charakterisierung derselben ist jedoch sehr aufwändig [224, 225]. Weiterhin ist die Zugänglichkeit von Merkmalen an Ecken sowie die Strukturauflösung an flachen Stellen des Messobjekts aufgrund der Spitzengeometrie begrenzt [221]. Eine mögliche Alternative zur Messung bidirektionaler Längenmaße ist ein aus zwei translatorisch beweglichen, entgegengesetzt verkippten Cantilevern bestehender rasterkraftmikroskopischer Messschieber [226]. Die anderen in Bild 7 ersichtlichen Cantilever sind der Messung miniaturisierter Bauteile zuzuordnen. Im Gegensatz zum an den Cantilever angebrachten weiteren Cantilever (2) [227], ist bei der angebrachten Tastkugel (3) die Antastrichtung frei wählbar [228]. Aufgrund der lediglich zweidimensionalen Detektion der Biegung und der Torsion des Cantilevers ist aus diesem Signal die eindeutige Bestimmung der dreidimensionalen Antastrichtung jedoch nicht möglich. Für den Spezialfall der Messung an hohen Aspektverhältnissen, etwa in Bohrlochern, ist die Verwendung besonders langer vertikal [229, 230] oder auch horizontal [231] aufgehängter Cantilever (4) bekannt.

Ein alternativer Weg zur Realisierung von auf dem Prinzip der Rasterkraftmikroskopie beruhenden 3D-KMS ist die Verwendung standardmäßiger Cantilever mit einstellbarer Antastrichtung zwischen Sensor und Messobjekt. Die eindimensionale Einstellung der Antastrichtung wurde mittels Rotation des Messobjekts [232–235] oder mittels Rotation des Cantilevers [236–240] gezeigt. Wie bereits in Unterabschnitt 2.3.2 dargestellt, wurde in die in Bild 4 ersichtliche Rotationskinematik auch ein SFM integriert [P3, 183], dessen Antastrichtung sich entsprechend auf eine komplette Hemisphäre

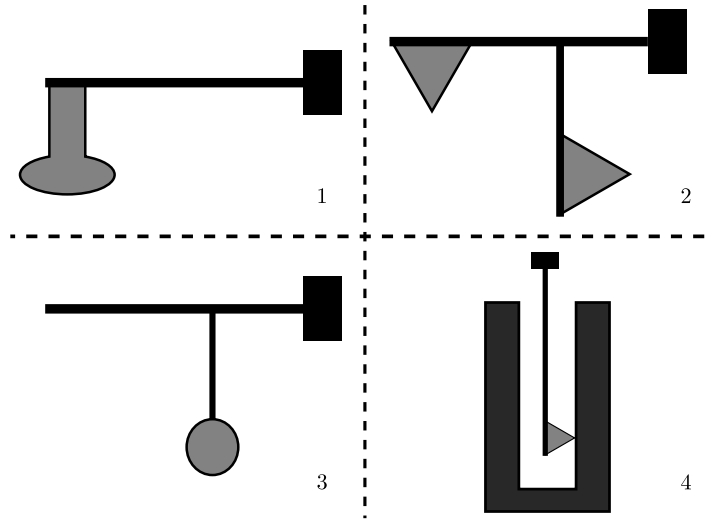


Bild 7: SFMs mit modifiziertem Cantilever: 1 Cantilever mit abgeflachter Spitze; 2 Cantilever mit angeklebtem Cantilever; 3 Cantilever mit angebrachter Antastkugel; 4 Langer Cantilever für Messungen an hohen Aspektverhältnissen. Bild jeweils modifiziert nach 1: [157]; 2: [227]; 3: [228]; 4: [229].

orthogonal einstellen lässt. Der Sensorhalter dieses SFMs mit einstellbarer Antastrichtung ist in Bild 8 dargestellt. Der Sockel eines kommerziellen, selbstsensierenden Cantilevers (4) ist auf den Sensorhalter, welcher wiederum mit der Rotationskinematik (1) verbunden ist, geklebt. Eine Piezoaktor (2) ermöglicht über ein Festkörpergelenk (3) die Schwingungsanregung des Cantilevers, um das SFM im intermittierenden Messmodus zu betreiben.

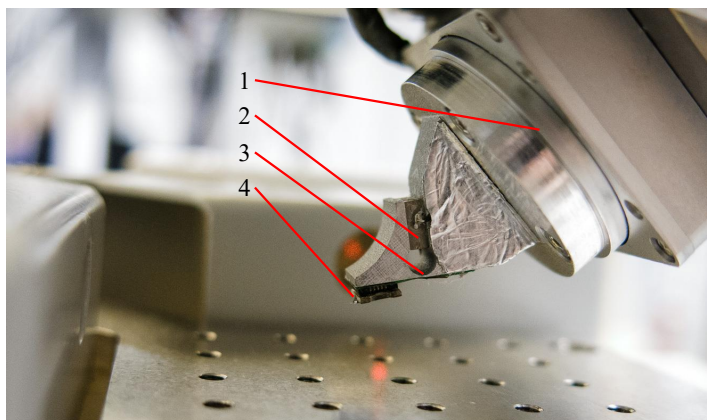


Bild 8: Sensorhalter des SFMs mit einstellbarer Antastrichtung: 1 Rotationskinematik; 2 Piezoaktor; 3 Festkörpergelenk; 4 selbstsensierender Cantilever. [P3]

Zusammenfassend sind die dargestellten SFMs nicht in der Lage, die an sie von modernen miniaturisierten Bauteilen gestellten Anforderungen vollumfänglich zu erfüllen. Die Messsysteme bieten entweder die Möglichkeit, Merkmale an hohen Aspektverhältnissen oder aber Messobjekte mit sich ändernder Oberflächennormale zu messen. Bisher wurde jedoch kein rasterkraftmikroskopisches Messsystem gezeigt, welches beide Fähigkeiten vereint.

2.4.2 Mikrotaktile Tastsysteme

Taktile antastende 3D-KMS erlauben eine bis heute einzigartige Kombination aus Universalität und Flexibilität hinsichtlich der Bewältigung geometrischer Messaufgaben sowie einer relativen Genauigkeit und Rückführbarkeit der erzielten Messergebnisse [40]. Durch die Miniaturisierung taktile Antastsysteme, d. h. der Entwicklung sogenannter mikrotaktile Tastsysteme, und Integration derselben in hochgenaue Positioniersysteme, wie sie beispielsweise in Unterabschnitt 2.3.1 dargestellt wurden, wurde versucht, in der Nanometrologie anwendbare taktile antastende 3D-KMS zu realisieren [21]. Die Kombination aus nanometrologischem Positioniersystem und mikrotaktilem Tastsystem wird im Folgenden als mikrotaktile antastendes 3D-KMS (μ -3D-KMS) bezeichnet. Zum Erreichen der geforderten Strukturauflösung liegt der Tastkugeldurchmesser eines μ -3D-KMS meist unter $300\ \mu\text{m}$ [241]. Um dennoch eine unzulässig hohe Flächenpressung und damit einhergehend eine plastische Verformung der Messobjektoberfläche zu vermeiden, ist eine überproportionale Reduktion der Antastkraft notwendig [242]. Die Antastkraft mikrotaktile Tastsysteme liegt zumeist unter $100\ \mu\text{N}$ [243, S. 60]. Beim Antastvorgang können aufgrund des Abbremsens der bewegten Tastermasse sowie der über den eigentlichen Berührungspunkt hinausgehenden und zum Stoppen der Bewegung des Positioniersystems notwendigen Strecke jedoch schnell auch höhere Kräfte entstehen, weshalb zum Erreichen einer hinreichenden Antastgeschwindigkeit auch die Reduktion der bewegten Tastermasse sowie der Steifigkeit des mikrotaktile Tastsystems notwendig ist [244].

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden spezielle mikrotaktile Tastsysteme entwickelt, welche den gegebenen Einschränkungen mit hochsensiblen integrierten 3D-Kraftsensoren und einem filigranen Aufbau mit geringer bewegter Masse begegnen. Die geläufigste Variante ist hierbei, die auf die Tastkugel wirkende Kraft über den Tasterschaft auf eine geeignete Vorrichtung zu führen, welche drei der sechs Freiheitsgrade der Tastkugel sperrt und bei minimaler Steifigkeit die Detektion der Bewegung der Tastkugel in den anderen drei Freiheitsgraden erlaubt. Hierzu kommen piezoresistive [245–248], kapazitive [249], induktive [35] und optische [250–

253] Sensoren zum Einsatz. Aufgrund des reduzierten Tastkugeldurchmessers ist auch eine Reduktion des Durchmessers des Tasterschafts notwendig, was die Steifigkeit desselben senkt und somit die aus der Durchbiegung des Tasterschafts resultierenden Messabweichungen erhöht. Alternative Konzepte nutzen daher nicht die Kraftübertragung über einen Schaft, sondern es wird die Tastkugelauslenkung direkt oder am Schaft mit einem Kamerasystem beobachtet, sodass die Durchbiegung des Tasterschafts zu keinen oder zumindest wesentlich geringeren Messabweichungen führt. Dies ermöglicht zugleich die Verwendung eines noch dünneren Tasterschafts mit verringerter Steifigkeit und somit einer im Vergleich zu den anderen Systemen nochmals verringerten Antastkraft [254–257]. [258]

Eine Übersicht mikrotaktile Tastsysteme ist beispielsweise in [258] und [243, S. 25–61] zu finden. Die Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 12.1 [241] beschreibt Verfahren zur Verifikation eines mikrotaktile Tastsystems bzw. eines μ -3D-KMS. Eine ausführliche Beschreibung unter anderem der Verifikation eines μ -3D-KMS ist außerdem in [259, 260] zu finden. Wichtige Aspekte der mikrotaktile Antastung werden in [244] aufbereitet. Eine Übersicht unterschiedlicher Antastprinzipien der dreidimensionalen Nanometrologie ist in [261] zu finden. Allgemein wird der Stand der Technik mikrotaktile Tastsysteme in [37] zusammengefasst. Die folgenden wesentlichen Probleme der mikrotaktile Tastsysteme lassen sich identifizieren:

Während bei klassischen taktile antastenden Sensorsystemen die anziehenden Kräfte vernachlässigt werden können, führen sie bei mikrotaktile Tastsystemen aufgrund der wesentlich geringeren Antastkraft und Steifigkeit derselben zu störenden Effekten wie Adhäsion, *Snap-in*, *Snap-out*, *Stick-Slip*, erhöhter Belastung in der Kontaktzone sowie erhöhter Reibung [244, 262]. Dies wirkt sich letztlich auch negativ auf die erreichbare **Wiederholpräzision** (VIM, 2.21) aus [261]. Die genannten Effekte lassen sich zwar durch Schwingungsanregung der Tastkugel, ähnlich einigen dynamischen Messmodi bei SFMs, reduzieren [243, 263–266], allerdings wirkt sich dies negativ auf die erreichbare Strukturauflösung aus. Ein weiteres Problem sind die im Vergleich zur Gesamtunsicherheit des μ -3D-KMS nicht zu vernachlässigenden Formabweichungen der Tastkugel [241]. Aufgrund der oftmals im unteren einstelligen Nanometerbereich liegenden Messpräzision der μ -3D-KMS sind es gerade diese systematischen Messabweichungen, welche die erreichbare Messunsicherheit nach unten hin begrenzen [37]. Dieser signifikante Einfluss der Formabweichungen der Tastkugel auf die erreichbare Gesamtunsicherheit konnte auch in einer empirischen Untersuchung des Metrologieinstituts aus Singapur nachgewiesen werden [267]. Auch bei einer von der PTB durchgeführten Kalibrierung der Radien unterschiedlicher Kugeln resultierte aus

den Formabweichungen der Tastkugel der hauptsächliche Unsicherheitsbeitrag [268]. [258]

Zusammenfassend sind auch die mikrotaktilen Tastsysteme damit noch nicht in der Lage, die an sie gestellten Anforderungen hinsichtlich der Messunsicherheit zu erfüllen. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer Flexibilität jedoch am ehesten dazu geeignet, in Kombination mit einem entsprechenden Positioniersystem als universelles μ -3D-KMS im Bereich der Nanometrologie eingesetzt zu werden, sofern sich die erreichbare Messunsicherheit noch signifikant reduzieren lässt. Hinsichtlich dieser spielen zufällige Messabweichungen eine untergeordnete Rolle. Stattdessen ergibt sich nach derzeitigem Stand ein wesentlicher Unsicherheitsbeitrag aus den Formabweichungen der Tastkugel. Weiterhin wirken die anziehenden Kräfte störend im Messablauf. Der Analyse dieser Problemfelder wird aufgrund des hierfür notwendigen Umfangs der nächste, eigenständige Abschnitt gewidmet.

2.5 Problemfelder der mikrotaktilen Antastung

Die beiden im vorherigen Abschnitt identifizierten Hauptproblemfelder der mikrotaktilen Antastung, die Formabweichungen der Tastkugel sowie die anziehenden Kräfte, werden in diesem Abschnitt eingehend analysiert. Insbesondere in Unterabschnitt 2.5.2, in welchem die anziehenden Kräfte dargestellt werden, wird in einigen Quellen der Begriff „Rauheit“ verwendet. Dieser Begriff ist im Bereich der Nanometrologie problematisch, denn eine normgerechte Auswertung der Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit, und somit auch der Rauheit, ist aufgrund der nach DIN EN ISO 4288 [269] geforderten Länge der Messstrecke, welche bei mikrodimensionalen Bauteilen bzw. aufgrund des Messvolumens üblicher Messsysteme der Nanometrologie oftmals nicht zur Verfügung steht, in vielen Fällen nicht möglich. Im Bereich der Nanometrologie wird daher in vielen Quellen stattdessen der Begriff Mikro-Rauheit verwendet [270]. Im Folgenden wird die Oberflächenbeschaffenheit allgemein gehalten als Feingestalt bezeichnet. Von dieser unterschieden wird die Grobgestalt, wobei unter diesem Begriff das Maß bzw. die Maße des zugeordneten, idealen Geometrieelements sowie die bis auf die Feingestalt verbleibenden Abweichungen des realen Bauteils von dieser Idealgeometrie subsumiert werden. Für diese, von der Idealgeometrie verbleibenden Abweichungen, wird auch der Begriff Formabweichung verwendet. Somit bilden die Grob- und Feingestalt in Summe das erfasste Bauteil.

2.5.1 Grobgestalt der Tastkugel

Bei taktil antastenden 3D-KMS muss der angezeigte Messpunkt aufgrund der finiten Größe des Tastelements mittels des Tastelement-Korrekturvektors korrigiert werden [111]. Zur Bestimmung der Richtung dieses Vektors gibt es unterschiedliche Ansätze, welche beispielsweise in [271] zusammengefasst sind. Der Betrag des Vektors ist die Hälfte des sogenannten wirksamen Durchmessers des Tastelements, im Falle einer Kugel als Tastelement auch wirksamer Tastkugeldurchmesser genannt. Dieser ist stets kleiner als der tatsächliche Tastkugeldurchmesser und wird meist empirisch mittels Einmessen an einer hinsichtlich Größenmaß und Form kalibrierten Prüfkugel ermittelt, wobei die Formabweichung derselben bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf [272]. Die Abweichung des tatsächlichen zum wirksamen Tastkugeldurchmesser resultiert hauptsächlich aus der elastischen Biegung des Tasterschafts w_s , welche sich bei einem zylindrischen Tasterschaft und Antastung senkrecht zu diesem nach

$$w_s = \frac{64 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^4} \quad (5)$$

aus der Kraft der Antastung F , der Länge des Tasters l , dessen Durchmesser d und dem E-Modul des Tastermaterials E errechnet. Das aufgrund der Anisotropie der Steifigkeit des Tasterschafts von der Antastrichtung abhängige Ausmaß der Deformation desselben wird von manchen Messsystemen in Form eines antastrichtungsabhängigen effektiven Tastkugeldurchmessers bzw. eines Versatzes des Mittelpunkts der effektiven Tastkugel zur tatsächlichen Tastkugel in Schafrichtung berücksichtigt. [110, 112]

Bei mikrotaktilen Tastsystemen ergibt sich die Notwendigkeit der Verwendung eines antastrichtungsabhängigen effektiven Tastkugeldurchmessers zusätzlich aufgrund der signifikanten Formabweichungen der Tastkugel. Weiterhin dürften jedoch beispielsweise Formabweichungen des Tasterschafts das Problem der Anisotropie desselben noch verschärfen. Es erscheint daher wenig zielführend, die Tastkugel im ausgebauten Zustand hinsichtlich ihrer Grobgestalt zu charakterisieren, da in diesem Falle auch die Charakterisierung des Tasterschafts zur Ermittlung der (richtungsabhängigen) Steifigkeit desselben notwendig wäre. Stattdessen sollte ein Referenzobjekt, beispielsweise eine Prüfkugel, hochgenau hinsichtlich dessen Grobgestalt charakterisiert und anschließend die Einmessung der Tastkugel an diesem Referenzobjekt unter Korrektur der sich aus der Grobgestalt des Referenzobjekts ergebenden Abweichungen durchgeführt werden. Im Gegensatz zur Tastkugel, bei welcher sich die notwendige Länge des Tasterschafts aus der Messaufgabe ableitet und insbesondere zur Messung an hohen Aspektverhältnissen ein

relativ langer Tasterschaft notwendig ist, könnte zur Befestigung des Referenzobjekts ein sehr kurzer Schaft verwendet werden, sodass die aus der Biegung desselben hervorgerufenen Abweichungen nach Formel 5 vernachlässigbar werden. Aufgrund der hervorragenden Präzision der μ -3D-KMS hängt die Genauigkeit der durch eine solche Einmessung durchgeführten Bestimmung der antastrichtungsabhängigen wirksamen Tastkugeldurchmesser nunmehr hauptsächlich von der Genauigkeit der Charakterisierung des Referenzobjekts sowie der Genauigkeit der Referenzierung desselben ab. Mit Referenzierung ist hierbei die Bestimmung der Lage und Orientierung des Koordinatensystems des Referenzobjekts, in welchem die Daten zu dessen Grobgestalt vorliegen, im Koordinatensystem des μ -3D-KMS gemeint [273].

Auch bei alternativen Antaststrategien, etwa bei Schwingungsanregung der Tastkugel, ist die empirische Bestimmung der wirksamen Tastkugeldurchmesser durch Einmessen an einem hochgenau kalibrierten Referenzobjekt notwendig. Denn bei diesen Antaststrategien wird im Gegensatz zur klassischen taktilen Antastung oftmals die aufgrund der anziehenden Kräfte resultierende Wechselwirkung zwischen Messobjektoberfläche und Tastelement als Messprinzip genutzt, wobei das Tastelement die Messobjektoberfläche teilweise gar nicht berührt. Der beim Auslösen der Messpunktaufnahme noch vorhandene Abstand zwischen Tastelement und Messobjektoberfläche ist dabei zumeist nicht genau bekannt, da dieser Abstand von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängt. Mehr noch, aufgrund der erreichten Präzision mikrotaktile Tastsysteme stellt sich die Frage nach der Vergleichbarkeit bzw. dem Unterschied der auf Grundlage unterschiedlicher Kraftwechselwirkungen gemessenen Messobjektoberflächen [274]. Mögliche systematische Messabweichungen fließen beim Einmessen an einem hochgenau kalibrierten Referenzobjekt jedoch schlicht in die ermittelten effektiven Tastkugeldurchmesser ein und werden entsprechend korrigiert. [261]

Bei vernachlässigbaren Formabweichungen und der somit gegebenen Rotations-symmetrie derselben, genügt zur Referenzierung einer Kugel die Bestimmung von deren Mittelpunkt. Da bei einem μ -3D-KMS diese Abweichungen nicht mehr vernachlässigbar sind, relativiert sich dieser Vorteil der Kugel gegenüber anderen Geometrien. Im Gegenteil, andere Geometrien, etwa ein Platonischer oder Archimedischer Körper [89, S. 396 ff.] könnten eine genauere Referenzierung ermöglichen. Beispielsweise wird in [275] der Einsatz Platonischer Körper zur Bewertung der Genauigkeit von fünfachsiggen Fräsmaschinen gezeigt. Dennoch wird aufgrund ihrer Verbreitung in der dimensionellen Messtechnik in Unterabschnitt 2.6.1 der Stand der Technik hinsichtlich der Bestimmung der Grobgestalt vorwiegend mikrodimensionaler Kugeln mit einem Durchmesser von unter 1 mm dargestellt.

2.5.2 Anziehende Kräfte

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt wurde, sind sowohl bei den SFMs als auch bei den mikrotaktilen Tastsystemen die anziehenden Kräfte nicht zu vernachlässigen. Adhäsion, *Stick-Slip*, eine erhöhte Belastung der Kontaktzone sowie eine erhöhte Reibung können bei beiden Sensorarten als unerwünschte Effekte aufgrund der anziehenden Kräfte auftreten [262]. Weiterhin ist beim Antastvorgang die sprunghafte Annäherung der Tastkugel (im Falle der mikrotaktilen Tastsysteme) an die Messobjektoberfläche (*Snap-in*) sowie beim Rückzugsvorgang das Haften der Tastkugel an eben dieser, um sich anschließend schlagartig von dieser zu lösen (*Snap-out*), zu beobachten. Auf die Möglichkeit der Reduktion dieser negativen Effekte durch Schwingungsanregung der Tastkugel [243, 263–266] soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da sich diese negativ auf die erreichbare Strukturauflösung auswirkt [258]. [244]

Wie ebenfalls im vorangegangenen Kapitel erwähnt, werden Kräfte in die vier Kategorien Gravitationskraft, elektromagnetische Kraft, schwache Kernkraft sowie starke Kernkraft eingeteilt. Die Reichweite der Kernkräfte ist so gering, dass sie an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden müssen [197, S. 3]. Ebenfalls nicht weiter betrachtet wird die Gravitationskraft, da deren Bedeutung relativ zu den elektromagnetischen Kräften mit der Miniaturisierung der beteiligten Objekte abnimmt [244]. Entsprechend spielen elektromagnetische Kräfte bei mikrotaktilen Tastsystemen eine entscheidende Rolle. Die elektromagnetischen Kräfte werden meist nach unterschiedlichen Kategorien noch weiter eingeteilt [197, S. 34 f.], wobei bei mikrotaktilen Tastsystemen die Kapillarkräfte, elektrostatische Anziehungskräfte sowie die nach JOHANNES VAN DER WAALS benannten Van-der-Waals-Kräfte am bedeutendsten sind [244, 276]. Ebenfalls bedeutend sind die Casimir-Kräfte, welche teilweise jedoch auch zu den Van-der-Waals-Kräften gezählt werden [197, S. 219]. Die folgende Darstellung beschränkt sich daher auf die Kapillarkräfte, die elektrostatischen Anziehungskräfte sowie die Van-der-Waals-Kräfte. Eine ausführliche Beschreibung der elektromagnetischen Kräfte findet sich in [197].

Kapillarkräfte entstehen bei der mikrotaktilen Antastung, da sich das in der Luft gespeicherte Wasser sowohl an der Oberfläche des Messobjekts als auch des Tastelements ablagert, um auf dieser, je nach Material, Feingestalt und Luftfeuchtigkeit, einzelne Wassertropfen oder aber auch einen geschlossenen Wasserfilm mit einer Dicke von mehreren 10 nm zu bilden [277]. Bei der Annäherung von Tastkugel und Messobjektoberfläche bildet sich zwischen beiden Objekten eine Wasserbrücke aus, welche eine diese Objekte gegenseitig anziehende Kapillarkraft erzeugt. Die Kapillarkraft hängt von den

Materialien und der Gestalt der beteiligten Objekte ab, wobei insbesondere auch die Feingestalt entscheidend ist [278, 194, S. 98 f.]. Außerdem zeigt die Kapillarkraft eine starke Hysterese zwischen Annäherung und Rückzug [279]. Eine ausführliche Darstellung der Kapillarkräfte ist in [194] zu finden. [197, S. 456-460]

Ursprung der elektrostatischen Anziehungskraft bei mikrotaktilen Tastsystemen kann die Ladungserzeugung durch Reibung oder auch der Transfer von Ladungsträgern bei der Berührung von Messobjekt und Tastkugel sein. In den meisten Fällen begrenzt die relativ geringe elektrische Durchschlagsfestigkeit der Luft die zwischen zwei Objekten entstehenden Ladungsdifferenzen. Bei sehr geringem Abstand können aber auch in Luft sehr hohe Ladungsdichten entstehen. Neben der Ladungsdifferenz hängt die elektrostatische Anziehungskraft auch wesentlich von den Materialeigenschaften der beteiligten Objekte ab. [276, 280]

Nach HUGO HAMAKER hängt die wirkende Van-der-Waals-Kraft zwischen zwei Kugeln von deren Abstand, deren Radien sowie einer nach ihm benannten Konstanten ab, deren Wert wiederum von den Materialien der beiden Kugeln sowie dem zwischen diesen liegenden Medium abhängt [281]. Daraus ableitbar lässt sich auch die zwischen einer Kugel und einer Fläche wirkende Van-der-Waals-Kraft nach

$$F = -\frac{H \cdot r}{6 \cdot d^2} \quad (6)$$

für $d > 0$ aus der Hamaker-Konstanten H , dem Radius der Kugel r sowie dem Abstand zwischen Kugel und Fläche d errechnen [197, S. 255]. Nicht berücksichtigt werden von dieser Formel die bei einem realen Objekt unvermeidlichen Abweichungen von der Idealgeometrie. Während in [282] gefolgert wird, dass die Rauheit die Steigerung der Van-der-Waals-Kraft zur Folge hat, wird in [283–286] von einer signifikanten Reduktion der Van-der-Waals-Kraft aufgrund der Rauheit ausgegangen bzw. eine solche Reduktion empirisch nachgewiesen. Eine mögliche Erklärung dieses Widerspruchs könnte in der bereits in der Einleitung zu diesem Abschnitt angesprochenen problematischen Definition des Begriffs Rauheit im Bereich der Nanometrologie liegen, durch welche eine einheitliche Verwendung dieses Begriffs nicht sichergestellt ist. Weiterhin überlagern sich in der Realität die einzelnen Kräfte und eine Trennung der gemessenen Gesamtkraft in die einzelnen Komponenten ist entsprechend schwierig [194, S. 33].

Adhäsion und Reibung sind sich aus der Gesamtheit der wirkenden anziehenden Kräfte ergebende Effekte, für welche jedoch ebenfalls eine Abhängigkeit zur Feingestalt der beteiligten Objekte festgestellt werden konnte [262, 287–

289]. Eine ausführliche Darstellung der Adhäsion und des durch die anziehenden Kräfte verursachten Reibverhaltens ist in [262] zu finden.

Wie in Bild 9 ersichtlich, treten bei der mikrotaktilen Antastung anziehende und abstoßende Kräfte gleichzeitig auf. Da das mikrotaktile Tastsystem die Summe aller Kräfte detektiert, kann die in der Belastungszone wirkende Kraft erheblich größer sein als die detektierte Kraft. Sich dadurch ergebende Deformationen der Tastkugel sowie der Messobjektoberfläche wirken sich wiederum auf die anziehenden Kräfte aus. Plastische Veränderungen, allerdings auch eine stattfindende Verlagerung von Wassertropfen, könnten eine teilweise zu beobachtende schlechte Reproduzierbarkeit der Antastung erklären [244, 285].

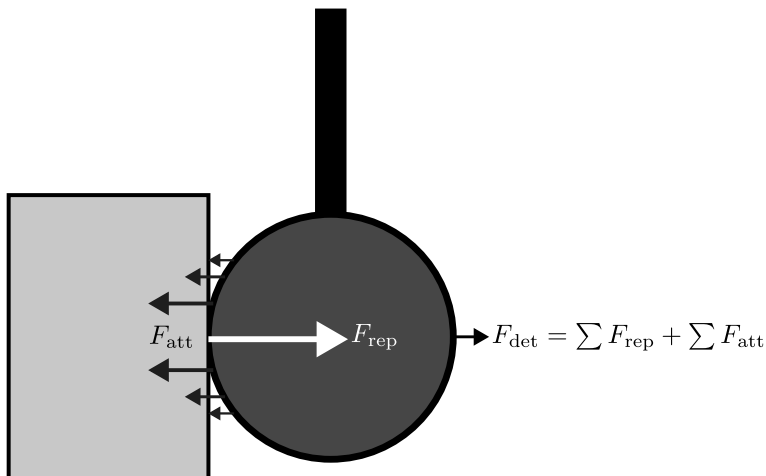


Bild 9: Detektierte Kraft (F_{det}) als Summe anziehender (F_{att}) und abstoßender (F_{rep}) Kräfte. Bild modifiziert nach [195, S. 64].

Zusammengefasst ist die Komplexität der mikrotaktilen Antastung enorm und zur Bestimmung und idealerweise auch Reduktion der durch die anziehenden Kräfte verursachten Unsicherheitsbeiträge zunächst die Erlangung eines tieferen Verständnisses der stattfindenden Wechselwirkungen notwendig. Ein μ -3D-KMS ist für entsprechende empirische Untersuchungen, beispielsweise der Aufnahme von Kraft-Weg-Kurven, ideal geeignet und eine entsprechende Auswertung dieser Kurven ist möglich, sofern die entscheidenden Einflussfaktoren beherrscht werden. Ein sehr entscheidender und sich im Zeitverlauf ggf. verändernder Faktor ist hierbei die Feingestalt der Tastkugel sowie der Messobjektoberfläche. Entsprechende Untersuchungen, in diesem Fall des Einflusses des Luftdrucks und mit diesem der relativen Luftfeuchtigkeit auf die wirkenden anziehenden Kräfte, wurden in [290] gezeigt, wobei die

erhaltene Diskrepanz zwischen theoretischen und empirisch ermittelten Werten auf die Feingestalt der Tastkugel und der Messobjektoberfläche zurückgeführt wird. Diese Hypothese wurde jedoch nicht weiter untersucht bzw. quantifiziert. Für die hierzu durchzuführenden empirischen Untersuchungen ist die Verfügbarkeit geeigneter Messsysteme zur genauen Bestimmung der Feingestalt sowohl der Tastkugel als auch der Messobjektoberfläche notwendig. In Unterabschnitt 2.6.2 werden daher Verfahren dargestellt, welche die Bestimmung der Feingestalt mikrodimensionaler Kugeln ermöglichen.

2.6 Charakterisierung einer (mikrodimensionalen) Kugel

Die in diesem Abschnitt dargestellten Verfahren zur Charakterisierung vorwiegend mikrodimensionaler Kugeln mit einem Durchmesser von unter 1 mm, wie sie beispielsweise als mikrotaktile Tastkugeln zum Einsatz kommen, sind eingeteilt in Verfahren zur Bestimmung der Grobgestalt sowie Verfahren zur Bestimmung der Grob- und Feingestalt. Nicht eingegangen wird auf Verfahren, welche lediglich die Bestimmung der Formabweichung ermöglichen, beispielsweise [291–294].

2.6.1 Bestimmung der Grobgestalt

In [32] wird eine mittels mikro-Funkenerodieren hergestellte mikrodimensionale Kugel bereits bei der Herstellung charakterisiert. Das hierbei verwendete Messverfahren weist allerdings bereits eine Standardabweichung von mehreren hundert Nanometern auf, was im Kontext mikrotaktiler Tastsysteme unzureichend ist.

Beim sogenannten Dreikugeltest wird die Notwendigkeit einer Referenzkugel zur dreidimensionalen Charakterisierung einer mikrotaktilen Tastkugel durch das Messen von drei Kugeln gegeneinander vermieden [35]. Die nach diesem Verfahren ermittelten Formabweichungen liegen im publizierten Beispiel für drei Saphirkugeln zwischen 33 nm und 53 nm. Obwohl diese Kugeln somit außerordentlich geringe Formabweichungen aufweisen, würde der daraus resultierende Unsicherheitsbeitrag bei Nichtkorrektur unter der Annahme einer Rechteckverteilung nach GUM bereits zwischen 10 nm und 15 nm betragen. Trotz des hohen Aufwands zur Durchführung dieses Verfahrens lassen sich jedoch nicht alle Formabweichungen separieren [235]. Ein ähnliches, wenngleich hinsichtlich der Dimensionalität etwas eingeschränktes und bisher nur mit relativ großen Kugeln gezeigtes Verfahren ist die Rotation der Prüfkugel zur Separierung der Formabweichungen der Prüf- und Tastkugel [295].

In einem von *IBS Precision Engineering* vorgestellten Verfahren wird eine Diamantschneide mit einem Spitzenradius von weniger als 10 nm als Referenzobjekt zur Bestimmung des Durchmessers einer mikrodimensionalen Kugel verwendet. Hierzu wird die mikrodimensionale Kugel als Tastkugel eines mikrotaktilen Tastsystems verwendet und die Diamantschneide mit diesem gemessen. Aus dem gemessenen Profil wird unter Vernachlässigung des Spitzenradius der Diamantschneide auf den Durchmesser der Tastkugel geschlossen. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass nur in einem eingeschränkten Bereich der Kugel Messpunkte aufgenommen werden und somit die korrekte Trennung von Maß und Form nicht gewährleistet werden kann. [296]

In der optischen Messtechnik existieren eine Vielzahl von Verfahren zur Krümmungsradiusmessung [297–300], welche teilweise auch auf mikrodimensionale Kugeln anwendbar sind [301]. Zur Messung der Formabweichung und auch des Radius einer kompletten Kugel ist jedoch die Aufnahme von Messpunkten am gesamten Umfang der Kugel notwendig, da ansonsten die Formabweichungen der Kugel zu erheblichen Abweichungen des bestimmten Radius derselben führen können [302, 303]. Ein diese Bedingung erfüllendes optisches Messverfahren wurde zur im Zuge der Neudefinition des Kilogramms notwendigen Bestimmung der nach AMEDEO AVOGADRO benannten Konstanten gezeigt, bei welcher unter anderem die hochgenaue Ermittlung des Volumens einer 1 kg Siliciumkugel notwendig war [304]. Hierzu wurde ein Aufbau bestehend aus zwei gegenläufigen Fizeau-Interferometern entwickelt, mit welchem sich mehrere tausend Durchmesserwerte innerhalb eines Bereichs von 60° in einer Messung erfassen lassen. Um Messpunkte auf der gesamten Oberfläche der Kugel aufzunehmen, lässt sich diese mittels zweier rechtwinklig angeordneter Achsen rotieren. Zur Bestimmung des Volumens der Kugel wird der mittlere Durchmesser basierend auf vielen an unterschiedlichen Stellen aufgenommenen Durchmessern ermittelt, wobei diese zunächst auf eine festgelegte Anzahl gleichmäßig über der Oberfläche verteilter Stützstellen abgebildet werden. Hierdurch werden Messstellen mit einer erhöhten Punktdichte im Messergebnis nicht überrepräsentiert [305]. Die charakterisierte Siliciumkugel war hochgenau gefertigt. Bei größeren Formabweichungen der Kugel könnte es jedoch zu Signalabbrüchen kommen, da die Interferometer direkt die Kugel messen. Somit ist dieses Verfahren für die Charakterisierung von Kugeln mit größeren zu erwartenden Formabweichungen nur bedingt geeignet. [306]

An der *National Taipei University of Technology* wurde ein System bestehend aus Kamera und Rotationsspindel zur Charakterisierung mikrodimensionaler Kugeln aufgebaut. Aus den in unterschiedlichen Winkelstellungen der Rotationsspindel aufgenommenen Bildern wird zunächst, wie bei optisch antastenden 3D-KMS [114] üblich, der Messdatensatz in einem gemeinsamen

Koordinatensystem erzeugt. Anschließend werden anhand dieses Datensatzes die Eigenschaften der Kugel ermittelt. Die erzielbaren Messabweichungen werden im dreistelligen Nanometerbereich angegeben. [307]

An der *University of Warwick* wurde die Charakterisierung einer mikrodimensionalen Kugel mittels Weißlichtinterferometer (WLI) gezeigt. Aufgrund des beschränkten Akzeptanzwinkels des verwendeten Objektivs wird die Kugel mittels zweier Achsen rotiert. Die in unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen Messwerte werden anschließend mittels *Stitching* aneinandergesetzt. Hierzu wird allerdings eine Referenzfläche, auf welche die Kugel geklebt wurde und welche mit der Kugel rotiert, benötigt. Somit ist die Kugel trotz Rotation insgesamt nur im Bereich des Akzeptanzwinkels des Objektivs (ca. 50°) messbar. [308]

Die bidirektionale Messung einer mikrodimensionalen Kugel mittels WLI wurde in einem Verfahren des *Mitutoyo Research Center Europe* gezeigt. Der entsprechende Aufbau ist in Bild 10 dargestellt. Bei diesem Verfahren ist die Kugel in einem gewissen Abstand über einem Spiegel positioniert. Die obere Hemisphäre wird an der realen Kugel gemessen, die untere Hemisphäre an der gespiegelten. Da weiterhin die Position des Spiegels durch Messung bekannt ist, lassen sich alle erhaltenen Topografiewerte an diesem referenzieren und entsprechend der Durchmesser der Kugel bestimmen. Aufgrund der Möglichkeit, Messpunkte sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Hemisphäre zu messen und somit einem lateralen Punkt mehr als nur einen z -Wert beizuordnen, handelt es sich bei einem optischen Messsystem unter Anwendung dieses Messverfahrens um ein 3D-KMS. Die Autoren geben als Unsicherheit des bestimmten Durchmessers der Kugel einen Wert von $0,17 \mu\text{m}$ an, wobei der größte Unsicherheitsbeitrag aus der vertikalen Positionierung resultiert. Nicht in Betracht gezogen werden jedoch Abweichungen,

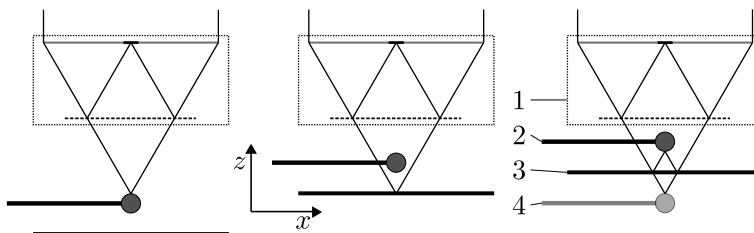


Bild 10: Bidirektionale Messung einer mikrodimensionalen Kugel mittels WLI: 1 Mikroskopobjektiv nach ANDRÉ MIRAU [309]; 2 mikrodimensionale Kugel mit Schaft; 3 Spiegel; 4 Spiegelbild der mikrodimensionalen Kugel mit Schaft. Links: Messung der oberen Hemisphäre an der realen Kugel. Mitte: Messung des Spiegels. Rechts: Messung der unteren Hemisphäre an der gespiegelten Kugel. Bild modifiziert nach [310].

welche aus der sich bei der Messung des Spiegels und der gespiegelten Kugel im Strahlengang befindlichen realen Kugel resultieren könnten. Denn neben der durch die Kugel hervorgerufenen Abschattung könnte es an dieser auch zu Beugungseffekten kommen [185, S. 980 ff.], welche wiederum zu systematischen Abweichungen führen könnten. Weiterhin ist auch für WLIs bekannt, dass es bei der Messung gekrümmter Oberflächen zu systematischen Messabweichungen kommen kann [22]. Aus diesen Gründen, und da eine **Verifizierung** (VIM, 2.44) des Messergebnisses anhand beispielsweise der Messung einer kalibrierten Kugel nicht stattgefunden hat, sind hinsichtlich der Korrektheit desselben zumindest Zweifel angebracht. [310]

Von der *University of Tokyo* wurde die Bestimmung des Durchmessers einer mikrodimensionalen Kugel mittels Analyse des spektralen Fingerabdrucks derselben gezeigt. Das Verfahren ist jedoch lediglich bei dielektrischen Materialien anwendbar und das Ergebnis auch vom Brechungsindex der Kugel abhängig. Weiterhin lässt sich mittels dieses Verfahrens lediglich der umfangsbezogene Durchmesser bestimmen. [311]

Rein qualitativ lässt sich die Asphärizität transparenter Kugeln auch durch Einbringen derselben in den Strahlengang eines vektoriiellen Shearing-Interferometers bestimmen [312].

2.6.2 Bestimmung der Feingestalt

Aufgrund der beschränkten Strukturauflösung, welche sich aus der Beugungsbegrenzung optischer Messverfahren oder aber der Verwendung von Tast- und Prüfkugel ähnlicher Größe ergibt, lässt sich mit den im vorherigen Unterabschnitt gezeigten Verfahren lediglich die Grobgestalt einer Kugel bestimmen. Eine wesentlich bessere Strukturauflösung und somit die Bestimmung der Feingestalt ermöglichen rasterkraftmikroskopische Messverfahren [214, 270]. In einem von der TU Ilmenau [235], sowie einem von der *Hefei University of Technology* [233] gezeigten Ansatz, wird eine mikrodimensionale Kugel mittels eines SFMs gemessen, indem diese mittels einer bzw. zweier Rotationsachsen gedreht wird.

Bei dem von der TU Ilmenau gezeigten Ansatz werden die einzelnen, in ihrer Länge begrenzten Linienscans in ein globales Optimierungsproblem überführt und durch einen *Stitching*-Algorithmus aneinandergefügt. Größere Messabweichungen entstehen jedoch aufgrund der sich im Laufe der Messung wegen plastischer Verformung verändernden Geometrie der Cantilever-Spitze. [235]

Von der *Hefei University of Technology* wurde ein Aufbau bestehend aus zwei entgegengesetzt angeordneten Cantilevern zur Charakterisierung einer

mikrodimensionalen Kugel vorgestellt [313]. Für den Durchmesser der Kugel wird eine Standardmessunsicherheit von 13 nm, für die Formabweichung eine Standardmessunsicherheit von 21 nm angegeben [314]. Untersuchungen der TU Ilmenau deuten jedoch darauf hin, dass signifikante Einflussfaktoren bei der Berechnung der Messunsicherheit unberücksichtigt blieben [315, 316].

2.7 Konfokalmikroskopie

Ausgehend vom im Bisherigen dargestellten Stand der Technik wird im nächsten Kapitel noch bestehender Handlungsbedarf abgeleitet und darauf aufbauend die Zielstellung dieser Arbeit konkretisiert. Zunächst wird jedoch in den nächsten beiden Abschnitten als Einschub und dem weiteren Inhalt der Arbeit vorgreifend der Stand der Technik hinsichtlich der Konfokalmikroskopie sowie ein am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik aufgebauter und erstmals in [P6] beschriebener, fasergekoppelter Konfokalsensor mit modulierbarem Fokusabstand dargestellt.

Optische Messgeräte nutzen Licht zur berührungslosen Erfassung der Messobjektoberfläche und zeichnen sich unter anderem durch die hohe Schnelligkeit der Datenpunktaufnahme aus [36]. Beispiele optischer Messverfahren in der dimensionellen Metrologie sind die Weißlicht-Interferometrie [317], die Fokusvariation [318] und die Konfokalmikroskopie [319]. Durch seine Vielzahl an empirisch nachweisbaren Eigenschaften entzieht sich Licht bis heute der Beschreibbarkeit durch nur ein einziges Modell [320]. Intuitiv wahrnehmbar, und auch bereits von den alten Griechen so gelehrt [321, S. 6 f.], ist die geradlinige Ausbreitung des Lichts, welche auch eine Grundannahme der sogenannten Geometrischen Optik [185, S. 305 ff.] darstellt. Die Unzulänglichkeit dieser Vorstellung lässt sich beispielsweise anhand des erstmals von THOMAS YOUNG durchgeführten Doppelspaltexperiments, bei welchem das durch zwei Spalte tretende, kohärente Licht Interferenzerscheinungen aufweist, aufzeigen [185, S. 775 ff.]. Als Interferenz wird hierbei die Überlagerung mehrerer Wellen nach dem Superpositionsprinzip bezeichnet [185, S. 761 ff.]. Aus den nach ihm benannten Maxwell-Gleichungen [322] und empirisch bestimmten Werten für die magnetische und die elektrische Feldkonstante konnte JAMES MAXWELL die Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Vakuum berechnen. Da sich sein errechneter Wert von $3 \cdot 10^5 \text{ km s}^{-1}$ sehr gut mit dem von HIPPOLYTE FIZEAU empirisch bestimmten Wert ($315\,300 \text{ km s}^{-1}$) [323] deckte, folgerte er, dass es sich bei Licht sehr wahrscheinlich um eine elektromagnetische Welle handle [185, S. 99 f.]. Diese Betrachtung des Lichts als (elektromagnetische) Welle wird im Gegensatz zur Geometrischen Optik als Wellenoptik bezeichnet [320, S. 19 ff.].

Eine elektromagnetische Welle ist Träger einer Energie. Zur Beschreibung dieser Energie pro Zeiteinheit und Fläche, i. e. der Leistung pro Fläche oder auch Leistungsdichte der Welle, wird der von JOHN POYNTING eingeführte und nach ihm benannte Poynting-Vektor verwendet. Die Betrachtung des Lichts als Welle legt eine kontinuierliche Verteilung der Leistungsdichte über eine Wellenfront nahe. Mit bemerkenswert einfachen Experimenten konnte SERGEI WAWILOW jedoch die statistische bzw. diskontinuierliche Übertragung von Energie durch Licht nachweisen [324]. Schon Jahrzehnte vor diesen Experimenten führte ALBERT EINSTEIN die Vorstellung ein, „daß [sic!] die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei“ [325]. Für die Träger dieser Energie nutzte er den Begriff der „in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten“ [325]. Die Betrachtung des Lichts als aus elementaren Teilchen bestehend, wobei sich für diese Teilchen der Begriff Photon durchsetzte [326], wird als Quantenoptik bezeichnet [320, S. 39]. [185]

Eine Abhandlung über Licht bzw. der Optik, i. e. der Lehre vom Licht, ist in abnehmender Ausführlichkeit in [185], [327], [328] und [329, S. 441-551] zu finden. Besonderer Erwähnung wert ist außerdem das umfangreiche Werk MAX BORNS und EMIL WOLFS [330]. Ein auf gewissen mathematischen Näherungen beruhendes Teilgebiet der Wellenoptik ist die Fourier-Optik. Wesentliche mathematische Operation hierbei ist die nach JOSEPH FOURIER benannte Fourier-Transformation \mathcal{F} , beispielsweise einer zweidimensionalen Funktion m , definiert als

$$\mathcal{F}\{m\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} m(x, y) \cdot \exp[-j2\pi(g_x x + g_y y)] dx dy, \quad (7)$$

mit der imaginären Einheit j ($j^2 \stackrel{\text{def.}}{=} -1$) sowie den Ortsfrequenzen g_x und g_y . Denn in sehr guter Näherung entspricht das Fraunhofersche Beugungsmuster (benannt nach JOSEPH FRAUNHOFER) gerade der Fourier-Transformierten der Blendenfunktion. Für eine ausführliche Darstellung der Fourier-Optik sei auf die Referenzen dieses Absatzes verwiesen. [185, 327, 331, 332]

Die Fourier-Optik bildet auch die Grundlage der neben dem prinzipiellen Aufbau eines Konfokalmikroskops im ersten Teil dieses Abschnitts dargestellten Modellierung eines solchen. Weiterhin wird im ersten Unterabschnitt auf die in der FMT zumeist vorzufindenden Verfahren der Signalauswertung eingegangen. Hinsichtlich der in Unterabschnitt 2.7.2 betrachteten Weiterentwicklungen der Konfokalmikroskopie wird der Fokus auf Systeme gelegt, welche eine Verkürzung der Messzeit zum Ziel haben.

2.7.1 Aufbau und Modellierung

MARVIN MINSKY sah sich mit dem Problem der mangelnden Tiefendiskriminierung optisch abbildender Systeme konfrontiert, welches er mit dem 1957 zum Patent [333] angemeldeten und in Bild 11 dargestellten Konfokalmikroskop behob [334]. Neben der Tiefendiskriminierung zeichnet sich das Konfokalmikroskop im Vergleich zu einem konventionellen Mikroskop durch eine insgesamt erheblich verbesserte Strukturauflösung aus, was sich zunächst theoretisch [335] und wenig später empirisch [336] zeigen ließ. Besonders eindrucksvoll wird dies durch den Vergleich konfokalmikroskopischer und konventionell mikroskopischer Aufnahmen verdeutlicht, wobei solche Vergleiche beispielsweise in [337, 338] zu finden sind. Die Funktionsweise des Konfokalmikroskops lässt sich anhand von Bild 11 erläutern: Das Licht einer Lichtquelle (1), etwa eines Lasers [339, 340], gelangt durch eine Lochblende (2) auf einen Strahlteiler (3), wobei der nicht abgelenkte Teil des Strahls (nur dieser ist eingezeichnet) von einer Linse (6) auf das Messobjekt (7) fokussiert wird. Von diesem wird der Strahl sodann reflektiert und gelangt in umgekehrter Richtung durch die Linse auf den Strahlteiler, wobei nun der abgelenkte Teil des Strahls (wiederum ist nur dieser eingezeichnet) durch eine zweite Lochblende (5) einen Fotoempfänger (4) erreicht. Die beiden Lochblenden sind so angeordnet, dass das Licht nur dann die Lochblende vor dem Fotoempfänger passiert, wenn sich das Messobjekt genau im Fokuspunkt der Linse befindet. Befindet sich das Messobjekt außerhalb dieses

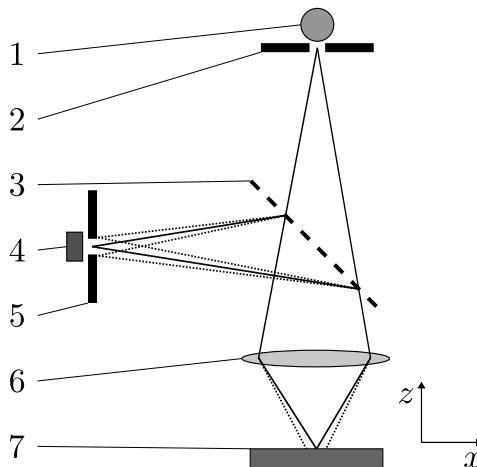


Bild 11: Aufbau eines Konfokalmikroskops: 1 Lichtquelle; 2 Lochblende; 3 Strahlteiler; 4 Fotoempfänger; 5 Lochblende; 6 Linse; 7 Messobjekt. Durchgezogener Strahlengang: Messobjekt im Fokuspunkt. Gepunkteter Strahlengang: Messobjekt außerhalb des Fokuspunkts. Bild modifiziert nach [333].

Fokuspunkts, wie dies in Bild 11 mit gepunktetem Strahlengang dargestellt ist, so wird das reflektierte Licht von der Lochblende vor dem Fotoempfänger blockiert. Das Blockieren des Lichts, welches nicht aus dem Fokuspunkt rührt, durch die Lochblende vor der Fotodiode, kombiniert mit der Tatsache, dass ohnehin nur eben dieser Fokuspunkt, aufgrund der Lochblende hinter der Lichtquelle, beleuchtet wird, verleiht dem Messaufbau eine hervorragende Tiefendiskriminierung und Auflösung. Die Verbesserung der Auflösung geht allerdings, wie dies allgemein üblich ist [341], einher mit einer (drastischen) Einschränkung des Bildfeldes zu einem einzelnen (beugungsbegrenzten) Punkt. [338]

Der zweite Teil des Patents Minskys beschreibt daher den Ansatz, durch Bewegung der Stage, auf welcher sich das Messobjekt befindet, Messpunkte, i. e. den vom Fotoempfänger ausgehenden Intensitätswert des reflektierten Strahls sowie die Positionswerte der Stage, in einem Messvolumen aufzunehmen (*stage scanning*). In Anlehnung an die Bereits in Abschnitt 2.4 thematisierten Rastersondenmikroskope könnte dies auch *scanning optical microscopy* [342] genannt werden. Die Konfokalmikroskopie findet Anwendung in vielen unterschiedlichen Bereichen, insbesondere in der Biologie [343], dort vielfach als konfokales Fluoreszenzmikroskop [344, 345]. Aufgrund des hervorragenden Auflösungsvermögens wird die Konfokalmikroskopie jedoch auch in der dimensionellen Metrologie eingesetzt [319, 346, 347].

Die Fähigkeit zur Tiefendiskriminierung ist anhand des axialen Übertragungssignals des Konfokalmikroskops erkennbar. Für den Fall einer reflektierenden Ebene als Messobjekt lässt sich die den Fotoempfänger erreichende, normierte Intensität I auf Grundlage der paraxialen Strahltheorie und unter der Annahme einer infinitesimal kleinen Blende vor dem Fotoempfänger, i. e. eines effektiv unendlich kleinen Detektors nach

$$I_{\text{Ebene}}(\gamma_a) = \left[\frac{\sin(\gamma_a/2)}{\gamma_a/2} \right]^2 \quad (8)$$

aus der normierten axialen Koordinate

$$\gamma_a = \frac{8\pi}{\lambda_L} z [\sin(\alpha/2)]^2, \quad (9)$$

wobei λ_L die Wellenlänge des verwendeten Lasers und α der halbe Öffnungswinkel der Linse bzw. des Objektivs ist, errechnen. Der halbe Öffnungswinkel ist über

$$\alpha = \arcsin(A_N/n) \quad (10)$$

mit der numerischen Apertur A_N und dem Brechungsindex des Immersionsmediums n , wobei $n \approx 1$ für Luft, verknüpft [107]. Für ein punktförmiges Messobjekt wird Formel 8 zu

$$I_{\text{Punkt}}(\gamma_a) = \left[\frac{\sin(\gamma_a/4)}{\gamma_a/4} \right]^4. \quad (11)$$

In Bild 12 ist das axiale Übertragungssignal eines ebenen und eines punktförmigen Messobjekts für ein Konfokalmikroskop mit $\lambda_L = 633 \text{ nm}$, $A_N = 0,8$ und $n = 1$ dargestellt. In diesem Beispiel halbiert sich I bereits, wenn das Messobjekt um 350 nm (ebenes Messobjekt) bzw. 505 nm (punktförmiges Messobjekt) axial zum Fokuspunkt versetzt ist. Es sei jedoch angemerkt, dass im Gegensatz zu diesem theoretischen Grenzfall eines unendlich kleinen Detektors sich für einen in der Realität anzutreffenden Detektor finiter Größe andere, höhere Werte ergeben [348]. Auch die Verwendung einer hohen A_N sorgt für, wenngleich relativ geringe, Abweichungen vom theoretischen Signalverlauf [349]. [338]

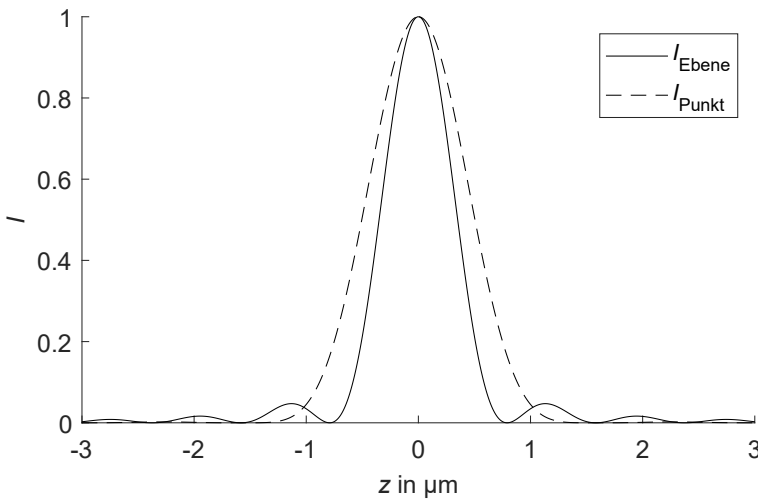


Bild 12: Axiales Übertragungssignal eines ebenen (I_{Ebene}) und eines punktförmigen (I_{Punkt}) Messobjekts für ein Konfokalmikroskop mit infinitesimal kleinem Detektor und $\lambda = 633 \text{ nm}$, $A_N = 0,8$ und $n = 1$.

Die dimensionelle Messung eines Messobjekts mittels konfokalem Punktsensor beruht zunächst auf der Aufnahme von Messpunkten in einem bestimmten, die zu messende Oberfläche enthaltenden Messvolumen. Für jeden Messpunkt werden dabei die Positionswerte der Stage sowie das Signal des Fotoempfängers gespeichert. Aus dieser Kombination aus lateraler und axia-

ler Abtastung wird anschließend für jeden lateralen Punkt (wie üblich seien im Folgenden x und y die lateralen Koordinaten) die Höhe des Messobjekts, i. e. die z -Koordinate, durch Auswertung des für eben diesen lateralen Punkt erhaltenen axialen Übertragungssignals (vgl. Bild 12) ermittelt. Entsprechend handelt es sich der in Unterabschnitt 2.2.1 eingeführten Nomenklatur folgend bei einem Konfokalsensor mit dreidimensionaler Stage um ein 2,5D-KMS. [319, 350]

Zur Bestimmung der z -Koordinate aus dem axialen Übertragungssignal gibt es unterschiedliche Verfahren, wobei jedoch allgemein davon ausgegangen wird, dass die Position des Maximalwerts des Übertragungssignals mit der Position der Oberfläche übereinstimmt [319, 347]. Entsprechend ist die schnellste Methodik der Messsignalauswertung der Position der Oberfläche die Position des Maximalwerts des axialen Übertragungssignals zuzuweisen. Hierdurch wird jedoch zum einen die axiale Auflösung auf den axialen Schritt, i. e. den axialen Abstand zweier benachbarter Messpunkte, beschränkt, zum anderen ist das Verfahren anfällig gegenüber Signalausreißern bzw. Rauschen. [350]

Alternative Verfahren berechnen daher stattdessen den Schwerpunkt des axialen Übertragungssignals [351] oder passen mathematische Funktionen, etwa eine Parabel oder die Gauß-Funktion (benannt nach CARL GAUSS) [352], oder aufgrund des theoretischen Signals (vgl. Formel 8) den quadrierten Kardinalsinus [353] an das axiale Übertragungssignal an. Bei diesen Anpassungen kann es vorteilhaft sein, die Nebenmaxima (s. Bild 12, I_{Ebene}) durch Anwendung eines entsprechenden Schwellwerts auszuschließen [354]. In [355, 356] werden unterschiedliche Verfahren hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Rauschen auf dem Eingangssignal untersucht. Die gezogenen Schlüsse sind jedoch nicht ganz eindeutig: So wird in [355] der Anpassung einer Funktion, in [356] der Schwerpunktfindung die höchste Genauigkeit zugesprochen. Weiterhin wirkt sich bei der Schwerpunktfindung die Höhe des Schwellwerts positiv auf die Genauigkeit aus, während sie sich bei der Anpassung einer Funktion aufgrund der mit der Erhöhung des Schwellwerts einhergehenden Reduktion der Anzahl betrachteter Datenpunkte negativ auf die Genauigkeit auswirkt [355]. Auch Aberrationen innerhalb des optischen Aufbaus können sich aufgrund ihres Einflusses auf die Form des axialen Übertragungssignals negativ auf die Genauigkeit der Bestimmung der z -Koordinate auswirken [357].

Bei der Kombination einer lateralen Abtastung und einer oszillierenden axialen Abtastung, wobei die Frequenz der letzteren zumindest so hoch ist, dass für jeden aufzunehmenden Messpunkt eine axiale Periode durchlaufen wird, lassen sich die Topografiewerte der Oberfläche direkt während der Messung ermitteln, indem das Auslesen der Positionierdaten der Stage durch Maxi-

malwertdetektion des Signals des Fotoempfängers ausgelöst wird [346]. In Anlehnung daran lässt sich durch die Anwendung der Lock-in-Verstärkung zur Signalauswertung eine wesentliche Reduktion des Einflusses des Rauschens des Eingangssignals bewirken [358].

2.7.2 Weiterentwicklungen

Die Konfokalmikroskopie wird in einer Vielzahl unterschiedlichster Bereiche, oftmals in etwas abgewandelter Form, angewandt. Die umfangliche Darstellung der Anwendungen und Weiterentwicklungen würde daher den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Um nur zwei Beispiele zu nennen, wurde in [359] ein Aufbau ohne Fotoempfänger gezeigt, bei welchem das von einem Laser stammende und von der Messobjektoberfläche reflektierte Licht wieder in den Laser eingekoppelt wird, um dort ein durch Beobachtung der Leistungsaufnahme desselben detektierbares Signal zu erzeugen. Ein anderes Beispiel ist die Anwendung einer Mikrokugel zur Durchführung konfokalmikroskopischer Messungen mit einer lateralen Auflösung weit unterhalb der Beugungsbegrenzung [360, 361]. Der Fokus der nun folgenden Darstellung von Weiterentwicklungen der Konfokalmikroskopie wird auf solche gelegt, welche die Reduktion der für die Durchführung einer Messung benötigten Zeit zum Ziel haben.

Aufgrund der Masse des Messobjekts und der damit einhergehenden Trägheit desselben ist die Durchführung der Relativbewegung durch Bewegungen des Messobjekts (*stage scanning*) relativ langsam. Umgehen lässt sich die Notwendigkeit zumindest der axialen Bewegung durch Verwendung von Licht mehrerer Wellenlängen und der Ausnutzung der chromatischen Aberration der optischen Komponenten [362, 363], da hierdurch wellenlängenabhängig Fokuspunkte unterschiedlichen Abstands entlang der z-Richtung entstehen. Weiterhin ist auch der Einsatz mehrerer Fotodioden mit jeweils axial versetzten Blenden bekannt [364]. Alternativ ist die Oszillation einer einzigen Fotodiode in axialer Richtung [365] oder der sich vor der Fotodiode befindlichen Apertur [366] möglich.

Das axiale Übertragungssignal eines Konfokalsensors weist im Fokuspunkt das Maximum auf, was gleichzeitig bedeutet, dass in diesem Punkt die **Empfindlichkeit** (VIM, 4.12) des Sensors zu null wird. In [367] wird daher lediglich eine Flanke des axialen Übertragungssignals genutzt, um aus deren eindeutiger Beziehung zur axialen Position der Messobjektoberfläche die **Kalibrierkurve** (VIM, 4.31) des Konfokalsensors zu errechnen. Mittels einer solchen Kalibrierkurve ist auch die Durchführung axial nachgeregelter lateraler Messungen ähnlich der Arbeitsweise eines Punkt-Autofokus-Sensors [368] möglich. Eine Variation der Intensität des reflektierten Strahls, hervorgerufen

beispielsweise durch sich lokal ändernde Reflexionseigenschaften des Messobjekts oder aber Schwankungen der Laserleistung, führt jedoch zu relativ hohen Messabweichungen [367, 369]. Diese lassen sich durch Verwendung zweier zum Fokuspunkt symmetrisch axial versetzter Detektionsblenden und Detektoren sowie Differenzbildung der beiden Signale bereits teilweise eliminieren [370]. Bei gleichzeitiger Normierung des Differenzsignals durch das Summensignal beider Detektoren wird der Effekt der Variation der Intensität des reflektierten Strahls auf die Kalibrierkurve nahezu ausgeschlossen [371]. Diese Art der Signalauswertung lässt sich auch bei einem chromatisch konfokalen Sensor anwenden [372].

Bei kollimiertem Strahl ist die Bewegung des Objektivs (*objective scanning*) zur lateralen oder axialen Modulation des Fokuspunkts möglich [339, 373]. Eine weitere Reduktion der bewegten Masse lässt sich durch Modulation des Strahls (*beam scanning*) erreichen. Verfahren zur lateralen Abtastung nutzen eine rotierende Nipkow-Scheibe (benannt nach PAUL NIPKOW [374]) [375], rotierende Mikrolinsenarrays [351], bewegte Spiegel [376, 377] oder aber die spiral- oder kreisförmige Bewegung des als Apertur dienenden Lichtwellenleiters mittels eines Vier-Quadranten-Piezoaktors [378]. Insbesondere die erstgenannten Varianten unter Verwendung einer oder mehrerer, modifizierter Nipkow-Scheiben sind von großer Relevanz und werden ausführlich in [379, 380] beschrieben. Durch Kippen beispielsweise einer Nipkow-Scheibe lässt sich die ansonsten zum Erhalt des axialen Übertragungssignals notwendige axiale Relativbewegung zwischen Sensor und Messobjekt durch eine laterale Relativbewegung und entsprechende Datenverarbeitung substituieren [381]. Es sollte an dieser Stelle jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass die laterale Strahlmodulation besonders hohe Anforderungen an das verwendete Mikroskopobjektiv stellt [382].

Ansätze zur axialen Strahlmodulation nutzen einstellbare Spiegel [383–385], transparente Platten unterschiedlicher Dicke [352] sowie an Stimmgabeln [386] oder Piezoelementen [174] angebrachte oder in ihrer Brechkraft veränderliche Linsen [378, 387–391]. Wie aus einem ausführlichen und aktuellen Vergleich solcher Linsen hervorgeht [392], erreicht eine akustisch modulierbare Gradienten-Index (*tunable acoustic gradient index*, TAG)-Linse [393] die höchste Geschwindigkeit der Strahlmodulation. Erstmals wurde eine solche Linse in [394] in einer konfokalen Anordnung eingesetzt. Sie findet außerdem Anwendung im am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik aufgebauten fokusabstandsmodulierten Konfokalsensor, welchem der nächste Abschnitt gewidmet ist.

2.8 Fokusabstandsmodulierter Konfokalsensor

In diesem Abschnitt wird auf den am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik aufgebauten und in die NMM-1 integrierten [S1], hochfrequent fokusabstandsmodulierten Konfokalsensor [174, P6] eingegangen. Aufgrund der in [174] zu findenden, ausführlichen Beschreibung des Sensorsystems, findet sich im ersten Teil dieses Abschnitts lediglich eine kompakte Darstellung des optischen Aufbaus und dessen Modellierung. Im zweiten Teil wird auf die in Kombination mit der Fokusabstandsmodulation notwendige Signalauswertung eingegangen.

2.8.1 Aufbau und Modellierung

In Bild 13 ist der Sensor schematisch dargestellt. Er besteht aus einem Helium-Neon-Laser (1) mit $\lambda_L \approx 633 \text{ nm}$ und einer pin-Fotodiode (4), welche mittels zweier Sammellinsen (3 und 5) mit einem Schmalband-Monomode-Lichtwellenleiter mit integriertem Strahlteiler mit einem Teilungsverhältnis von 50:50 (6) verbunden sind. Der optische Isolator (2) verhindert, dass vom Messobjekt (12) reflektiertes Licht zurück in den Laser gelangt und Störungen der Laserleistung verursacht. Der eine Teil des Lichts wird vom Lichtwellenleiter auf ein optisches Leistungsmessgerät (7) geführt und dient dort der Einstellung der Einkopplung des Laserlichts. Der andere Teil wird mittels einer Sammellinse (8) kollimiert und von der TAG-Linse (9) sinusförmig mit einer Modulationsfrequenz ν_m von ca. 70 kHz alternierend in einen konvergierenden und einen divergierenden Strahl moduliert. Dies bewirkt aufgrund des auf unendlich korrigierten, 100x Mikroskopobjektivs (12) mit einem erweiterten Arbeitsabstand von 4,5 mm und $A_N = 0,8$ eine axiale Modulation des Fokuspunkts (24) mit gleicher Frequenz. Der Strahlteiler (10) ermöglicht die Integration eines bildgebenden Systems (21), bestehend aus Sammellinse (14) und Kamera (15) sowie einer Köhler'schen Beleuchtung (16-19, benannt nach AUGUST KÖHLER [395]). Die zur Beleuchtung notwendige Weißlichtquelle (23) ist über einen Lichtwellenleiter (20) mit dem Messkopf (22) verbunden. Die beiden Lichtwellenleiter ermöglichen es, die Lichtquellen sowie die Signalerfassung und -auswertung räumlich vom Messkopf zu trennen und bei Integration des Sensors in die NMM-1 außerhalb der Temperierhaube zu positionieren. [174, P6]

Bei diesem fasergekoppelten Konfokalsensor übernimmt die Apertur des Lichtwellenleiters die Funktion der Lochblenden (vgl. Bild 11, Nr. 2 und 6). Bei ausgeschalteter TAG-Linse lässt sich der Sensor als klassisch konfokaler Punktsensor betreiben. Die theoretischen Grundlagen zur Modellierung eines fasergekoppelten Konfokalsensors sind in [396, 397] beschrieben. Weiterhin ist in [398] eine ausführliche Herleitung der Signaleffizienz bei einem

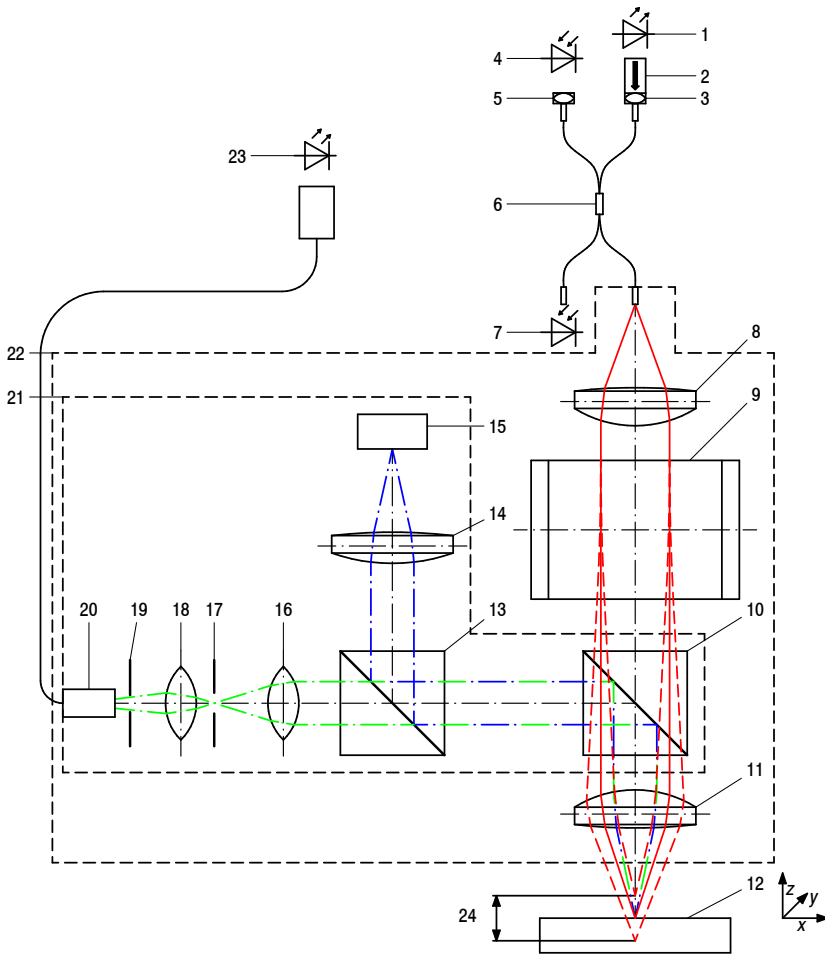


Bild 13: Schematische Darstellung des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors: 1 Laser; 2 optischer Isolator; 3 Sammellinse; 4 pin-Fotodiode; 5 Sammellinse; 6 Lichtwellenleiter mit Strahlteiler; 7 Leistungsmessgerät; 8 Sammellinse; 9 TAG-Linse; 10 Strahlteiler; 11 Mikroskopobjektiv; 12 Messobjekt; 13 Strahlteiler; 14 Sammellinse; 15 Kamera; 16 Kondensator; 17 Leuchtfeldblende; 18 Kollektor; 19 Aperturblende; 20 Lichtwellenleiter; 21 bildgebendes System; 22 Messkopf; 23 Weißlichtquelle; 24 modulierter Fokuspunkt. [P7]

solchen Sensor zu finden. Demnach lässt sich der sowohl für das axiale Übertragungssignal als auch die kohärente Transferfunktion entscheidende dimensionslose Parameter

$$\Gamma = \left[2\pi \frac{r_M \tau}{\lambda_L f_S} \right]^2 \quad (12)$$

aus dem Radius der Öffnungspupille des Mikroskopobjektivs r_M , der Brennweite der sich vor der Faser befindlichen Sammellinse f_S (Nr. 8 in Bild 13) und der Spotgröße der Faser τ errechnen. Letztere ergibt sich wiederum nach

$$\tau = r_F \cdot \left[2 \ln \left(\frac{2\pi r_F A_N}{\lambda_L} \right) \right]^{-1/2} \quad (13)$$

aus dem Kernradius r_F und A_N der Faser. Für den vorliegenden, fokusabstandsmodulierten Konfokalsensor wurde in [174] ein Wert von 5,5 für Γ errechnet. Mit Γ lässt sich das axiale Übertragungssignal eines fasergekoppelten Konfokalsensors für ein ebenes Messobjekt nach

$$I_{\Gamma \neq 0}(\gamma_a) = \left| \frac{\Gamma \{1 - \exp[-(\Gamma - j\gamma_a)]\}}{[1 - \exp(-\Gamma)](\Gamma - j\gamma_a)} \right|^2 \quad (14)$$

errechnen, wobei diese Formel für $\Gamma = 0$ in Formel 8 übergeht. Entsprechend bleiben auch bei dieser Modellierung Aberrationen unberücksichtigt. [174, 396]

In Bild 14 ist das sich damit ergebende, axiale Übertragungssignal ($I_{\Gamma=5,5}$, Formel 14) sowie zum Vergleich das Übertragungssignal eines Konfokalsensors mit infinitesimal kleiner Blende ($I_{\Gamma=0}$, Formel 8) für $\lambda_L = 633 \text{ nm}$, $A_N = 0,8$ und $n = 1$ dargestellt. Weiterhin dargestellt ist das für den in die NMM-1 integrierten Sensor gemessene Fotodiodensignal U_{FD} als Mittelwert von 25 wiederholten Messungen. Die Halbwertsbreite (*full width at half maximum*, FWHM) beträgt für $I_{\Gamma=0}$ $0,7 \mu\text{m}$ und erhöht sich für $I_{\Gamma=5,5}$ auf $1,4 \mu\text{m}$. Dieser theoretische Wert passt wiederum gut zum für U_{FD} gemessenen Wert von $1,5 \mu\text{m}$. Insgesamt lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen theoretisch und empirisch ermitteltem Signal feststellen. Die im gemessenen Signal vorhandene Asymmetrie ist möglicherweise auf Aberrationen innerhalb des optischen Aufbaus zurückzuführen [399–401].

2.8.2 Signalauswertung

Das Einschalten der TAG-Linse bewirkt eine sinusförmige Modulation des Fokusabstands mit der Modulationsfrequenz ν_m . Das entsprechend modulierte Signal der Fotodiode U_{FD} lässt sich durch Anwendung der Lock-in-Verstärkung demodulieren. Hierzu wird der Lock-in-Verstärker HF2LI der

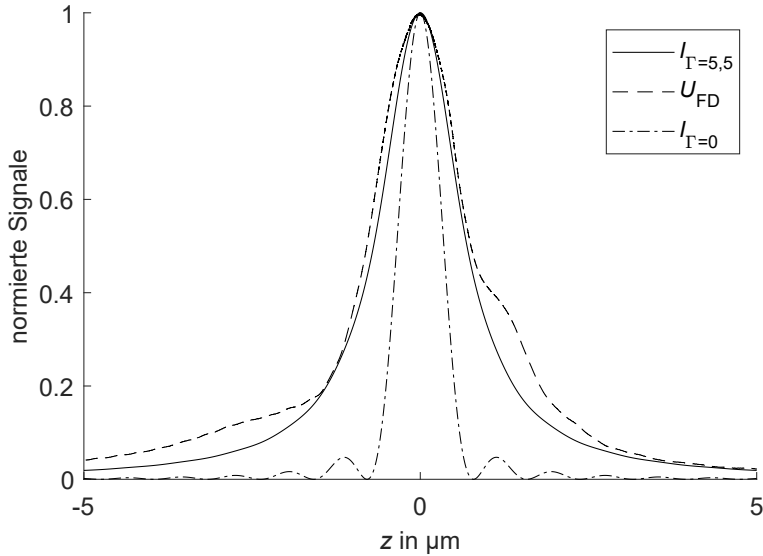


Bild 14: Errechnetes ($I_{\Gamma=5,5}$) und gemessenes (U_{FD}) axiales Übertragungssignal des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors. Zum Vergleich ist das axiale Übertragungssignal eines Konfokalsensors mit infinitesimal kleiner Blende ($I_{\Gamma=0}$) dargestellt. Bild modifiziert nach [174].

Firma Zurich Instruments, Schweiz, verwendet, welcher den Sinusanteil der Schwingung nach

$$X(t^*) = \frac{Z}{NT_m} \cdot \sum_{t=t^*-NT_m}^{t^*} U_{FD}(t) \cdot \sin(2\pi h\nu_m t), \quad (15)$$

sowie den Cosinusanteil der Schwingung nach

$$Y(t^*) = \frac{Z}{NT_m} \cdot \sum_{t=t^*-NT_m}^{t^*} U_{FD}(t) \cdot \cos(2\pi h\nu_m t) \quad (16)$$

in Abhängigkeit der Zeit t errechnet. Die Funktionsweise des Lock-in-Verstärkers ist detailliert in [402] beschrieben. Die Auswertung erfolgt mit der zweiten ($h = 2$) und dritten ($h = 3$) Harmonischen von ν_m . Für $h = 2$ wird der Cosinusanteil, für $h = 3$ der Sinusanteil der Schwingung ausgewertet. Der Verstärkungsfaktor Z dient der Anpassung der Signale an den Eingangsspannungsbereich der Analog-Digital-Umsetzer (ADU) der NMM-1. Die Summenbildung über ein ganzzahliges Vielfaches N der Periodendauer der Modulation T_m erfolgt, um die Signale auf eine Grenzfrequenz von 3 kHz

zu begrenzen, was angesichts einer maximalen Samplingrate der ADUs der NMM-1 von 6,25 kHz sinnvoll ist. [174, P6]

Bei Integration des Sensors in die NMM-1 erfolgt die Kalibrierung der Sensorsignale gegen das z-Interferometer derselben. Das Vorgehen ist anhand eines Beispiels in Bild 15 dargestellt. In diesem sind oben die für die axiale Abtastung eines ebenen Spiegels erhaltenen Sensorsignale $X_{h=3}$ und $Y_{h=2}$ ersichtlich. $X_{h=3}$ weist in einem gewissen Bereich um $z_{\text{NMM}} = 0$ herum eine lineare Abhängigkeit zum Abstand zur Messobjektoberfläche auf, wobei sich dieser Bereich mittels $Y_{h=2}$ und des Schwellwerts $S_{n,h=2}$ identifizieren lässt. Die Datenpunkte dieses eingeschränkten Bereichs sind in Bild 15, unten, dargestellt. Die Kalibrierkurve des Konfokalsensors ließe sich als $z_{\text{KS}}(X_{h=3})$ durch Anpassen eines Polynoms an die in diesem Bereich liegenden Datenpunkte errechnen. U_{FD} , und somit auch $X_{h=3}$ und $Y_{h=2}$ hängen jedoch nicht nur vom axialen Abstand des Sensors und der Messobjektoberfläche, sondern auch von den Reflexionseigenschaften derselben ab. Demgegenüber ist der Quotient $X_{h=3} / Y_{h=2}$ unabhängig von diesen Reflexionseigenschaften, sodass die Kalibrierkurve des Konfokalsensors als $z_{\text{KS}}(X_{h=3} / Y_{h=2})$ errechnet wird. In Bild 15, unten, ist dieser Quotient auf der rechten Ordinate aufgetragen. Da insbesondere an den Rändern größere Abweichungen des Polynoms zu den gemessenen Werten zu erwarten sind, schränkt der zweite Schwellwert $S_{h,h=2}$ den Messbereich noch etwas ein, indem er die Grenzen des zulässigen Quotienten, $\max_{3/2}$ und $\min_{3/2}$, festlegt. Der Messbereich des Sensors beträgt somit etwas mehr als 600 nm. Nach der Durchführung von Messungen werden Messwerte, für welche der Quotient $X_{h=3} / Y_{h=2}$ außerhalb dieser Grenzen liegt, sowie Messwerte, für welche $Y_{h=2}$ weniger als die Hälfte des auf einer ebenen Oberfläche gemessenen Maximalwerts beträgt, zurückgewiesen. Untersuchungen zur unter idealen Messbedingungen erreichbaren Präzision der Kalibrierkurve finden sich in [P4]. In [P8] wurde eine im Feld programmierbare Gatteranordnung (*field programmable gate array*, FPGA) genutzt, um auf dieser die Lock-in-Verstärkung sowie eine echtzeitfähige Quotientenbildung zu implementieren. Aufgrund der höheren Genauigkeit der ADUs des Lock-in-Verstärkers HF2LI der Firma Zurich Instruments, Schweiz, kommt im Rahmen dieser Arbeit jedoch dieser zum Einsatz und die Quotientenbildung erfolgt in Ermangelung der Möglichkeit, diese in Echtzeit auf diesem Lock-in-Verstärker durchzuführen, erst im Nachgang.

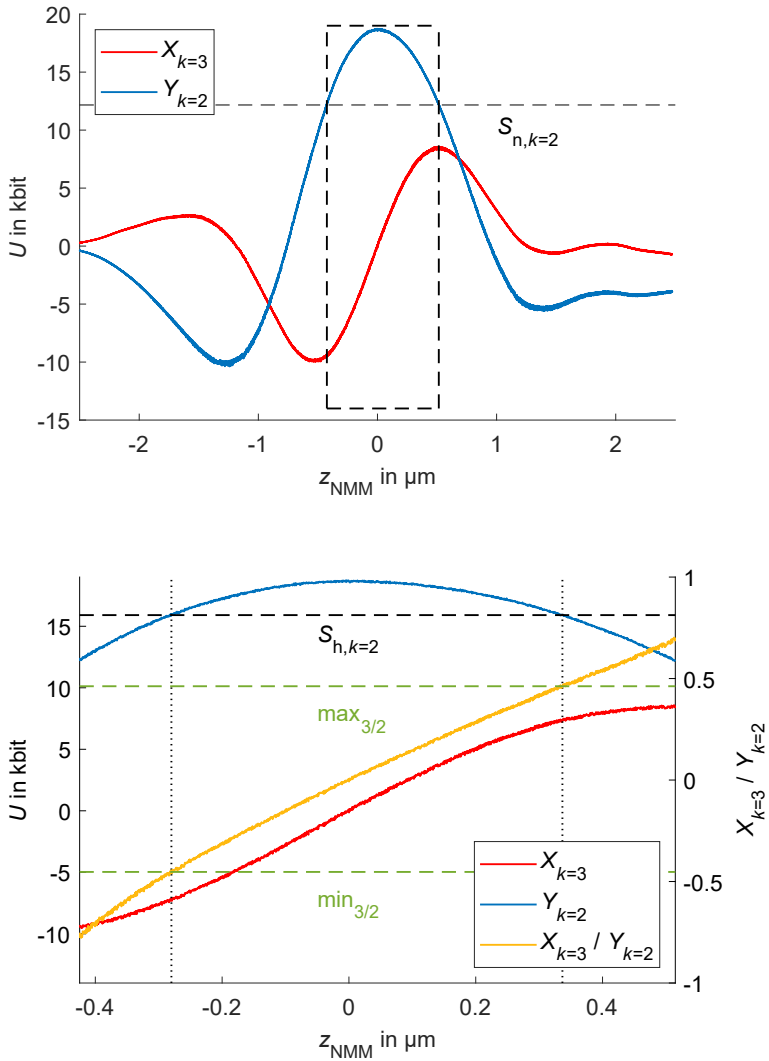


Bild 15: Oben: Für die axiale Abtastung eines ebenen Spiegels erhaltenen Sensorsignale. Unten: Sensorsignale sowie der aus diesen errechnete Quotient $X_{h=3}/Y_{h=2}$ innerhalb des durch $S_{n,h=2}$ beschränkten Bereichs. Zu Illustrationszwecken wurde den z_{NMM} -Werten ein Offset hinzugefügt. Bild modifiziert nach [P7].

3 Handlungsbedarf und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird zunächst auf Grundlage des im vorangegangenen Kapitel dargestellten Stands der Technik noch bestehender Handlungsbedarf abgeleitet, um anschließend die Zielstellung dieser Arbeit zu konkretisieren.

3.1 Handlungsbedarf

In Abschnitt 2.2 wurde die Kategorisierung der Messsysteme der FMT und darauf aufbauend die metrologische Lücke hinsichtlich hochauflösender, nanometrologischer 3D-KMS dargestellt. Wie in den Abschnitten 2.3 und 2.4 erläutert wurde, ist diese Lücke nicht auf das Fehlen entsprechender Positioniersysteme, sondern auf das Fehlen geeigneter Sensoren zurückzuführen, wobei die mikrotaktilen Tastsysteme als die Sensoren identifiziert wurden, welche bisher am meisten zur Schließung dieser Lücke beitragen konnten und durch weitere Verbesserungen potentiell zukünftig noch weiter können. Die beiden Hauptproblemfelder der mikrotaktilen Antastung, nämlich die nicht hinreichend genau bekannte Grobgestalt der Tastkugel sowie der nicht hinreichend verstandene Einfluss anziehender Kräfte auf die Antastung, wurden in Abschnitt 2.5 eingehend analysiert.

Zur Ermittlung der bei mikrotaktilen Tastsystemen aufgrund der nicht zu vernachlässigenden Formabweichungen der Tastkugel sowie der möglichen Anisotropie des Tasterschafts antastrichtungsabhängigen wirksamen Tastkugeldurchmesser ist ein zur Einmessung dienender und von hinreichend vielen Seiten antastbarer, nanometrologischer Referenzkörper notwendig. Das Adjektiv „nanometrologisch“ impliziert, dass die Grobgestalt dieses Körpers hochgenau charakterisiert sein muss, um die sich daraus ergebenden Abweichungen auf die empirisch ermittelten wirksamen Tastkugeldurchmesser zu korrigieren. Weiterhin muss die hochgenaue Referenzierung des Referenzkörpers im Koordinatensystem des μ -3D-KMS möglich sein. Denn aufgrund der hervorragenden Präzision der mikrotaktilen Tastsysteme sowie der im einstelligen Nanometerbereich liegenden Unsicherheit der Positioniersysteme hängt die Genauigkeit der durch Einmessung bestimmten antastrichtungsabhängigen wirksamen Tastkugeldurchmesser hauptsächlich von der Genauigkeit der Charakterisierung des Referenzkörpers sowie der Genauigkeit der Referenzierung desselben ab.

Auch für empirische Untersuchungen zur Erlangung eines tieferen Verständnisses der aufgrund anziehender Kräfte bei der mikrotaktilen Antastung stattfindenden Wechselwirkungen, entweder um die sich daraus ergebenden Unsicherheitsbeiträge korrekt zu errechnen, oder aber auch zu reduzieren,

sind μ -3D-KMS aufgrund ihrer Präzision prinzipiell ideal geeignet. Voraussetzung ist jedoch die Beherrschung entscheidender Einflussfaktoren, etwa der Feingestalt sowohl der Tastkugel als auch der Messobjektoberfläche. Entsprechend gleichlautend sind die Voraussetzungen zur Behebung der beiden Hauptproblemfelder der mikrotaktilen Antastung die nanometrologische Charakterisierung mikrodimensionaler Referenzkörper bzw. der Tastkugel selbst, sowohl hinsichtlich der Grobgestalt als auch der Feingestalt.

In Abschnitt 2.6 wurde der Stand der Technik hinsichtlich hierfür potentiell geeigneter Verfahren vorgestellt und weiterer Handlungsbedarf festgestellt. Denn bezüglich der Charakterisierung der Grobgestalt eines mikrodimensionalen Referenzkörpers sind zwar Verfahren vorhanden, diese sind jedoch oftmals sehr aufwändig bzw. aufgrund der taktilen Antastung auch relativ langsam. Weiterhin sind zur Verifizierung bestehender Messverfahren, wie dies ganz allgemein bereits zum Ende des Unterabschnitts 2.1.2 dargelegt wurde, alternative Verfahren notwendig, welche nicht auf der Verwendung mikrotaktile Tastsysteme beruhen, um eine zirkuläre Rückführungskette zu vermeiden [260]. Optische Messverfahren erlauben aufgrund des Messprinzips eine schnellere Messung und umgehen weiterhin aufgrund der Erfassung der elektromagnetischen Oberfläche die Problematik der elastischen oder gar plastischen Verformung des Messobjekts. Allerdings ist die Aufnahme von Messpunkten im Allgemeinen auf eine Hemisphäre bzw. sogar lediglich auf einen relativ kleinen Teil dieser Hemisphäre beschränkt, sodass eine korrekte Trennung von Formabweichung und Maß der Kugel nicht sichergestellt werden kann. Das im Zuge der Neudefinition des Kilogramms entwickelte Verfahren ist bei größeren Formabweichungen, wie sie bei mikrodimensionalen Kugeln zu erwarten sind, aufgrund dann zu erwartender Signalabbrüche nur bedingt anwendbar. Eine Ausnahme des eben Gesagten ist die bidirektionale optische Messung einer mikrodimensionalen Kugel unter Zuhilfenahme eines Spiegels. Jedoch fehlen hinsichtlich dieses vielversprechenden Verfahrens Untersuchungen zu möglichen systematischen Messabweichungen, welche sich beispielsweise aufgrund der Messung einer gekrümmten Oberfläche mit variabler Oberflächennormalen bzw. der sich bei der Messung des Spiegels und der gespiegelten Kugel im Strahlengang befindlichen realen Kugel ergeben könnten.

Die zur Bestimmung der Feingestalt in Unterabschnitt 2.6.2 gezeigten und auf dem Prinzip der Rasterkraftmikroskopie beruhenden Verfahren sind zwar ebenfalls vielversprechend, bedürfen jedoch im Fall des Ansatzes der TU Ilmenau einer Erweiterung um eine Rotationsachse zur Charakterisierung der gesamten Kugel und nicht nur, wie bisher, eines einzelnen Umfangs bzw. im Fall des Ansatzes der *Hefei University of Technology* eines weiteren Verfahrens zur Verifizierung der angegebenen Messunsicherheit. Prinzipi-

ell ließe sich das am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik aufgebaute und in die Rotationskinematik integrierte SFM, welches in Unterabschnitt 2.4.1 dargestellt wurde, ebenfalls zur Bestimmung der Feingestalt mikrodimensionaler Referenzkörper nutzen. Durch Austausch der ersten Rotationsachse der Rotationskinematik (vgl. Bild 4) durch eine Rotationsachse mit einem Bewegungsbereich von 360° wäre sogar die Bestimmung der Feingestalt des Referenzkörpers in nur einer Aufspannung möglich. Hinsichtlich des Erreichens der geforderten Genauigkeit sind allerdings Zweifel angebracht. Denn im Allgemeinen ist ein metrologisches SFM möglichst kompakt und aus Materialien mit einem möglichst niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufgebaut [190, 403]. Demgegenüber führt die Rotationskinematik zu einer erheblichen Vergrößerung des metrologischen Kreises mit Materialien mit einem vergleichsweise hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Der Betrieb des Messsystems in einer sehr temperaturstabilen Haube ist daher unabdingbar, führt jedoch aufgrund der außerhalb der Haube positionierten Signalauswertung zu langen Signalwegen, was wiederum die erreichbare Messpräzision entscheidend verschlechtern könnte. Vor einer möglichen Anwendung bzw. Umgestaltung dieses Messsystems müssen daher zunächst die metrologischen Eigenschaften desselben bestimmt und, sofern nötig und möglich, verbessert werden, um anhand dieser Ergebnisse die prinzipielle Eignung dieses Messsystems bzw. einer Weiterentwicklung desselben zur Charakterisierung der Feingestalt mikrodimensionaler und nanometrologischer Referenzkörper zu evaluieren.

3.2 Zielsetzung

Als erstes Ziel dieser Arbeit sollen die metrologischen Eigenschaften des in Unterabschnitt 2.4.1 dargestellten SFM mit einstellbarer Antastrichtung bestimmt werden. Weiterhin soll untersucht werden, inwiefern es möglich ist, durch eine Umgestaltung des Sensorkopfs zur Beseitigung einiger potentiell instabiler Verbindungen aus dem Messkreis diese Eigenschaften zu verbessern. Eine solche Verbesserung könnte sich außerdem durch die Verwendung eines sowohl selbstsensierenden als auch selbstaktuierenden Cantilevers erzielen lassen, da ein solcher die Entfernung des ansonsten zur Schwingungsanregung notwendigen, aber ggf. ein Kriechverhalten aufweisenden Piezoaktors aus dem Messkreis erlaubt. Die Untersuchungen dienen letztendlich der Bewertung der potentiellen Eignung des Messsystems bzw. einer etwas modifizierten Variante desselben zur Charakterisierung der Feingestalt nanometrologischer Referenzkörper. Zusammengefasst sind somit hinsichtlich dieser rasterkraftmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper vier Fragestellungen zu beantworten:

- Was sind die metrologischen Eigenschaften des SFM mit einstellbarer Antastrichtung?
- Lassen sich diese Eigenschaften durch Umgestaltung des Sensorkopfs unter Beseitigung potentiell instabiler Verbindungen im Messkreis verbessern?
- Lassen sich diese Eigenschaften durch Verwendung eines selbstsensierenden und selbstaktuierenden Cantilevers und unter Beseitigung des Piezoaktors aus dem Messkreis verbessern?
- Ist eines der Messsysteme bzw. eine etwas modifizierte Variante desselben potentiell zur Charakterisierung der Feingestalt nanometrologischer Referenzkörper geeignet?

Der Beantwortung dieser Fragen ist Kapitel 4 gewidmet.

Das zweite Ziel der Arbeit ist die Bewertung der Genauigkeit der bidirektionalen optischen Messung der Grobgestalt eines nanometrologischen Referenzkörpers unter Zuhilfenahme eines Spiegels, am Beispiel einer mikrodimensionalen Kugel. Hierbei ist insbesondere zu untersuchen, inwiefern es aufgrund der bei einer Kugelmessung unvermeidbaren Messung einer gekrümmten Oberfläche mit variabler Oberflächennormalen bzw. der sich teilweise im Strahlengang befindlichen Kugel zu systematischen Messabweichungen kommt. Für diese Untersuchungen steht der in Abschnitt 2.8 dargestellte Konfokalsensor zur Verfügung, welcher aufgrund der Möglichkeit, den Fokusabstand zu modulieren eine Reihe alternativer Betriebsmodi bietet. Es soll daher untersucht werden, inwiefern dieser Konfokalsensor bei klassisch konfokaler Betriebsweise oder aber mittels eines alternativen Betriebsmodus zur Charakterisierung der Grobgestalt nanometrologischer Referenzkörper geeignet ist. Daran angelehnt ist zu untersuchen, inwiefern es signifikante Unterschiede des Betriebs mit und ohne Fokusabstandsmodulation hinsichtlich der topographisch räumlichen Auflösung gibt. Zusammengefasst sind somit hinsichtlich der konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper ebenfalls vier Fragestellungen zu beantworten:

- Unterscheidet sich der Betrieb des Konfokalsensors mit und ohne Fokusabstandsmodulation hinsichtlich der topographisch räumlichen Auflösung?
- Kommt es bei der Messung an variablen Oberflächennormalen in den unterschiedlichen Betriebsmodi zu systematischen Abweichungen?
- Kommt es bei der bidirektionalen Messung zu systematischen Abweichungen aufgrund der sich im Strahlengang befindlichen Kugel?
- Ist zumindest einer der Betriebsmodi des Konfokalsensors zur Charakterisierung der Grobgestalt nanometrologischer Referenzkörper geeignet?

Der Beantwortung dieser Fragen ist Kapitel 5 gewidmet.

4 Untersuchungen zur rasterkraftmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper¹

Das in diesem Kapitel zu untersuchende SFM mit einstellbarer Antastrichtung wurde im Wesentlichen bereits in Kapitel 2 dargestellt. In diesem Kapitel werden zunächst der Aufbau und der Signalfluss des bestehenden Sensorsystems näher erläutert, um anschließend die Ermittlung von dessen metrologischen Eigenschaften darzustellen. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird in Abschnitt 4.2 ein umgestalteter Sensorkopf, welcher einige potentiell instabile Verbindungen aus dem Messkreis entfernt, sowie dessen Evaluation vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 4.3 Messungen mit einem sowohl selbstsensierenden als auch selbstaktuierenden Cantilever dargestellt, da die Verwendung eines solchen Cantilevers Messungen im intermittierenden Messmodus auch ohne Piezoaktor erlaubt. In Abschnitt 4.4 werden die bis dahin erzielten Ergebnisse zusammengefasst und weiterhin eine mit dem Sensorsystem durchgeführte Applikationsmessung unter Verwendung der Einstellbarkeit der Antastrichtung dargestellt. Im abschließenden Fazit wird die potentielle Eignung des Messsystems bzw. einer etwas modifizierten Variante desselben zur Charakterisierung der Feingestalt mikrodimensionaler Kugeln und anderer Messobjekte bewertet.

Sämtliche Messungen fanden in der bereits erwähnten Temperierhaube mit einer langzeitlichen Temperaturstabilität von 17 mK statt, wobei die Temperatur, sofern nicht anders angegeben, auf 20,00 °C eingestellt war. Bei Verwendung eines neuen Cantilevers kommt es vorwiegend zu Beginn zu einer stärkeren Abnutzung desselben [216]. Damit sich hieraus ergebende Abweichungen nicht auf die ermittelten metrologischen Eigenschaften des Sensorsystems auswirken, wurden nach Installation eines neuen Cantilevers zunächst einige Messungen durchgeführt, ohne diese auszuwerten. Als Messobjekt diente das **Kalibriernormal** (VIM, 5.12) TGZ₁ der Firma NT-MDT®, Russland, Typ PPR nach DIN EN ISO 25178-70 [404] mit einer nominalen Rillentiefe von $(21,4 \pm 1,5)$ nm und einer nominalen Formperiode von $(3,0 \pm 0,01)$ µm.

¹ Inhalte dieses Kapitels wurden bereits in [P5, P9, P10, S2] veröffentlicht.

4.1 Aufbau und metrologische Eigenschaften des Sensorsystems

Der Aufbau der in die NMM-1 integrierten Rotationskinematik ist in Bild 4, der Sensorhalter detailliert in Bild 8 dargestellt. Die im Folgenden verwendete Nummerierung bezieht sich auf Bild 8.

4.1.1 Aufbau und Signalfluss

Die zur Integration des SFM in die Rotationskinematik notwendige Flexibilität wird durch die Verwendung eines selbstsensierenden Cantilevers (4) erreicht. Es handelt sich hierbei um einen *Piezo-Resistive Sensing (PRS)* Cantilever der Firma SCL-Sensor.Tech. Fabrication, Österreich, mit einer Länge von 110 μm , einer Breite von 48 μm sowie einer Silizium-Spitze mit einem Radius von unter 15 nm. Die Integration eines solchen selbstsensierenden Cantilevers in die NMM-1, wenngleich ohne Rotationskinematik, wurde bereits in [405] gezeigt. Zur Schwingungsanregung wird ein Miniatur-Multilayer-Piezoaktor (2) PICMA® PL055.31 der Firma PI Ceramic, Deutschland, eingesetzt. Die Schwingungsanregung erfolgt über das Festkörpergelenk (3).

Die Signalauswertung wird mittels des Lock-in-Verstärkers HF2LI der Firma Zurich Instruments, Schweiz, durchgeführt. Der Signalfluss ist schematisch in Bild 16 dargestellt, wobei einer elektrischen Spannung der Buchstabe U zugeordnet ist. Der Lock-in-Verstärker erzeugt ein sinusförmiges Referenzsignal U_{Ref} mit der Frequenz ν_{Ref} , welches mittels einer stromgegengekoppelten Verstärkerschaltung auf Basis des LT1206 der Firma Analog Devices, USA, impedanzgewandelt wird (U_{Piezo}) und den Piezoaktor mit etwa der Resonanzfrequenz des Cantilevers zur Schwingung anregt. Das Biegunessignal des Cantilevers wird mittels des kommerziellen Vorverstärkers der Firma SCL-Sensor.Tech. Fabrication, Österreich, verstärkt und als U_{SFM} dem Lock-in-Verstärker zugeführt. Dieser digitalisiert U_{SFM} mittels eines Analog-Digital-Umsetzers (ADU) und berechnet die phasenunabhängige Schwingungsamplitude

$$R_{\text{SFM}}(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2} + C \quad (17)$$

in Abhängigkeit der Zeit t aus dem Sinusanteil der Schwingung X (vgl. Formel 15) und dem Cosinusanteil der Schwingung Y (vgl. Formel 16). Der Offset C dient der Anpassung von R_{SFM} an den Eingangsspannungsbereich des ADU der NMM-1. Errechnet wird die erste Harmonische der Schwingung ($h = 1$). Ein Digitaler Signalprozessor (*digital signal processor*, DSP), welcher die NMM-1 steuert, nutzt R_{SFM} zur Regelung des Abstands zwischen Cantilever und Messobjekt durch Verfahren der Stage in Richtung des im

Messbefehl spezifizierten Antastvektors \vec{p} . Entsprechend werden Messungen im intermittierenden, scannenden Messmodus durchgeführt.

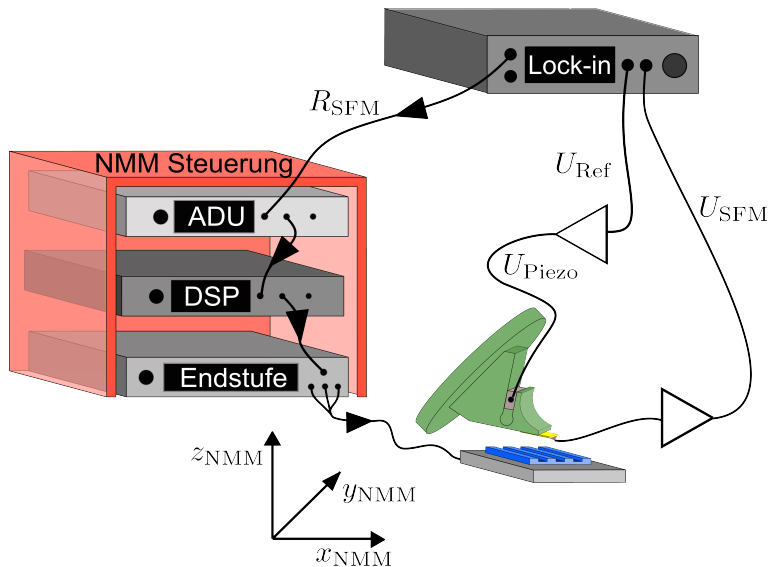


Bild 16: Schematische Darstellung des Signalflusses. Bild modifiziert nach [P9].

4.1.2 Metrologische Eigenschaften

Die im Folgenden empirisch ermittelten metrologischen Eigenschaften des Messsystems lassen sich in die drei Bereiche Wiederholpräzision, **Vergleichspräzision** (VIM, 2.23) sowie Messungen am Kalibriernormal einteilen.

Wiederholpräzision

Die Kalibrierkurve des SFM wurde gegen ein Laserinterferometer der NMM-1 aufgenommen. Hierzu war die zweite Achse der Rotationskinematik auf Position null, sodass die Kalibrierkurve gegen das z-Interferometer aufgenommen wurde. Das Messobjekt wurde mit einer Geschwindigkeit von 100 nm s^{-1} an den Cantilever herangefahren, bis dessen Schwingungsamplitude auf null abgesunken war. Gleichzeitig wurde R_{SFMM} sowie die Längenwerte des z-Interferometers der NMM-1 z_{NMM} mit einem Punktabstand von $0,1 \text{ nm}$ aufgenommen. Ein entsprechendes **Kalibrierdiagramm** (VIM, 4.30) ist in Bild 17 dargestellt. Zur Berechnung der Kalibrierkurve $d_{\text{SFMM}}(R_{\text{SFMM}})$, wobei d_{SFMM} die Auslenkung des Cantilevers ist, wird ein kubisches Polynom an die zwischen den beiden gestrichelten, horizontalen Linien liegenden Messpunkte gefittet. Der Messbereich des SFMs ist somit etwas geringer als die freie

Schwingungsamplitude des Cantilevers und liegt im gezeigten Beispiel bei 79 nm.

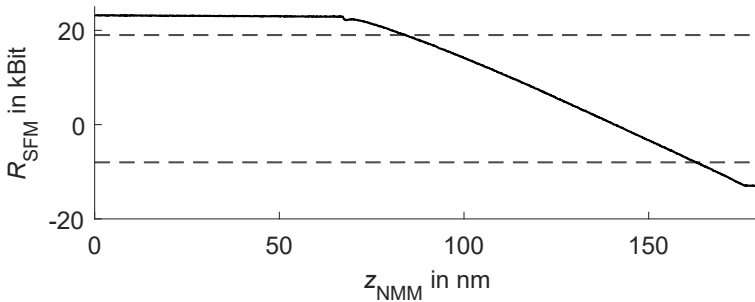


Bild 17: Gemessenes Kalibrierdiagramm. Die Kalibrierkurve wird für die zwischen den beiden gestrichelten, horizontalen Linien liegenden Messpunkte errechnet. Zu Illustrationszwecken wurde den z_{NMM} -Werten ein Offset hinzuaddiert.

Durch wiederholte Durchführung dieser Kalibrieroutine während eines kurzen Zeitraums lässt sich die Wiederholpräzision des Messsystems ermitteln. Während eines Zeitraums von ca. zwei Minuten wurde die Kalibrieroutine fünfzigmal wiederholt. In Bild 18 sind die Abweichungen

$$\Delta_z = d_{\text{SFEM}}(R_{\text{SFEM}}) - z_{\text{NMM}} \quad (18)$$

dargestellt, wobei $d_{\text{SFEM}}(R_{\text{SFEM}})$ mittels der Kalibrierwerte aus der ersten Aufnahme bestimmt wurde. In rot sind die Residuen dieser ersten Kalibrierkurve dargestellt, in blau die Abweichungen der anderen 49 Aufnahmen.

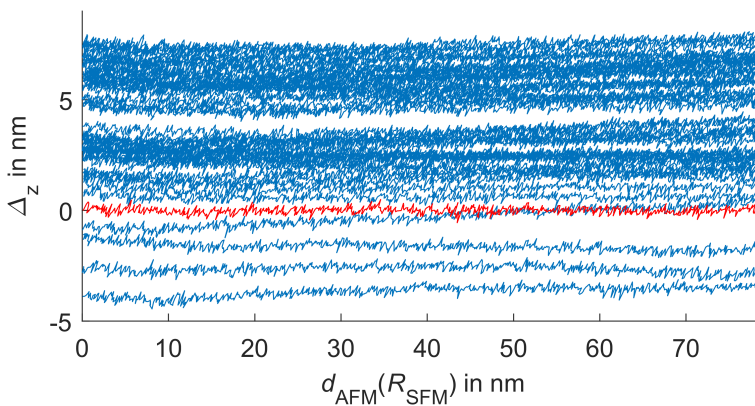


Bild 18: Abweichungen der mittels der Kalibrierkurve errechneten z -Werte zu z_{NMM} für die wiederholte Aufnahme von 50 Kalibrierkurven. Die Residuen der ersten Kalibrierkurve sind in rot dargestellt. Bild modifiziert nach [P5].

Die Wiederholpräzision lässt sich als Standardabweichung σ errechnen, indem alle 50 Kalibrierkurven auf alle Messwerte der 50 Aufnahmen angewandt werden und Δ_z bestimmt wird. In Bild 19 sind die 50 erhaltenen Δ_z als Histogramm dargestellt. Weiterhin ersichtlich ist die als Standardabweichung errechnete Wiederholpräzision σ_{Wp} , deren Wert bei 3,8 nm liegt.

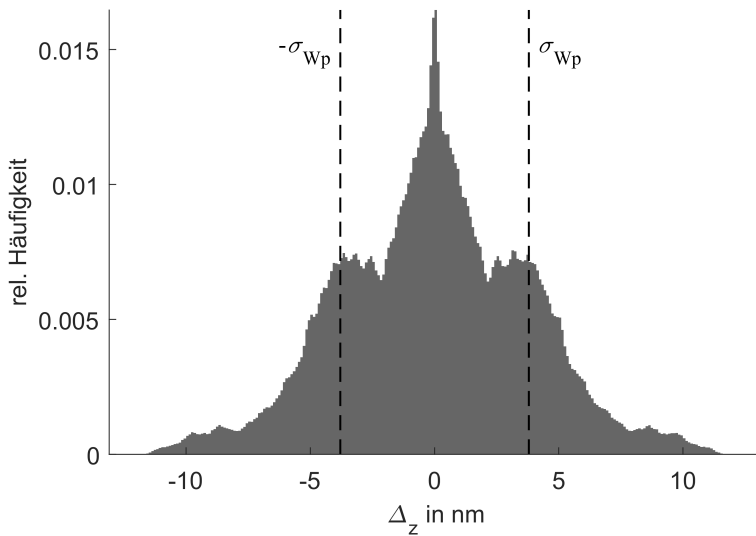


Bild 19: Δ_z als Histogramm dargestellt. Weiterhin dargestellt ist die als Standardabweichung errechnete Wiederholpräzision σ_{Wp} . Bild modifiziert nach [P5].

Wie bereits in Bild 18 ersichtlich wird, resultieren die Abweichungen zwischen den Aufnahmen hauptsächlich aus einer Offsetverschiebung zwischen den Kalibrierkurven. Entsprechend liegt die Standardabweichung des Offsets der 50 Kalibrierkurven bereits bei 2,7 nm. Nach Korrektur dieser Offsetverschiebungen ergibt sich für die Abweichungen das in Bild 20 dargestellte Histogramm mit einer Standardabweichung nach Offsetkorrektur σ_{ok} von 0,4 nm.

Nach Aufnahme der Kalibrierkurve wurde der Regler der NMM-1 aktiviert, um durch entsprechende Bewegung der z-Achse der NMM-1 d_{SFM} in der Mitte des Messbereichs zu halten. In Bild 21 ist das Ergebnis drei solcher Stillstandsmessungen über jeweils 90 s dargestellt, wobei die Messwerte aus den Längenwerten der NMM-1 und d_{SFM} nach

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{NMM} \\ y_{NMM} \\ z_{NMM} \end{bmatrix} + \vec{p} \cdot d_{SFM}(R_{SFM}) \quad (19)$$

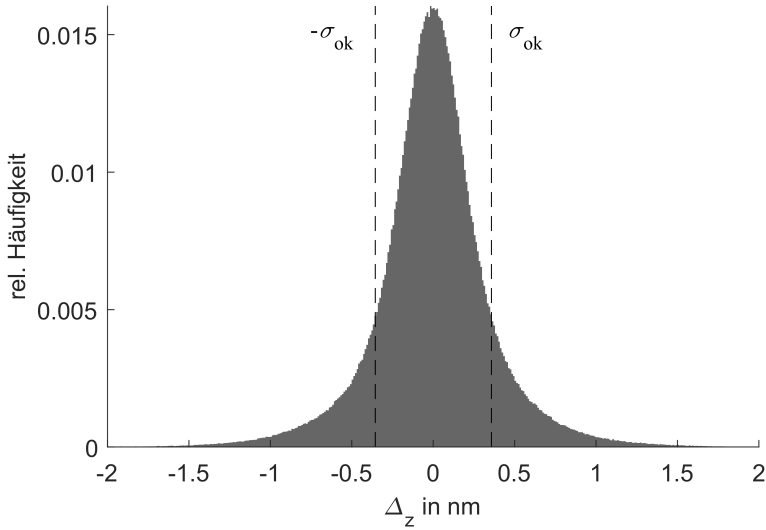


Bild 20: Histogramm der Δ_z der offsetkorrigierten Kalibrierkurven mit der Standardabweichung σ_{ok} .

mit dem Antastvektor $\vec{p} = [0 \ 0 \ 1]^T$ errechnet wurden. Die Messpunktaufnahme erfolgte mit der maximalen Samplingrate der NMM-1. Die Standardabweichungen von z_M liegen bei 1,8 nm, 0,8 nm und 1,3 nm. Mittels

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2} \quad (20)$$

lässt sich aus den $N = 3$ Standardabweichungen die kombinierte Standardabweichung der Stillstandsmessungen $\bar{\sigma}_{ss}$ mit einem Wert von 1,4 nm errechnen. Das noch auf d_{SFM} verbleibende Rauschen hat eine Standardabweichung von jeweils 0,2 nm, was kombiniert für das Rauschen ($\bar{\sigma}_R$) nach Formel 20 ebenfalls 0,2 nm ergibt.

Vergleichpräzision

Aufgrund der sich im metrologischen Kreis befindlichen Rotationskinematik ist eine starke Temperaturabhängigkeit des Messsystems zu erwarten. Um die thermische Sensitivität sowie die Vergleichpräzision des Messsystems zu ermitteln, wurde alle zehn Minuten für 15 s eine Stillstandsmessung durchgeführt und der Offset als Mittelwert der während dieses Zeitraums ermittelten z_M errechnet. Zwischen den Messwertaufnahmen wurde der Cantilever von der Messobjektoberfläche zurückgezogen, um eine mögliche

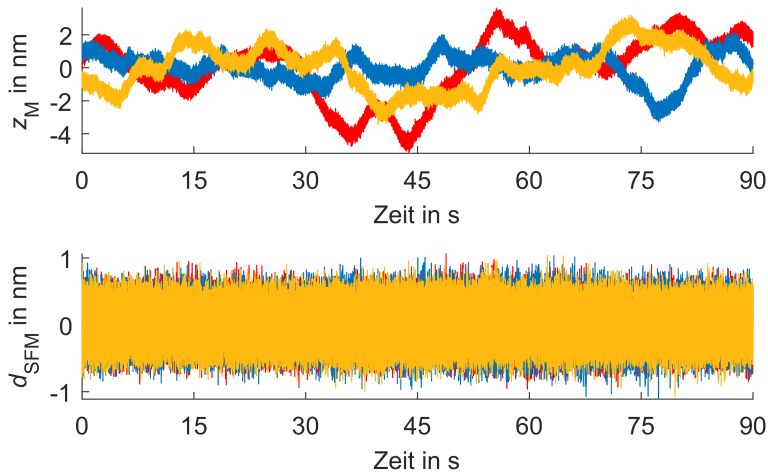


Bild 21: Drei Stillstandsmessungen über jeweils 90 s mit aktivierter Regelung.

plastische Verformung der Cantileverspitze sowie der Messobjektoberfläche zu minimieren. Zunächst wurde die Temperatur auf $20,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gestellt und nach sicherem Erreichen stabiler Messbedingungen mit der Messwertaufnahme begonnen. Parallel dazu wurde die eingestellte Temperatur auf $20,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduziert. In Bild 22 sind die über einen Zeitraum von 30 h erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Es dauert etwa 8 h bis sich der Offset wieder stabilisiert hat. In dieser Zeit hat er sich um ca. 260 nm verändert, was einer thermischen Sensitivität des Messsystems von $1,3\text{ nm mK}^{-1}$ entspricht. Diese ist hauptsächlich auf die Rotationskinematik inklusive Sensorhalter zurückzuführen, welche in z -Richtung eine Länge von etwa 100 mm besitzt. Zwar wirkt sich die Temperaturänderung aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex der Luft auch auf die Längenmessung durch das Interferometer aus, für ein ähnliches Interferometer, wengleich mit einer Totstrecke von null, wurde jedoch eine thermische Sensitivität von lediglich -75 pm mK^{-1} ermittelt [170]. Weiterhin werden temperaturbedingte Veränderungen des Brechungsindex der Luft in der Steuerung der NMM-1 unter Berücksichtigung der Totstrecke korrigiert [28], sodass der überwiegende Anteil der ermittelten thermischen Sensitivität des Messsystems der thermischen Ausdehnung der Rotationskinematik inklusive des Sensorhalters zuzuschreiben ist. Hierfür spricht auch der in diesem Fall aufgrund der Länge erhaltene und plausible Wert von $13 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ für den mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten dieser Komponenten. Nach der Stabilisierung, während der letzten 18 h (in Bild 22, unten, dargestellt), beträgt die Standardabweichung des Offsets und somit die als Standardabweichung ermittelte Vergleichpräzision σ_{vp} $6,7\text{ nm}$.

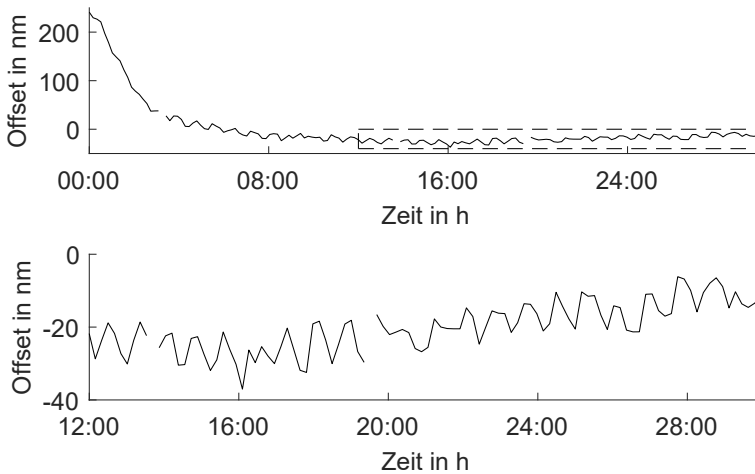


Bild 22: Veränderung des Offsets nachdem die Temperatur von 20,20 °C auf 20,00 °C gestellt wurde. Bild modifiziert nach [P5].

Messungen an einem Kalibriernormal

Um die Fähigkeit des Messsystems zur Messung nanometrologischer Strukturen zu evaluieren, wurden wiederholt Messungen an einem Kalibriernormal durchgeführt. Die Messwerte wurden zunächst im (negierten) Koordinatensystem der NMM-1 nach Formel 19 errechnet und anschließend ins Werkstückkoordinatensystem (WKS) transformiert. Aufgrund der mit der Berechnung von d_{SFM} verbundenen Tiefpassfilterung (vgl. Formeln 15 - 17) sowie unterschiedlicher ADUs für die Aufnahme von d_{SFM} und für die Aufnahme der Interferometersignale, ist eine Latenz zwischen Sensorsignal und den Signalen der Interferometer unvermeidlich [28, P3]. Um die sich aus dieser Latenz ergebenden Effekte zu minimieren, wurde eine Scangeschwindigkeit von lediglich $5 \mu\text{m s}^{-1}$ und ein Punktabstand von 1 nm gewählt. Die Messungen wurden dreißigmal wiederholt an derselben Stelle mit einer Messlänge von $90 \mu\text{m}$ durchgeführt.

Das Kalibriernormal war in der xy -Ebene der NMM-1 platziert und \vec{p} entsprechend $[0 \ 0 \ 1]^T$. Die Rillentiefe wurde bestimmt in Anlehnung an DIN EN ISO 5436-1 [406]. Hierzu wurden zunächst, wie in Bild 23 am Beispiel einer einzelnen Rille dargestellt, die Stufenübergänge (dargestellt als durchgezogene schwarze vertikale Linien) ermittelt und davon ausgehend die sich im inneren Drittel zwischen zwei Stufenübergängen befindlichen Messpunkte (in rot dargestellt) ausgewählt. Die Rillentiefe wurde anschließend als Differenz zwischen dem Mittelwert der auf allen Plateaus ausgewählten Messwerten und dem Mittelwert der auf allen Furchen ausgewählten Mess-

werten errechnet. Die beiden Mittelwerte sind als gestrichelte horizontale Linien dargestellt.

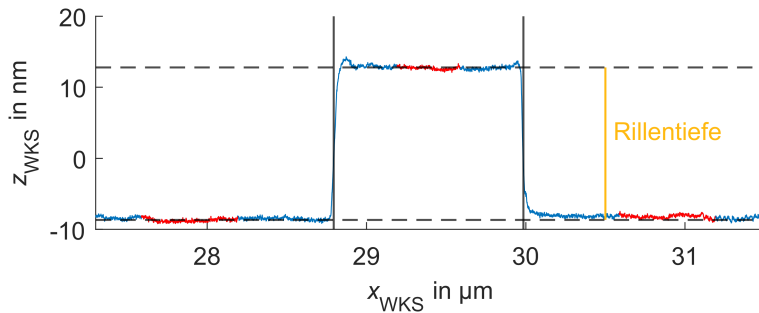


Bild 23: Bestimmung der Rillentiefe am Beispiel einer einzelnen Rille.

Für die 30 wiederholten Messungen ergibt sich eine mittlere gemessene Rillentiefe von 21,42 nm, was sehr gut mit dem nominalen Wert von $(21,4 \pm 1,5)$ nm übereinstimmt, sowie eine dazugehörige Standardabweichung σ_{Rt} von 45 pm. Die hervorragende Reproduzierbarkeit der Messwerte ist ebenfalls in Bild 24 ersichtlich, in welchem oben die dreißig Scans über die gesamte Länge und unten auf einer Stufe mit einer Anomalie dargestellt sind.

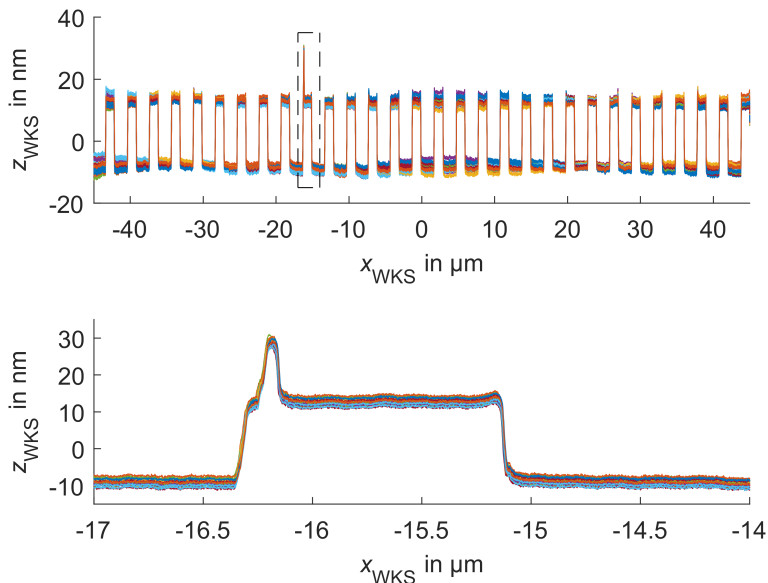


Bild 24: 30 wiederholte Messungen am Kalibriernormal. Bild modifiziert nach [P5].

4.2 Klemmender Sensorhalter

Der im vorherigen Abschnitt verwendete Sensorhalter bringt einige potentiell instabile Verbindungen in den Messkreis, welche beim im folgenden Abschnitt vorgestellten Sensorhalter entfernt wurden. Im ersten Teil dieses Abschnitts wird der Aufbau des umgestalteten Sensorhalters, im zweiten Teil dessen Evaluation vorgestellt.

4.2.1 Aufbau

Der im vorherigen Abschnitt verwendete Sensorhalter sowie der umgestaltete Sensorhalter sind sich schematisch in Bild 25 gegenübergestellt. Während der Sockel (9), bzw. die mit diesem verbundene flexible Leiterplatte beim bisherigen Sensorhalter an eben diesen geklebt wurde, wird beim überarbeiteten Design die Leiterplatte des selbstsensierenden Cantilevers (10) in den Sockel gesteckt und mittels einer beweglichen und einer feststehenden Klemmbacke (8) fixiert, wobei die bewegliche Klemmbacke über den Gewindestift (3) bewegt wird. Dieser gesamte vordere Teil des Sensorhalters wird über das Festkörpergelenk (7) durch den Piezoaktor (2) zur Schwingung angeregt. Die notwendige Vorspannung auf den Piezoaktor wird über die kopflose Kugeldruckschraube (6) aufgebracht, wobei diese mit der Mutter (5) gekontert wird. Das Glasplättchen (4) dient der flächenhaften Aufbringung der Vorspannung auf den Piezoaktor. Um auch den Piezoaktor aus dem Messkreis zu entfernen, war die Messung von dessen Auslenkung mittels eines faseroptischen Sensors (1) vorgesehen. Die Integration eines solchen Sensors erwies sich jedoch aufgrund der mangelnden Reflektivität der Zielfläche sowie der nicht hinreichend stabilen Verbindung zwischen faseroptischem Sensor und Sensorhalter als nicht möglich. Für die weiteren Untersuchungen wurde der überarbeitete Sensorhalter, wie er in Bild 26 dargestellt ist, daher ohne faseroptischen Sensor verwendet. Die der Auslegung des Festkörpergelenks zugrundeliegenden Berechnungen sind in [P9, S2] zu finden.

In Summe wurde beim überarbeiteten Sensorhalter im Vergleich zum vorherigen Sensorhalter die Klebeverbindung zwischen Sensorhalter und flexibler Leiterplatte, die Lötverbindung zwischen flexibler Leiterplatte und Sockel sowie die geometrisch undefinierte Verbindung zwischen Sockel und der Leiterplatte des selbstsensierenden Cantilevers aus dem Messkreis entfernt. Ebenfalls aus diesem entfernt wurden die Klebeverbindungen, mit welchen der Piezoaktor im bisherigen Design an den Sensorkopf befestigt wurde. Die Untersuchungen zur Auswirkung dieser Veränderungen auf die metrologischen Eigenschaften des Gesamtsystems werden im folgenden Unterabschnitt dargestellt.

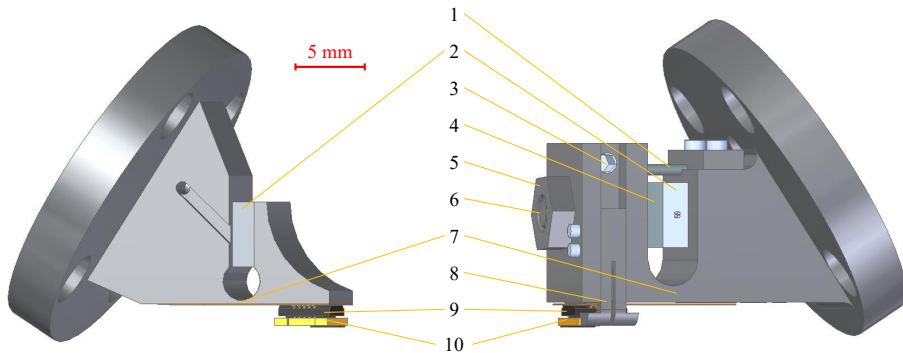


Bild 25: Schematische Darstellung des bisherigen (links) und des umgestalteten (rechts) Sensorhalters: 1 Faseroptischer Sensor; 2 Piezoaktor; 3 Gewindestift; 4 Glasplättchen; 5 Mutter; 6 kopflose Kugeldruckschraube; 7 Festkörpergelenk; 8 feststehende Klemmbacke; 9 Sockel; 10 selbstsensierender Cantilever. [P9]

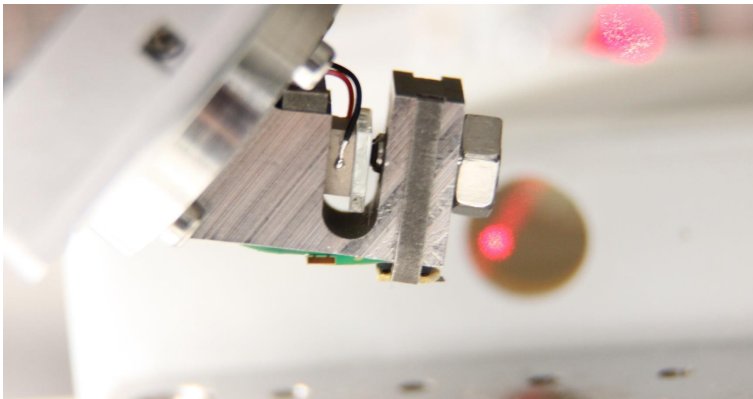


Bild 26: In die NMM-1 integrierter überarbeiteter Sensorkopf. [P9]

4.2.2 Metrologische Eigenschaften

Um beide Sensorhalter miteinander vergleichen zu können, wurden die nachfolgenden Untersuchungen analog zu den in Unterabschnitt 4.1.2 dargestellten Untersuchungen des vorherigen Sensorhalters durchgeführt. Verzichtet wurde lediglich auf eine nochmalige Bestimmung der vorwiegend durch die Rotationskinematik verursachten thermischen Sensitivität des Messsystems.

Wiederholpräzision

Zur Bestimmung der Wiederholpräzision wurde die Kalibrierroutine des SFM gegen das z-Interferometer der NMM-1 innerhalb eines Zeitraums von

ca. zwei Minuten fünfzigmal wiederholt und alle 50 Kalibrierkurven auf die Messwerte aller 50 Aufnahmen angewandt, um die Abweichungen Δ_z zu errechnen. In Bild 27 sind die so erhaltenen Δ_z als Histogramm, sowie die als Standardabweichung errechnete Wiederholpräzision σ_{WP} mit einem Wert von 3,5 nm dargestellt.

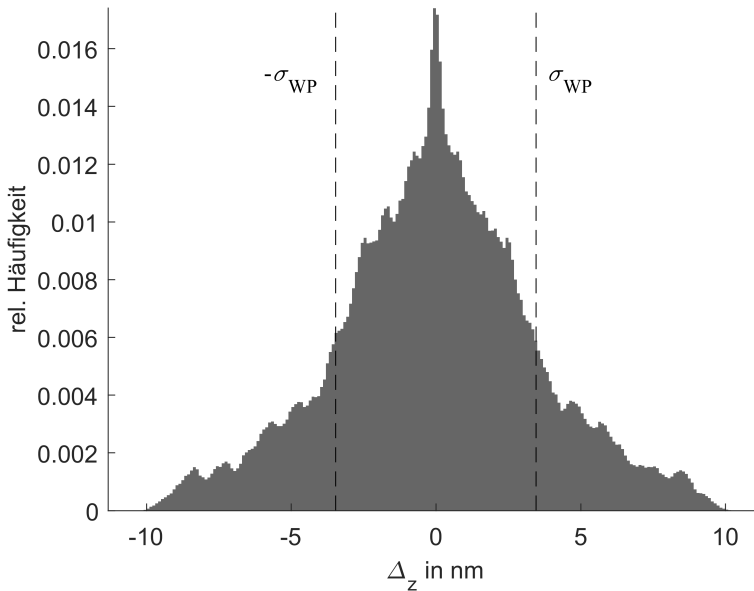


Bild 27: Δ_z als Histogramm dargestellt. Weiterhin dargestellt ist die als Standardabweichung errechnete Wiederholpräzision σ_{WP} . Bild modifiziert nach [P9].

Auch bei diesem Sensorhalter ergibt sich ein Großteil der Abweichungen aus einer Offsetverschiebung zwischen den Kalibrierkurven, sodass die Standardabweichung des Offsets der 50 Kalibrierkurven bei 2,4 nm liegt. Nach Korrektur dieser Offsetverschiebungen ergibt sich für die Abweichungen das in Bild 28 dargestellte Histogramm mit einer Standardabweichung nach Offsetkorrektur σ_{ok} von 0,5 nm.

Nach Aufnahme der Kalibrierkurve wurde der Regler der NMM-1 aktiviert, um durch entsprechende Bewegung der z-Achse der NMM-1 d_{SFM} in der Mitte des Messbereichs zu halten. In Bild 29 ist das Ergebnis von drei Stillstandsmessungen über jeweils 90 s dargestellt. Die Standardabweichungen von z_M liegen bei 2,1 nm, 0,9 nm und 1,2 nm, was nach Formel 20 für $\bar{\sigma}_{S_s}$ einen Wert von 1,5 nm ergibt. Das noch auf d_{SFM} verbleibende Rauschen hat eine Standardabweichung von jeweils 0,2 nm, was nach Formel 20 kombiniert für das Rauschen ($\bar{\sigma}_R$) ebenfalls 0,2 nm ergibt.

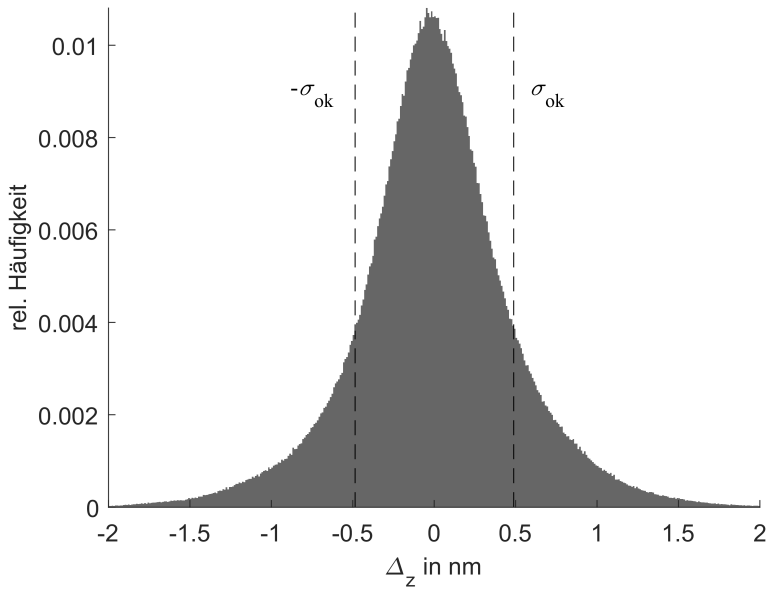


Bild 28: Histogramm der Δ_z der offsetkorrigierten Kalibrierkurven mit der Standardabweichung σ_{ok} .

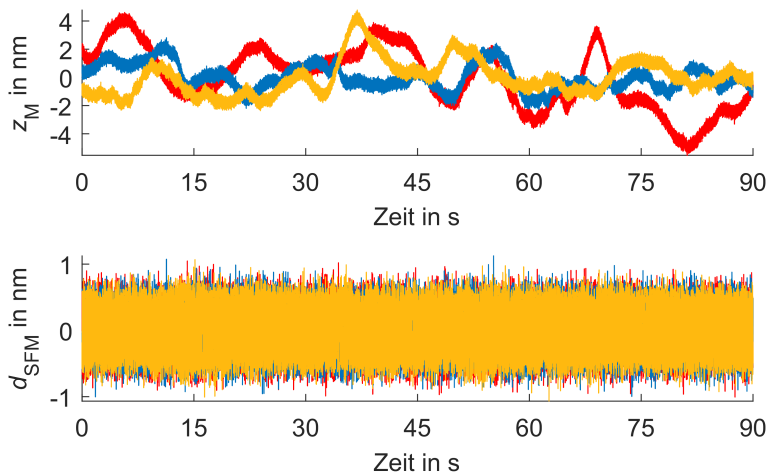


Bild 29: Drei Stillstandsmessungen über jeweils 90 s mit aktivierter Regelung. Bild modifiziert nach [P9].

Vergleichpräzision

Um die Vergleichpräzision des Messsystems zu ermitteln, wurde alle zehn Minuten für 15 s eine Stillstandsmessung durchgeführt und der Offset als Mittelwert der während dieses Zeitraums ermittelten z_M errechnet. Der Canti-

lever wurde zwischen den Messwertaufnahmen von der Messobjektoberfläche zurückgezogen. In Bild 30 sind die nach Erreichen stabiler Messbedingungen über einen Zeitraum von 18 h erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Die als Standardabweichung des Offsets errechnete Vergleichpräzision σ_{Vp} beträgt 6,5 nm.

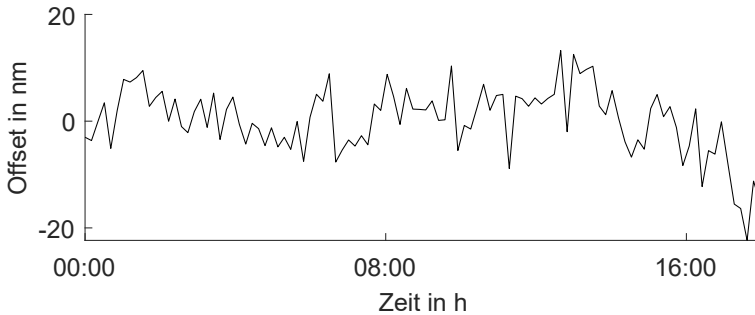


Bild 30: Veränderung des Offsets innerhalb von 18 h. Bild modifiziert nach [P9].

Messungen an einem Kalibriernormal

Die Messparameter für die Messung des sich in der xy -Ebene der NMM-1 befindlichen Kalibriernormals waren identisch zu den bereits im vorherigen Abschnitt durchgeführten Messungen. Die mittlere gemessene Rillentiefe liegt bei 20,54 nm, was mit dem nominalen Wert von $(21,4 \pm 1,5)$ nm übereinstimmt. Die dazugehörige Standardabweichung σ_{Rt} beträgt 55 pm. In Bild 31 sind die 30 Messungen in einer Furche mit einer Anomalie dargestellt.

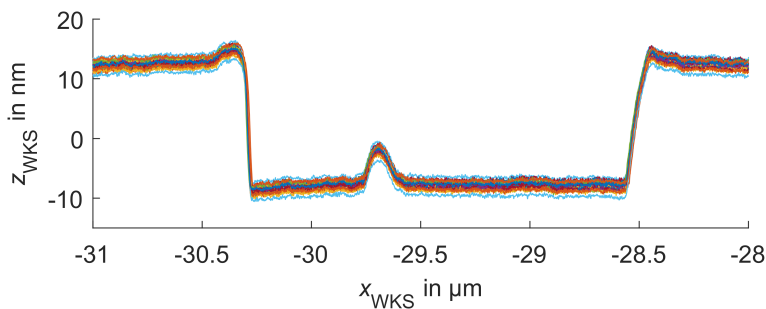


Bild 31: 30 wiederholte Messungen am Kalibriernormal. Bild modifiziert nach [P9].

4.3 Selbstaktuierender Messmodus

Das Kriechen sowie die Hysterese von Piezoaktoren sind bekannte, zumeist unerwünschte Phänomene [407]. Die Hysterese des Piezoaktors verhindert im vorliegenden Messsystem die Verwendung desselben als Stellglied eines schnellen Reglers, welcher die schnellere Durchführung von Messungen und somit eine Reduzierung des Einflusses thermischer Variationen ermöglichen würde. Um dies zu zeigen, wurde ein solcher schneller proportional-integral (PI)-Regler im Lock-in-Verstärker implementiert, wobei die Parameter des Reglers nach dem Verfahren von JOHN ZIEGLER und NATHANIEL NICHOLS [408] bestimmt wurden. Anstatt lediglich der Referenzspannung U_{Ref} zur Schwingungsanregung des Cantilevers wurde vom Lock-in-Verstärker die Summe aus U_{Ref} und einer vom Regler eingestellten Offsetspannung U_{Offset} an den Verstärker gegeben. Um das notwendige Spannungsniveau zu erreichen, wurde in diesem Fall der PD200 der Firma PiezoDrive, Australien, mit einem Verstärkungsfaktor von 20 und einer eingestellten maximalen Ausgangsspannung von 100 V als Verstärker verwendet. Der schnelle Regler nutzte U_{Offset} als Stellsignal, um $d_{\text{SFM}}(R_{\text{SFM}})$ in der Mitte des Arbeitsbereichs zu halten, wobei innerhalb des Lock-in-Verstärkers die Grenzfrequenz von R_{SFM} auf 50 kHz erhöht wurde. Weiterhin wurde R_{SFM} mit einer Grenzfrequenz von wie bisher 3 kHz sowie U_{Offset} an die Steuereinheit der NMM-1 übergeben. In Bild 32 ist der Signalfluss mit dem im Lock-in-Verstärker implementierten schnellen Regler dargestellt.

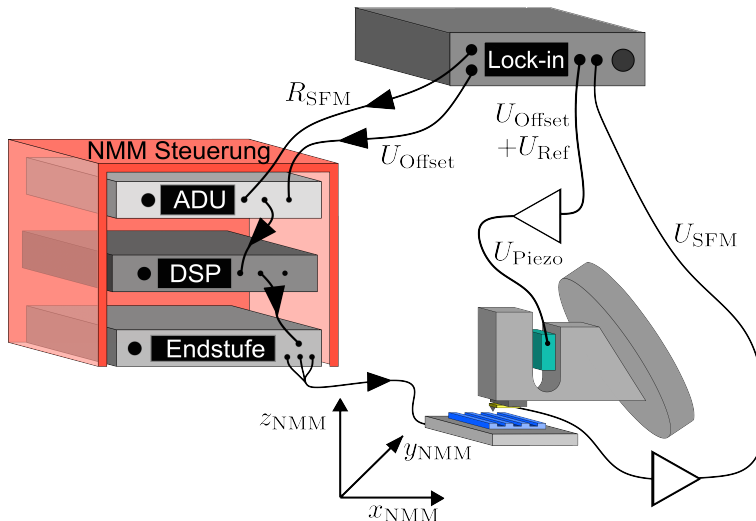


Bild 32: Schematische Darstellung des Signalfusses mit dem im Lock-in-Verstärker implementierten schnellen Regler. Bild modifiziert nach [P9].

Zur Ermittlung der Hysterese des Piezoaktors wurde das Messobjekt in z-Richtung zunächst bis zum vollständigen Erlöschen von dessen Schwingung an den Cantilever herangefahren und anschließend wieder zurückgezogen. Wie aus dem in Bild 33 dargestellten Signalverlauf ersichtlich wird, regelt der schnelle Regler d_{SFM} innerhalb des Positionierbereichs des Piezoaktors von etwas mehr als $1,5 \mu\text{m}$ auf einen konstanten Wert. Die als waagrechte schwarze Linie eingezeichnete Hysterese des Piezoaktors beträgt etwas mehr als $0,3 \mu\text{m}$. Da es nicht wie geplant möglich war, durch die Integration eines faseroptischen Sensors den Piezoaktor aus dem Messkreis zu nehmen, sind die aufgrund dieser Hysterese entstehenden Messabweichungen zu hoch und der gezeigte schnelle Regler somit in der Praxis nicht anwendbar.

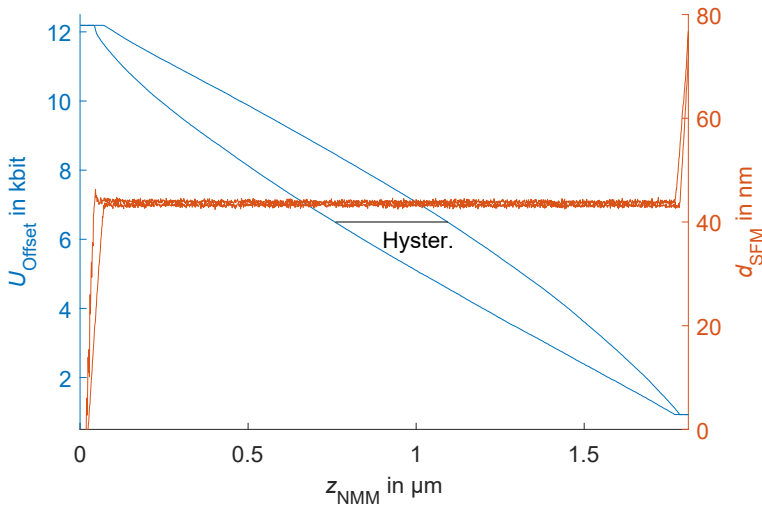


Bild 33: Ermittlung der Hysterese des Piezoaktors, welche als schwarze waagrechte Linie eingezeichnet ist. Zu Illustrationszwecken wurde den z_{NMM} -Werten ein Offset hinzuaddiert. Bild modifiziert nach [P9].

Eine Alternative sowohl zur Schwingungsanregung als auch, je nach verwendetem Cantilever, zur schnellen Regelung, ist die Verwendung eines selbstaktuierenden Cantilevers [409]. Auf einen solchen ist ein als Heizer fungierender Widerstand appliziert, welcher bei Bestromung durch die entstehende Wärme eine Biegung des Cantilevers verursacht [205]. Durch die Verwendung eines solchen Cantilevers ist es somit möglich, den Piezoaktor komplett aus dem Messsystem zu entfernen, was zum einen ein wesentlich einfacheres Design des Sensorkopfs ermöglicht und zum anderen aufgrund des Kriechverhaltens des Piezoaktors die metrologischen Eigenschaften des Messsystems verbessern könnte. Im Folgenden wird daher ein solcher selbstsensierender und selbstaktuierender Cantilever eingesetzt und evaluiert.

4.3.1 Aufbau

Als Cantilever wurde ein mit den bisher genutzten Cantilevern bis auf das applizierte Heizelement baugleicher *Piezo-Resistive Sensing & Active (PRSA)* Cantilever der Firma SCL-Sensor.Tech. Fabrication, Österreich, eingesetzt. Da sich beim überarbeiteten Sensorkopf der Piezoaktor einfach entfernen lässt, wurde dieser für die nachfolgenden Untersuchungen herangezogen. In Bild 34 ist der Sensorkopf mit ausgebautem Piezoaktor dargestellt.

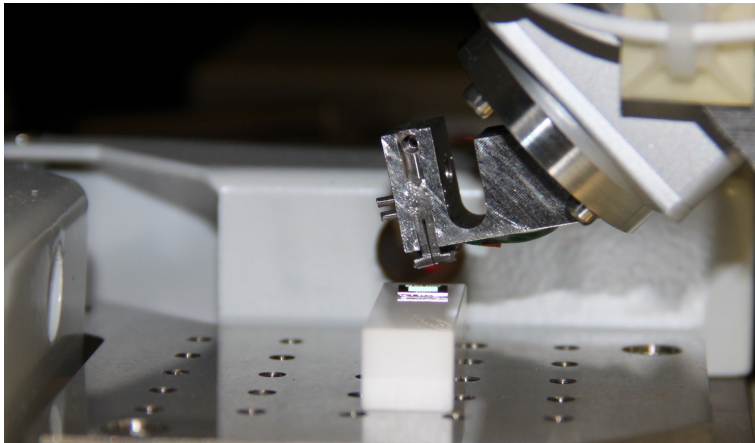


Bild 34: In die NMM-1 integrierter überarbeiteter Sensorkopf mit ausgebautem Piezoaktor. [P10].

Zur Signalverstärkung wurde wieder die stromgegekoppelte Verstärkerschaltung auf Basis des LT1206 der Firma Analog Devices, USA, eingesetzt, wobei v_{Ref} jedoch auf etwa die Hälfte der Resonanzfrequenz des Cantilevers eingestellt wurde. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der am Heizelement umgesetzten Leistung von der angelegten Spannung bewirkt dies eine Schwingungsanregung mit etwa der Resonanzfrequenz des Cantilevers [409]. Entsprechend erfolgte die Berechnung von R_{SFM} mit der zweiten Harmonischen ($h = 2$, vgl. Formeln 15 - 17).

4.3.2 Metrologische Eigenschaften

Die Bestimmung der metrologischen Eigenschaften des Messsystems wurde identisch zu den in Unterabschnitt 4.2.2 dargestellten Untersuchungen durchgeführt. Für die als Standardabweichung durch wiederholte Durchführung der Kalibrieroutine ermittelte Wiederholpräzision σ_{WP} ergab sich ein Wert von 3,1 nm, wobei sich dieser Wert durch Korrektur des Offsets der Kalibrierkurven (σ_{ok}) auf 0,4 nm senken lässt. Die durch wiederholte

Durchführung von Stillstandmessungen ermittelte kombinierte Standardabweichung $\bar{\sigma}_{Ss}$ liegt bei 2,5 nm, das auf d_{SFM} verbleibende Rauschen ($\bar{\sigma}_R$) bei 0,2 nm. Durch in Bild 35 dargestellte wiederholte Stillstandmessungen über einen Zeitraum von 18 h wurde die Vergleichspräzision als Standardabweichung σ_{Vp} mit einem Wert von 6,6 nm bestimmt.

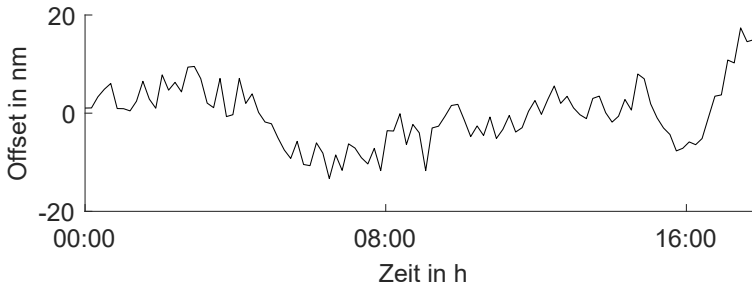


Bild 35: Veränderung des Offsets innerhalb von 18 h. Bild modifiziert nach [P10].

In Bild 36 sind die Ergebnisse von 30 wiederholten Messungen am in der xy -Ebene der NMM-1 platzierten Kalibriernormal dargestellt. Die mittlere gemessene Rillentiefe von 20,93 nm ist im Einklang mit dem nominalen Wert von $(21,4 \pm 1,5)$ nm, die dazugehörige Standardabweichung σ_{Rt} liegt bei 59 pm. Diese gute Reproduzierbarkeit ist auch an einer einzelnen Stufe mit Anomalie erkennbar, welche in Bild 36, unten, im Detail dargestellt ist.

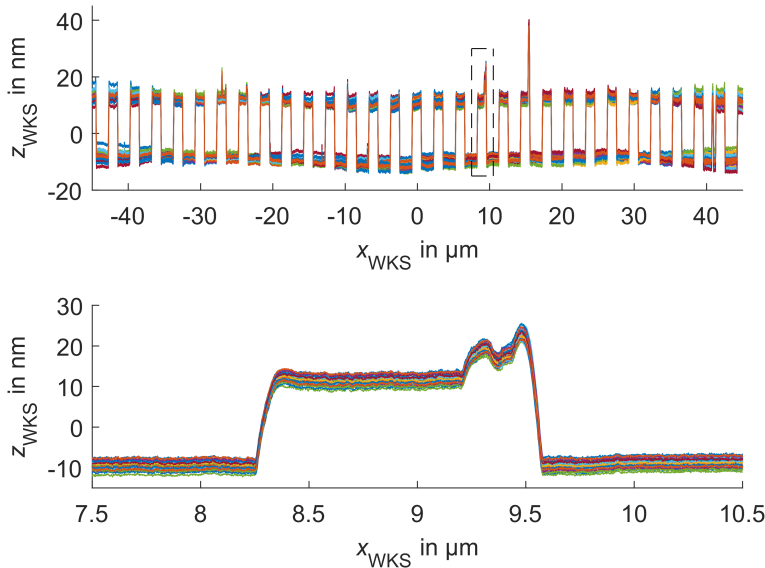


Bild 36: 30 wiederholte Messungen am Kalibriernormal. Bild modifiziert nach [P10].

4.4 Zusammenfassende Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die mit den drei Sensorsystemkonfigurationen erzielten Ergebnisse zusammenfassend verglichen, um darauf aufbauend die bei allen drei Konfigurationen ähnlichen, auch nach der Offsetkorrektur verbleibenden Abweichungen genauer zu untersuchen. Im Anschluss wird die Einstellbarkeit der Antastrichtung des SFM durch Messung des Kalibriernormals in einer zur z-Achse der NMM-1 geneigten Position validiert.

4.4.1 Vergleich der unterschiedlichen Konfigurationen

In Tabelle 2 sind die empirisch ermittelten metrologischen Eigenschaften der drei Konfigurationen geklebter Sensorhalter mit Schwingungsanregung durch Piezoaktor (Abschnitt 4.1), geklemmter Sensorhalter mit Schwingungsanregung durch Piezoaktor (Abschnitt 4.2) sowie geklemmter Sensorhalter mit selbstaktuiertem Cantilever (Abschnitt 4.3) zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der für die drei Konfigurationen empirisch ermittelten metrologischen Eigenschaften.

Sensorhalter Anregung	geklebt Piezoaktor	geklemmt Piezoaktor	geklemmt selbstaktuiert
σ_{Wp}	3,8 nm	3,5 nm	3,1 nm
σ_{ok}	0,4 nm	0,5 nm	0,4 nm
$\bar{\sigma}_{Ss}$	1,4 nm	1,5 nm	2,5 nm
$\bar{\sigma}_R$	0,2 nm	0,2 nm	0,2 nm
σ_{Vp}	6,7 nm	6,5 nm	6,6 nm
σ_{Rt}	45 pm	55 pm	59 pm

Über einen Zeitraum von 24 h Stunden weist die Temperatur in der Temperierhaube eine Standardabweichung von 4 mK auf [P4], was in Kombination mit der empirisch ermittelten und hauptsächlich auf die Rotationskinematik zurückzuführenden thermischen Sensitivität des Messsystems von $1,3 \text{ nm mK}^{-1}$ die für σ_{Vp} erhaltenen Werte, welche für die drei Konfigurationen nahezu identisch sind, zum Großteil erklärt. Thermische Änderungen wirken sich jedoch auch in nicht unerheblichem Maße auf die für σ_{Wp} und $\bar{\sigma}_{Ss}$ erhaltenen Werte aus, wobei aufgrund der stochastischen Natur der thermischen Änderungen nicht sichergestellt werden kann, dass die thermische Beeinflussung der Werte für alle Konfigurationen identisch war. Dies könnte

die Erklärung für den vielleicht einzigen aus der Tabelle herausstechenden Wert, $\bar{\sigma}_{ss}$ für die selbstaktierende Anregung, liefern. Ansonsten ist festzustellen, dass sich die metrologischen Eigenschaften der drei Konfigurationen kaum voneinander unterscheiden. Im nachfolgenden Unterabschnitt werden mögliche Ursachen der auch nach der Offsetkorrektur noch verbleibenden Abweichungen σ_{ok} genauer untersucht.

4.4.2 Untersuchungen zu den verbleibenden Abweichungen

σ_{ok} weist für alle drei Konfigurationen einen nahezu identischen Wert auf, sodass für die nachfolgende Untersuchung die Betrachtung lediglich einer Konfiguration ausreichend ist. Exemplarisch wird die Konfiguration aus geklemmtem Sensorhalter und selbstaktuierendem Cantilever herangezogen. In Bild 37 sind die Abweichungen der mittels der ersten Kalibrierkurve errechneten z -Werte zu den offsetkorrigierten z -Werten der NMM-1 für die wiederholte Aufnahme von 50 Kalibrierkurven dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Periodizität dieser Abweichungen.

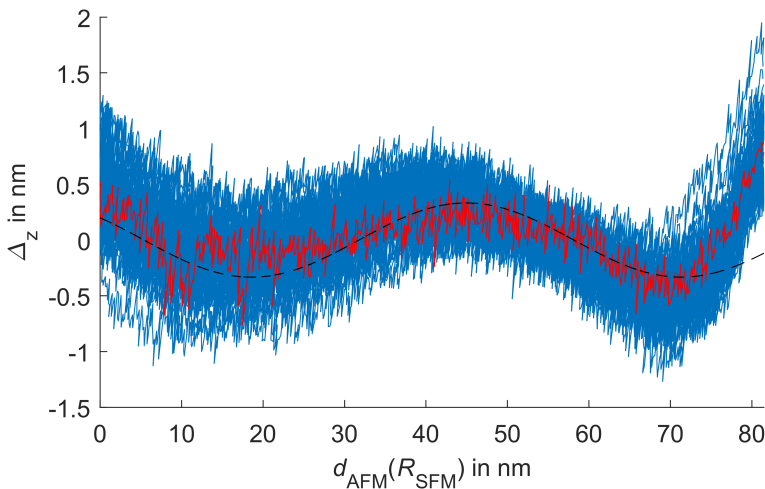


Bild 37: Abweichungen der mittels der Kalibrierkurve errechneten z -Werte zu den offsetkorrigierten z -Werten der NMM-1 für die wiederholte Aufnahme von 50 Kalibrierkurven. Die Residuen der ersten Kalibrierkurve sind in Rot dargestellt. Die schwarze, gestrichelte Linie ist eine Sinusfunktion mit einer Wellenlänge von etwa 53 nm. Bild modifiziert nach [P10].

Bei einem Interferometer, welches auf der Auswertung von zwei um 90° zueinander phasenverschobenen Quadratursignalen beruht, sind periodische Nichtlinearitäten hauptsächlich mit einer Wellenlänge von $\lambda/2$ und $\lambda/4$ (im Falle eines $\lambda/2$ -Interferometers) zu erwarten [410]. Solche Interferometer finden auch in der NMM-1 Anwendung, wobei sich die periodischen

Nichtlinearitäten mit einer Wellenlänge von $\lambda/2$ und $\lambda/4$, verursacht durch Offset-, Phasen- und Amplitudenabweichungen der beiden Quadratursignale, jedoch effektiv mittels eines auf PETER HEYDEMANN zurückgehenden Verfahrens [411] korrigieren lassen [28, S. 51 ff.].

Wie dies in [P10] detailliert dargestellt ist, führt die Anwendung der Heydemann-Korrektur im vorliegenden Fall jedoch nicht zu einer Reduktion von σ_{ok} . Denn die durch die Heydemann-Korrektur korrigierten Abweichungen führen zwar zu systematischen Kennlinienabweichungen, diese sind jedoch für die wiederholt aufgenommenen Kalibrierkurven nahezu identisch und wirken sich somit nicht auf σ_{ok} aus. Die in Bild 37 ersichtlichen Abweichungen weisen eine Wellenlänge von etwa 53 nm, also $\lambda/12$, auf (vgl. hierzu die in Bild 37 als gestrichelte, schwarze Linie dargestellte Sinusfunktion mit entsprechender Wellenlänge). Somit werden sie zwar sehr wahrscheinlich durch das Interferometer der NMM-1 verursacht, beispielsweise aufgrund einer ungewollten Reflektion am Strahlteiler [410, S. 103], jedoch nicht von der Heydemann-Korrektur korrigiert.

4.4.3 Applikationsmessung

Um die Einstellbarkeit der Antastrichtung des SFM zu validieren, wurde das Kalibriernormal wie in Bild 38 ersichtlich in einem Winkel von etwa 19° gekippt zur z-Achse der NMM-1 auf dieser platziert und mit einer entsprechend angepassten Antastrichtung ($\vec{p} = [-0,230 \ 0,230 \ 0,946]^T$) wiederholt gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 39 dargestellt. Die mittlere gemessene Rillentiefe liegt mit 21,18 nm ebenfalls im Bereich des nominalen Wertes. Die dazugehörige Standardabweichung beträgt 60 pm. Die im Bild ersichtliche sowie sich in einer leicht erhöhten Standardab-

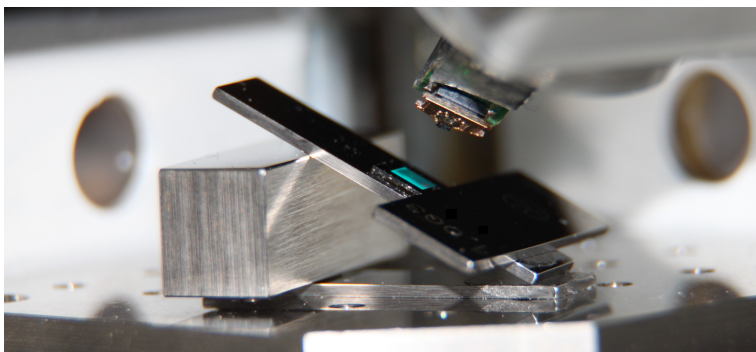


Bild 38: Zur xy -Ebene der NMM-1 geneigtes Kalibriernormal und SFM mit entsprechend angepasster Antastrichtung.

weichung der ermittelten Rillentiefen im Vergleich zum in der xy -Ebene platzierten Kalibriernormal niederschlagende Erhöhung des Rauschens bei den gekippten Messungen lässt sich auf höhere Vibrationen des Positionierstischs der NMM-1 in x - und y -Richtung im Vergleich zur z -Richtung zurückführen [168]. Während die Vibrationen in x - und y -Richtung für die nicht gekippten Messungen lediglich x_{WKS} , nicht aber z_{WKS} und somit auch nicht die gemessene Rillentiefe beeinflussen, wirken sie sich bei den gekippten Messungen anteilig auch auf z_{WKS} aus.

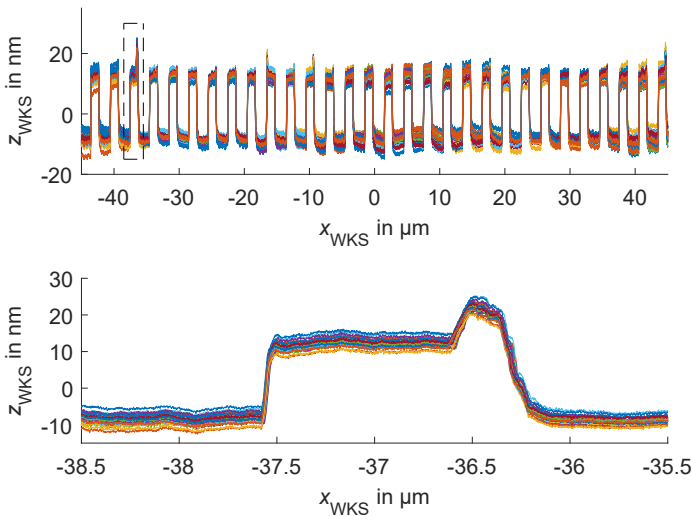


Bild 39: 30 wiederholte Messungen am Kalibriernormal, welches um 19° gekippt zur z -Achse der NMM-1 auf dieser platziert wurde. Bild modifiziert nach [P5].

4.5 Fazit

Ziel der in diesem Kapitel gezeigten Untersuchungen war es, die metrologischen Eigenschaften des in die Rotationskinematik integrierten SFM zu ermitteln und anhand der erhaltenen Ergebnisse die prinzipielle Eignung dieses Messsystems bzw. einer möglichen Weiterentwicklung desselben zur Charakterisierung der Feingestalt mikrodimensionaler Kugeln zu evaluieren. Zunächst bestätigte sich die aufgrund der sich im metrologischen Kreis befindlichen Rotationskinematik zu erwartende, relativ hohe thermische Sensitivität des Messsystems, wobei sich allerdings durch den Betrieb desselben in der sehr temperaturstabilen Haube dennoch eine Vergleichspräzision von etwas weniger als 7 nm erzielen lässt. Die aufgrund des Betriebs innerhalb der Temperierhaube notwendigerweise relativ langen Signalwege führten

demgegenüber nicht zu einer untolerierbar schlechten Messpräzision. Im Gegenteil, nach Abzug der hauptsächlich auf die thermische Sensitivität des Messsystems zurückzuführenden Offsetverschiebungen wiederholt aufgenommener Kalibrierkurven, konnte für diese eine Wiederholpräzision von weniger als 0,5 nm ermittelt werden. Und selbst dieser Wert ist zu einem nicht unerheblichen Teil sehr wahrscheinlich auf Abweichungen des Interferometers der NMM-1 und nicht des SFM selbst zurückzuführen, wie die Untersuchungen aus Unterabschnitt 4.4.2 zeigen. Das durch das SFM selbst verursachte Rauschen ist demnach eher mit einer Standardabweichung von lediglich 0,2 nm zu quantifizieren, was der Standardabweichung von d_{SFM} bei Stillstandsmessungen entspricht ($\bar{\sigma}_R$).

Insgesamt kann somit die prinzipielle Eignung einer Kombination aus NMM-1, Rotationskinematik und SFM zur Charakterisierung der Feingestalt mikrodimensionaler Kugeln bestätigt werden. Zum Erreichen eines größeren Einstellbereichs der Antastrichtung sowie einer geringeren thermischen Sensitivität sollte die bestehende Rotationskinematik jedoch noch angepasst werden, indem die erste, obendrein relativ große Rotationsachse der Rotationskinematik (vgl. Bild 4), durch eine andere, wenn möglich kleinere Rotationsachse mit einem Bewegungsbereich von 360° ersetzt wird. Hinsichtlich des SFM lassen die Ergebnisse die Schlüsse zu, dass der wesentlich einfacher aufgebaute geklebte Sensorhalter keine signifikanten Nachteile gegenüber dem geklemmten Sensorhalter aufweist, und dass weiterhin der selbstaktierende Messmodus dem Betrieb mit Piezoaktor zur Schwingungsanregung hinsichtlich der metrologischen Eigenschaften gleichzusetzen ist. Da somit sowohl auf eine Klemmung des Cantilevers als auch auf einen Piezoaktor zur Schwingungsanregung verzichtet werden kann, sollte im Zuge der Umgestaltung der Rotationskinematik auch ein neuer, sehr einfach gestalteter, dafür aber aus Materialien mit einem besonders niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten hergestellter Sensorhalter konzipiert werden.

5 Untersuchungen zur konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper¹

Die Basis der in diesem Kapitel dargestellten empirischen Untersuchungen zur konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper bildet der bereits in Abschnitt 2.8 dargestellte und in die NMM-1 integrierte, hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensor. Dieser bietet aufgrund der Möglichkeit, den Fokusabstand hochfrequent zu modellieren und in Kombination mit einer entsprechenden Signalauswertung eine Reihe unterschiedlicher Betriebsmodi, welche im ersten Teil dieses Kapitels dargestellt werden. In Unterabschnitt 5.1.2 wird die Auswirkung der Fokusabstandsmodulation auf die topographische räumliche Auflösung des Sensors anhand von Messungen an einem Kalibriernormal mit sternförmigen Rillen (Typ ASG nach DIN EN ISO 25178-70 [404], auch topographischer Siemens-Stern, bzw. nachfolgend kurz nur Siemens-Stern genannt) untersucht.

Der zweite Teil dieses Kapitels widmet sich der konfokalmikroskopischen Charakterisierung (mikrodimensionaler) Kugeln. Eine solche verlangt die Messung an variablen lokalen Steigungen. Inwiefern es hierbei zu systematischen Abweichungen kommt, wird in Unterabschnitt 5.2.1 untersucht. Untersuchungen zur bidirektionalen, konfokalmikroskopischen Charakterisierung mikrodimensionaler Kugeln werden in Unterabschnitt 5.2.2 vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einem Fazit, in welchem die Ergebnisse zusammengefasst und die (bidirektionale) Konfokalmikroskopie hinsichtlich ihrer Eignung zur Charakterisierung mikrodimensionaler Kugeln bewertet wird.

Auch sämtliche in diesem Kapitel dargestellten Messungen wurden in der bereits mehrfach erwähnten Temperierhaube bei einer eingestellten Temperatur von 20,00 °C durchgeführt.

¹ Inhalte dieses Kapitels wurden bereits in [P7, P11, P12] veröffentlicht.

5.1 Messmodi des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors

Im ersten Teil dieses Abschnitts werden die unterschiedlichen Messmodi des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors anhand von Messungen an einem Raunormal sowie an einem Treppenspiegel dargestellt. Im zweiten Teil wird zunächst mittels der theoretischen Modellierung des optischen Aufbaus sowie mittels empirischer Untersuchungen die kohärente Transferfunktion des Konfokalsensors bestimmt. Anschließend wird der Einfluss der Fokusabstandsmodulation auf die topographische räumliche Auflösung des Sensors anhand umfangreicher Messungen untersucht.

5.1.1 Darstellung

Die Linearität der Kalibrierkurve des mit Fokusabstandsmodulation betriebenen Konfokalsensors (vgl. Bild 15) ermöglicht bei einer stetigen Messobjektoberfläche die Durchführung scannender Messungen unter Regelung der axialen Position der Messobjektoberfläche bei gleichzeitiger Durchführung einer lateralen Bewegung derselben. Dies wurde in [S₁, P₁₃] an einem Raunormal und in [P₁₄] großflächig an einem sphärischen Spiegel gezeigt. Alternativ lassen sich mit dem Sensor jedoch auch nicht-geregelte laterale Abtastungen unter Ausnutzung des axialen Arbeitsbereichs desselben durchführen, was bei nicht stetigen Messobjektoberflächen oder bei Integration des Sensors in ein Positioniersystem, welches die Option zur Durchführung geregelter Scans nicht bietet, sinnvoll sein kann [S₁]. Übersteigt die Höhendifferenz der Messobjektoberfläche den axialen Messbereich des Sensors, so ist auch die Durchführung mehrerer nicht-geregelter lateraler Abtastungen auf unterschiedlichen Höhen relativ zur Messobjektoberfläche möglich.

Die unterschiedlichen Betriebsmodi werden im Folgenden zunächst anhand von Messungen an einem Raunormal der Baureihe KNT 4058/03 der Firma HALLE Präzisions-Kalibriernormale GmbH, Deutschland, dargestellt. Für das Raunormal liegen von einem von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditierten Kalibrierlaboratorium (taktil) ermittelte Rauheitskennwerte vor². Zur Prüfung der metrologischen Verträglichkeit der Kalibrierwerte und der mit dem Konfokalsensor gewonnenen Rauheitskennwerte ist die Messstrategie zunächst an die im Kalibrierschein angegebene angelehnt: An zwölf im Messbereich des Normals verteilten Positionen wurde eine laterale Abtastung bei gleichzeitiger axialer Nachregelung mit einem Messpunktabstand von 125 nm durchgeführt. Die Geschwindigkeit lag hierbei bei 75 $\mu\text{m s}^{-1}$. Für jede Abtastung wurde mit der Software MountainsMap

² DAkkS-Kalibrierschein: Kalibrierzeichen 20TH09 D-K-15032-02-00 2020-01.

und unter Anwendung eines Profilfilters Gauß mit der Grenzwellenlänge 0,8 mm der arithmetische Mittelwert der Profilorдынaten R_a und die größte Höhe des Profils R_z nach DIN EN ISO 4287:1998 [412] bei einer Auswertelänge von 4,0 mm errechnet. In Tabelle 3 sind die gemessenen Werte sowie die Kalibrierwerte ersichtlich. Zur Bewertung der metrologischen Verträglichkeit dieser Messergebnisse lässt sich in Anlehnung an [72] und unter Verwendung des **Erweiterungsfaktors** (VIM, 2.38) $k = 2$ die normierte Abweichung

$$E_n = \left| \frac{1}{2} \frac{\Delta}{\sqrt{u^2 + \sigma^2}} \right| \quad (21)$$

anhand der Abweichung Δ des Kalibrierwerts und des Mittelwerts der gemessenen Kennwerte sowie der Standardmessunsicherheit u des Kalibrierwerts und der Standardabweichung σ der gemessenen Werte errechnen. Auch die E_n -Werte sind in Tabelle 3 ersichtlich. Da $E_n < 1$, sind die Messergebnisse metrologisch verträglich.

Tabelle 3: Vergleich der am Raunormal gemessenen Rauheitskennwerte mit den Kalibrierwerten.

	Kalibrierwerte	gemessene Werte	E_n
R_a bzw. \bar{R}_a	0,640 μm	0,639 μm	0,03
$u(R_a)$ bzw. $\sigma(R_a)$	0,016 μm	0,012 μm	
R_z bzw. \bar{R}_z	3,140 μm	3,103 μm	0,16
$u(R_z)$ bzw. $\sigma(R_z)$	0,079 μm	0,083 μm	

Um den Einfluss des Normals und des Messsystems auf die Variation der ermittelten Kennwerte zu trennen, wurde die laterale Abtastung an einer einzelnen Position fünfundzwanzigmal wiederholt. Der laterale Punktabstand wurde hierbei auf 50 nm reduziert. In Bild 40 ist das Ergebnis als Mittelwert und Standardabweichung der Einzelmesspunkte dargestellt. Die nach Formel 20 errechnete kombinierte Standardabweichung der Einzelmesspunkte liegt bei 5,9 nm. Für die an diesen wiederholten Aufnahmen ermittelten Rauheitskennwerte ergeben sich Standardabweichungen von 0,002 μm (R_a) und 0,009 μm (R_z). Das System, bestehend aus fokusabstandsmoduliertem Konfokalsensor und NMM-1, liefert entsprechend ausgesprochen präzise Messwerte mit Standardabweichungen im einstelligen Nanometerbereich, sowohl hinsichtlich der Einzelpunktpräzision als auch hinsichtlich der Rauheitskennwerte.

Der zweite Messmodus des fasergekoppelten Konfokalsensors ist die Durchführung einer lateralen Abtastung ohne axiale Nachregelung unter Ausnut-

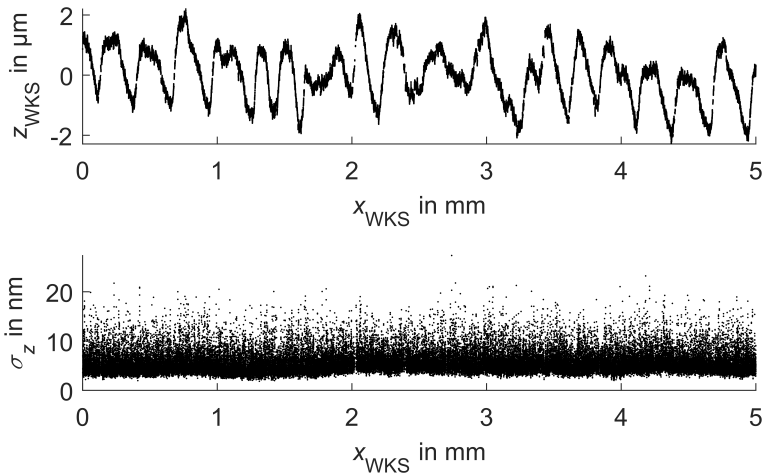


Bild 40: Mittelwert und Standardabweichung wiederholter axial nachgeregelter lateraler Abtastungen. Bild modifiziert nach [P7].

zung des axialen Messbereichs des Sensors. Da die Höhe des Raunormals letzteren übersteigt, sind zur Messung desselben mehrere laterale Abtastungen auf unterschiedlichen Höhen notwendig. In Bild 41 ist dies unter Verwendung unterschiedlicher Farben für die jeweiligen lateralen Abtastungen dargestellt. Der axiale Abstand zwischen zwei benachbarten lateralen Abtastungen beträgt bei dieser Messung 500 nm, im Vergleich zu einem ansonsten bei einem Mikroskopobjektiv mit einer solch hohen A_N üblicherweise gewählten Abstand von ca. 50 nm bei einer klassisch konfokalen Messung ohne Fokusabstandsmodulation [350]. Der axiale Arbeitsbereich des Sensors übersteigt den axialen Abstand zweier lateraler Abtastungen um etwa 100 nm, sodass für manche lateralen Abtastpunkte ein gültiger Messpunkt für zwei Abtastungen erzielt wird. In diesem Fall wird der Mittelwert als letztendlicher Messpunkt errechnet.

Auch für den unregelmäßigen Messmodus wurde das Raunormal fünfundzwanzigmal wiederholt gemessen. In Bild 42 ist das Ergebnis als Mittelwert und Standardabweichung der Einzelmesspunkte dargestellt. Die nach Formel 20 errechnete kombinierte Standardabweichung der Einzelmesspunkte liegt bei 10 nm und damit höher als bei der axialen Nachregelung. Allerdings ist bei dieser der Anteil der nicht gemessenen Punkte auch etwas höher. So wurde für die Messung mit axialer Nachregelung für 84 % der Messpunkte ein gültiger z-Wert bei mindestens einer Wiederholung ermittelt. Im Vergleich dazu liegt dieser Wert für die Messungen auf unterschiedlichen Höhen mit 86 % etwas höher. In Bild 43 ist der punktweise Vergleich der beiden Messmodi dargestellt. Der Mittelwert von Δ_z liegt bei 6 nm, die Standardabweichung bei

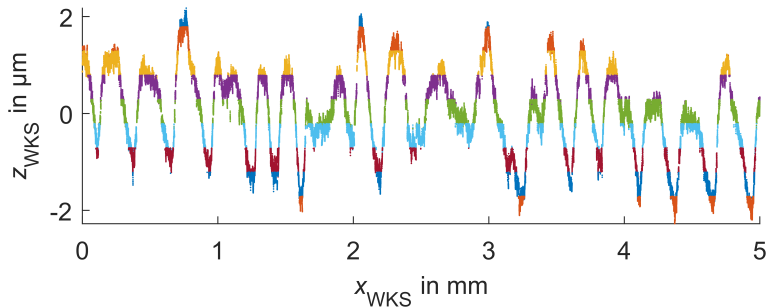


Bild 41: Darstellung des Prinzips der Durchföhrung einer Messung durch mehrere laterale Abtastungen auf unterschiedlichen Höhen (in unterschiedlichen Farben dargestellt). Bild modifiziert nach [P7].

18 nm. Als Abwandlung des unregulierten Messmodus ist es auch möglich, die lateralen Abtastungen auf unterschiedlichen Höhen bei gegebenem Überlappungsbereich unter Missachtung der z-Werte des Positioniersystems durch *Stitching* aneinanderzufügen, was beispielsweise bei einem relativ ungenauen Positioniersystem vorteilhaft sein kann. Eine ausführliche Darstellung auch dieses abgewandelten Messmodus ist in [P7] zu finden.

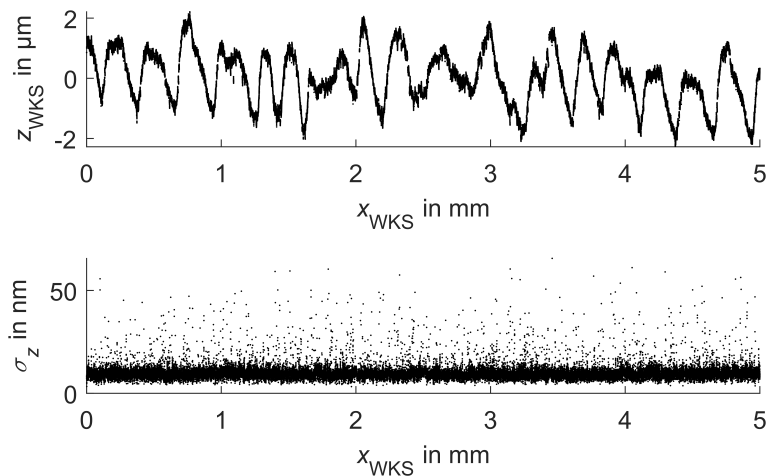


Bild 42: Mittelwert und Standardabweichung wiederholter lateraler Abtastungen auf unterschiedlichen Höhen. Bild modifiziert nach [P7].

Die Vorteile der unterschiedlichen Betriebsmodi des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors, insbesondere in Kombination mit der NMM-1, lassen sich anhand der Messung eines Treppenspiegels aufzeigen. Dieser weist auf einer Grundfläche von ca. 21 mm × 15 mm über 40 Stufen mit einer Höhe von je ca. 30 µm auf, was in einer Gesamthöhe von über 1,2 mm resultiert.

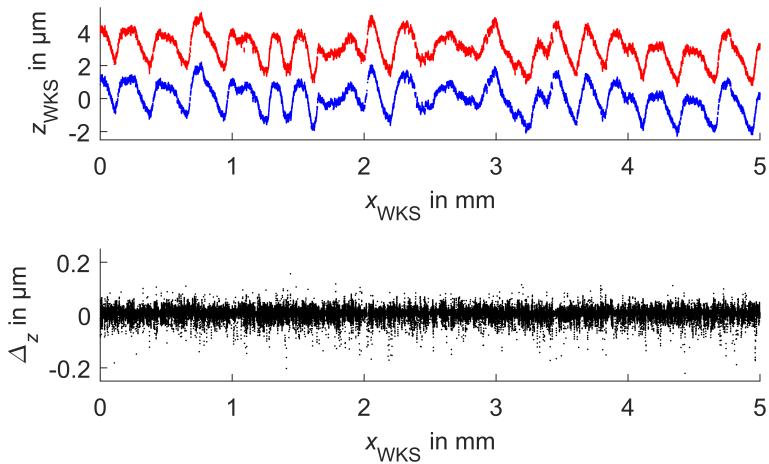


Bild 43: Vergleich der Mittelwerte der unregulierten (rot, mit einem zu Illustrationszwecken hinzuaddierten Offset) und regulierten (blau) Messungen. Bild modifiziert nach [P7].

In Bild 44 sind alle auf dem Treppenspiegel aufgenommenen Messwerte in einem Bild dargestellt. Sämtliche Messwerte wurden mit einem Punktabstand entlang der Abtastrichtung von 50 nm bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von $150 \mu\text{m s}^{-1}$ aufgenommen. Die Anzahl der insgesamt aufgenommenen Messwerte beträgt über 30 Millionen.

Die als Ausschnitt a) eingezeichnete Messung orthogonal zu den Stufen wurde aufgrund der den axialen Messbereich des Sensors übersteigenden Stufenhöhe als einzelne nicht-geregelte laterale Abtastungen auf den jeweiligen Stufen durchgeführt, wie dies in Bild 45 dargestellt ist. Demgegenüber ließen sich die Messungen auf den Stufen (Ausschnitt b) in Bild 44) als jeweils einzelne geregelte laterale Abtastung durchführen. In Bild 46 ist eine solche über die gesamte Messlänge, sowie über kleinere Ausschnitte derselben, dargestellt. Dieses Bild verdeutlicht bereits die Tatsache, dass trotz des großen Messbereichs das Auflösungsvermögen des Sensors im gesamten Messvolumen erhalten bleibt. Noch deutlicher lässt sich dies anhand der in Bild 47 dargestellten Messung (Ausschnitt c) in Bild 44) erkennen, für welche mit einem Abstand von nur $1 \mu\text{m}$ eng beieinanderliegende geregelte laterale Abtastungen durchgeführt wurden. Nach dieser rein qualitativen Beurteilung des Auflösungsvermögens des Sensors wird die topographische räumliche Auflösung des Sensors im nachfolgenden Unterabschnitt genauer untersucht und insbesondere auch quantifiziert.

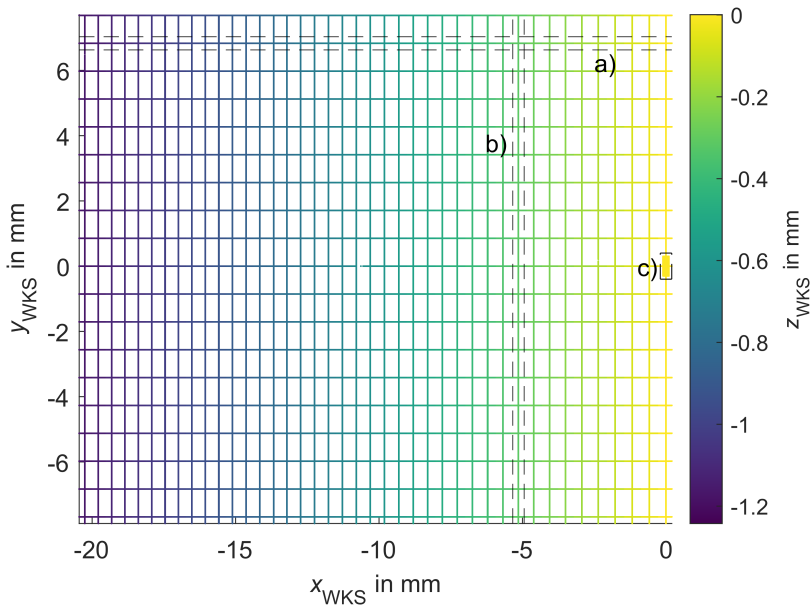


Bild 44: Gesamtansicht der auf dem Treppenspiegel aufgenommenen Messwerte. Ausschnitt a) ist in Bild 45, Ausschnitt b) in Bild 46 und Ausschnitt c) in Bild 47 ersichtlich.

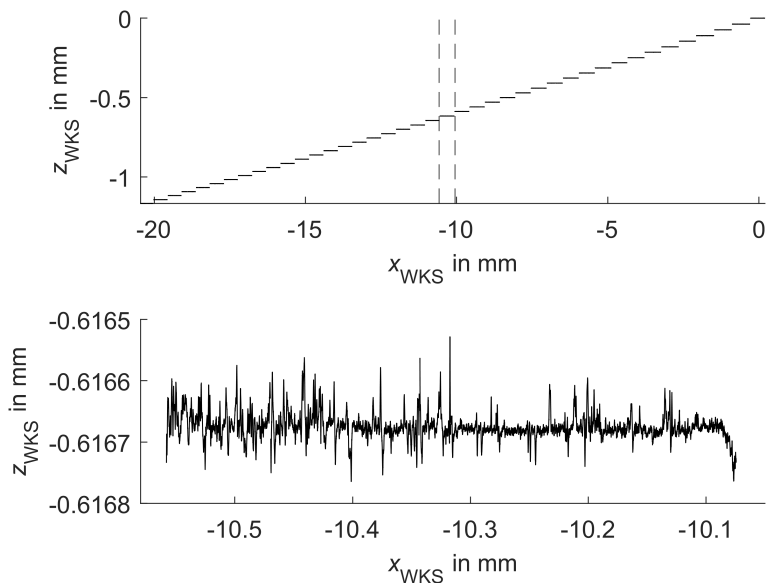


Bild 45: Ausschnitt a) aus Bild 44: Oben: Einzelne nicht-geregelte laterale Abtastungen auf den Stufen orthogonal zu eben diesen. Unten: Detailansicht der Abtastung einer einzelnen Stufe.

5 Konfokalmikroskopische Charakterisierung

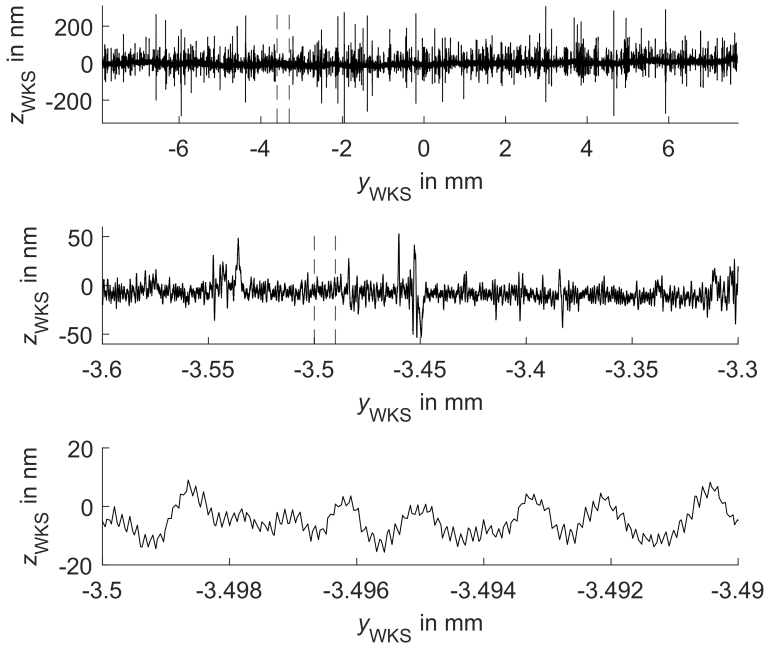


Bild 46: Ausschnitt b) aus Bild 44: Einzelne geregelte laterale Abtastung in Stufenrichtung. Zu Illustrationszwecken wurde den z_{WKS} -Werten ein Offset hinzuaddiert.

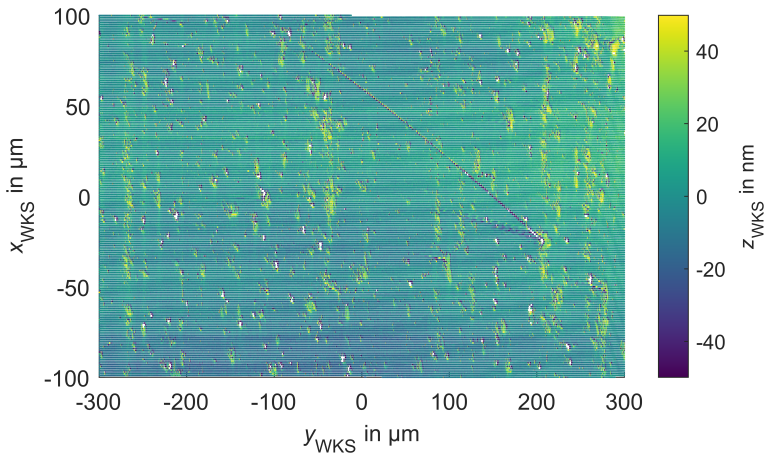


Bild 47: Ausschnitt c) aus Bild 44: Eng beieinanderliegende geregelte laterale Abtastungen auf einer kleinen Fläche. Zu Illustrationszwecken wurden einzelne Ausreißer entfernt.

5.1.2 Untersuchungen zum Auflösungsvermögen

Dieser Unterabschnitt ist in zwei Teile eingeteilt, wobei zunächst die kohärente Transferfunktion des optischen Aufbaus ohne Fokusabstandsmodulation sowohl theoretisch als auch empirisch bestimmt wird. Die kohärente Transferfunktion setzt die Fourier-Transformierte der Reflektivität des Messobjekts in Beziehung zur durch den Detektor des Konfokalsensors gemessenen Intensität. Demgegenüber ist die für ein dimensionelles Messgerät entscheidende Übertragungsfunktion nach DIN EN ISO 25178-600 „die Höhenübertragung als Funktion der Ortsfrequenz der Oberflächentopographie“ [97]. Eng damit zusammenhängend ist die topographische räumliche Auflösung eins der sieben metrologischen Charakteristika eines Oberflächenmessgeräts nach DIN EN ISO 25178-600 [97]. Eine ausführliche Übersicht bezüglich der Kalibrierung und Verifikation solcher Messgeräte ist in [413] zu finden. In [414, 415] wird die Anwendung des Konzepts der Transferfunktion im Kontext eben dieser Messgeräte detailliert dargestellt. Im zweiten Teil dieses Unterabschnitts wird der Einfluss der Fokusabstandsmodulation auf die topographische räumliche Auflösung des Konfokalsensors empirisch untersucht.

Kohärente Transferfunktion

Die den Detektor eines im Reflexionsmodus betriebenen Konfokalsensors erreichende Intensität lässt sich nach

$$I(x, y) = \left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}\{q(x, y)\} \kappa(g_x, g_y) \cdot \exp[j2\pi(g_x x + g_y y)] dg_x dg_y \right|^2 \quad (22)$$

aus dem quadrierten Betrag des invers Fourier-Transformierten Produkts der kohärenten Transferfunktion κ und der Fourier-Transformierten \mathcal{F} der Reflektivität q des Messobjekts errechnen. g_x und g_y sind hierbei die Ortsfrequenzen in x - bzw. y -Richtung. Vorteil dieser Darstellung ist die Trennung der Signalentstehung hinsichtlich der Einflüsse des Messobjekts (q) und des Messsystems (κ), wobei sich anhand von κ , aufgrund dessen Abhängigkeit von den Ortsfrequenzen das laterale Auflösungsvermögen des Konfokalsensors bewerten lässt. Bei vorliegender Rotationssymmetrie der Pupillenfunktion des Mikroskopobjektivs lässt sich κ auch als Funktion nur einer normierten radialen Ortsfrequenz

$$\tilde{g}_r^2 = \left[\frac{\lambda_L}{\sin(\alpha)} \right]^2 (g_x^2 + g_y^2), \quad (23)$$

welche über

$$g_r = \frac{\sin(\alpha)}{\lambda_L} \cdot \tilde{g}_r \quad (24)$$

mit der radialen Ortsfrequenz g_r verbunden ist, darstellen. [338]

Unter der Annahme einer aberationsfreien Pupillenfunktion gilt im Fokuspunkt ($\gamma_a = 0$) für den idealisierten Fall eines unendlich kleinen Detektors

$$\kappa(\tilde{g}_r) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arccos\left(\frac{\tilde{g}_r}{2}\right) - \frac{\tilde{g}_r}{2} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{\tilde{g}_r}{2}\right]^2} \right], \quad (25)$$

wogegen in diesem Fall bei einem fasergekoppelten Konfokalsensor

$$\kappa(\tilde{g}_r) = \frac{2}{\pi(1 - \exp[-\Gamma])} \exp\left[\frac{-\Gamma \tilde{g}_r^2}{4}\right] \cdot \int_0^{\pi/2} 1 - \exp\left[-\Gamma \left(-\frac{1}{2} \tilde{g}_r \cos(\xi) + \sqrt{\tilde{g}_r^2 \sin^2\left(\frac{\xi}{4}\right) + 1}\right)^2\right] d\xi \quad (26)$$

gilt. [396]

In Bild 48 ist die kohärente Transferfunktion für $\Gamma = 0$ (Formel 25) und $\Gamma = 5,5$ (Formel 26), wobei $\lambda_L = 633 \text{ nm}$, $A_N = 0,8$, $n = 1$ und unter Verwendung von Formel 10, dargestellt. Zwar liegt $\kappa_{\Gamma=5,5}$ für niedrige Ortsfrequenzen etwas über $\kappa_{\Gamma=0}$, für höhere Ortsfrequenzen ist jedoch eine deutliche Verschlechterung des lateralen Auflösungsvermögens zu erkennen. Exemplarisch lässt sich der Wert von g_r herausgreifen, für welchen κ gerade 0,5 ist. Für $\kappa_{\Gamma=0}$ liegt dieser Wert bei $1,02 \mu\text{m}^{-1}$, für $\kappa_{\Gamma=5,5}$ bei $0,87 \mu\text{m}^{-1}$. Daraus ergeben sich nach Berechnung der Strukturwellenlänge

$$\lambda_s = \frac{1}{g_r} \quad (27)$$

die Werte $0,98 \mu\text{m}$ ($\kappa_{\Gamma=0}$) bzw. $1,15 \mu\text{m}$ ($\kappa_{\Gamma=5,5}$).

Empirisch wurde die kohärente Transferfunktion am Auflösungstest TC-RT01 der Firma Technologie Manufaktur, Deutschland, ermittelt. Dieses Normal beinhaltet Strichmuster-Gruppen unterschiedlicher Ortsfrequenzen (oder auch Linienpaaren pro Längeneinheit), bestehend aus alternierend reflektierenden und opaken Strichen derselben Breite. Auf insgesamt 36 Strichmuster-Gruppen mit einer Ortsfrequenz zwischen 50 mm^{-1} und 2200 mm^{-1} wurde eine Abtastung auf Höhe des Fokuspunkts ($\gamma_a = 0$) durchgeführt. In Bild 49

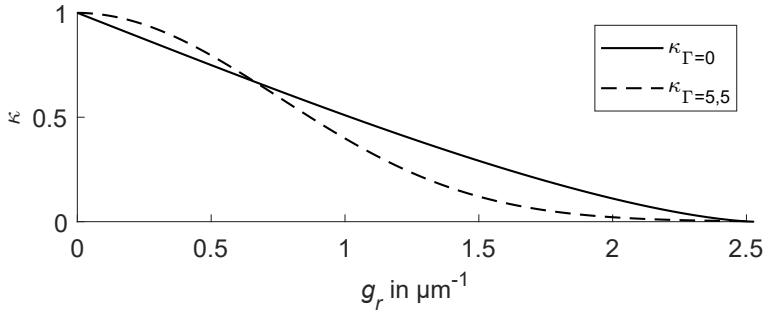


Bild 48: kohärente Transferfunktion für $\Gamma = 0$ und $\Gamma = 5,5$, jeweils mit $\lambda_L = 633 \text{ nm}$, $A_N = 0,8$ und $n = 1$.

ist das bei diesen Abtastungen erhaltene Signal U_{FD} dargestellt, wobei die einzelnen Abtastungen zu Illustrationszwecken aneinandergesetzt wurden.

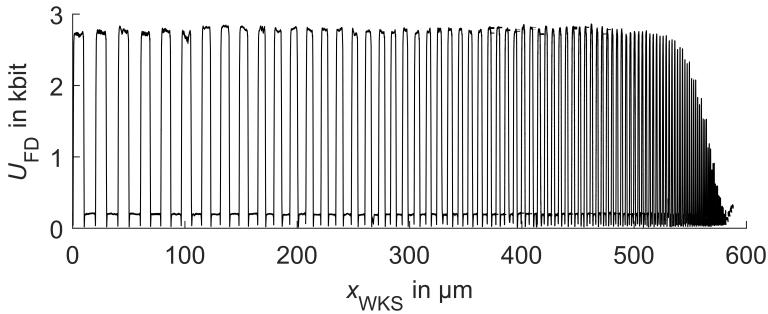


Bild 49: Zu Illustrationszwecken aneinandergesetzte Abtastungen auf Strichmustern unterschiedlicher Ortsfrequenz auf dem Auflösungstest.

Für den eindimensionalen Fall lässt sich Formel 22 unter Vernachlässigung einer möglichen Phasenverschiebung, wobei κ nach Formel 26 ohnehin keinen imaginären Anteil aufweist, in

$$\kappa(g_x) = \frac{|\mathcal{F}\{\sqrt{I(x)}\}|}{|\mathcal{F}\{q(x)\}|} \quad (28)$$

umformen. Eine Strichmuster-Gruppe mit der Strukturwellenlänge λ_S lässt sich mathematisch als Rechteckkurve beschreiben. Für diese gilt

$$q(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < \frac{\lambda_S}{2} \\ 0 & \frac{\lambda_S}{2} \leq x < \lambda_S \end{cases} \quad (29)$$

Durch Entwicklung der Fourier-Reihe wird die alternative Beschreibung

$$q(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cdot \left[\sin\left(\frac{x}{\lambda_S}\right) + \frac{1}{3} \cdot \sin\left(\frac{3x}{\lambda_S}\right) + \frac{1}{5} \cdot \sin\left(\frac{5x}{\lambda_S}\right) + \dots \right] \quad (30)$$

erhalten [416, S. 186]. Die Rechteckkurve setzt sich somit neben einem Offset aus unendlich vielen Strukturwellenlängen ungerader Ordnung zusammen, wobei die Amplitude mit zunehmender Ordnung stark abnimmt. Die Auswertung der auf den Strichmuster-Gruppen durchgeführten Abtastungen beschränkt sich daher auf die erste ($h = 1$) und dritte ($h = 3$) Harmonische, sodass sich mittels jeder Strichmuster-Gruppe der Ortsfrequenz g_x zwei Stützstellen von κ errechnen lassen. Entsprechend Formel 28 und Formel 30 gilt

$$\kappa(hg_x) = \left| \mathcal{F}\{\sqrt{I(x)}\}(hg_x) \right| \cdot \frac{\pi h}{2} \quad (h = 1, 3). \quad (31)$$

In Bild 50 ist die empirisch ermittelte kohärente Transferfunktion unter logarithmischer Skalierung der Abszisse dargestellt, wobei sich die für $h = 1$ und $h = 3$ errechneten Werte farblich unterscheiden lassen. Zum Vergleich ist außerdem die theoretische kohärente Transferfunktion für $\Gamma = 5,5$ ersichtlich. Die empirischen Werte wurden durch 30 Wiederholungen ermittelt, die Länge der Fehlerbalken entspricht der doppelten Standardabweichung. Aus den für $h = 1$ erhaltenen Werten lässt sich mittels linearer Interpolation die Ortsfrequenz, für welche κ gerade 0,5 wird, als $0,80 \mu\text{m}^{-1}$ ermitteln. In Analogie zum lateralen Periodengrenzwert D_{LIM} ergibt sich ein Kehrwert von $1,25 \mu\text{m}$. Diese Werte, wie allgemein die für $h = 1$ erhaltene Transferfunktion, passt

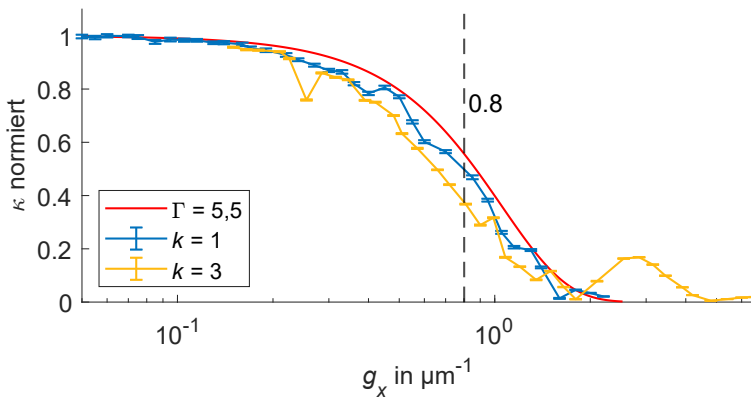


Bild 50: Empirisch ermittelte kohärente Transferfunktion, sowie zum Vergleich die theoretischen Werte für $\Gamma = 5,5$. Die Länge der Fehlerbalken entspricht der doppelten Standardabweichung.

relativ gut zu den theoretischen Werten, abgesehen von einer kleinen Verschlechterung im Vergleich zu diesen. Auffallend ist jedoch die signifikante Abweichung der für $h = 1$ und $h = 3$ erhaltenen Transferfunktionen.

In der Systemtheorie bezeichnet man ein System, dessen Ausgangssignal aufgrund einer Summe von beliebigen Eingangssignalen gleich der Summe der Ausgangssignale auf diese einzelnen Eingangssignale ist, und weiterhin dessen Ausgangssignal aufgrund eines beliebigen Vielfachen eines Eingangssignals eben dem Vielfachen des Ausgangssignals des einfachen Eingangssignals entspricht, als lineares System. Die mathematische Beschreibung eines solchen Systems ist einfach, denn es genügt die Transferfunktion zur vollständigen Beschreibung. Aufgrund dessen geht auch die Fourier-Optik grundsätzlich von der Linearität der betrachteten optischen Systeme aus, gleichwohl jedes reale System, und insbesondere auch optische Messsysteme, Abweichungen von einem idealen linearen System aufweisen. Diese sind verursacht durch physikalische Beschränkungen, beispielsweise dem beschränkten Akzeptanzwinkel des Mikroskopobjektivs. Aus diesem Grund ist die Antwort eines realen Systems auf ein bestimmtes Eingangssignal nicht unabhängig vom gleichzeitigen Vorhandensein noch weiterer Komponenten auf dem Eingangssignal. Bei der für $h = 3$ erhaltenen Transferfunktion ist auf dem Eingangssignal noch eine weitere Ortsfrequenz mit einer dreimal so hohen Amplitude enthalten. Die hierdurch auftretende Beeinflussung der Übertragung des Eingangssignals geringerer Amplitude tritt in Bild 50 deutlich zu Tage. Die weiterhin bei der für $h = 3$ erhaltenen Transferfunktion sichtbare, scheinbare Erhöhung der Übertragung besonders hoher Ortsfrequenzen dürfte auf Rauschen oder die notwendigerweise begrenzte Anzahl aufgenommener Messpunkte zurückzuführen sein. [332, 415, 417, 418]

Topographische räumliche Auflösung

Untersuchungen zur topographisch räumlichen Auflösung des fokusabstandsmodulierten Konfokalsensors an einem Normal mit periodischer Rechteckform unterschiedlicher Formperiode finden sich in [P15]. Ein solches Normal bietet jedoch lediglich eine begrenzte Anzahl diskreter Ortsfrequenzen. Demgegenüber bietet ein Siemens-Stern ein kontinuierliches Spektrum an unterschiedlichen Ortsfrequenzen [419]. Im Folgenden wird die topographisch räumliche Auflösung des Konfokalsensors ohne und mit Fokusabstandsmodulation an einem solchen Normal untersucht. Während die Norm die Messung und Auswertung des Siemens-Sterns mittels zu diesem konzentrischer, kreisförmiger Profile postuliert [404, 8.8.2, Anmerkung], besteht eine zweite und insbesondere bei einem Punktsensor erheblich schnellere Möglichkeit in der Messung und Auswertung lediglich zweier durch das Zentrum des Sterns verlaufender Geraden, wobei die eine in einer Furche, die

andere auf einem danebenliegenden Plateau liegt [420]. Unabhängig von der gewählten Mess- und Auswertestrategie hat die Genauigkeit der Bestimmung der Position des Zentrums des Siemens-Sterns einen erheblichen Einfluss auf die empirisch bestimmte topographische räumliche Auflösung [421, 422]. Die Position des Zentrums ist letztendlich über die Kanten der Rillen definiert, wobei diese jedoch mittels optischer Messverfahren aufgrund des limitierten Akzeptanzwinkels des Mikroskopobjektivs und sich daher ergebender, teils erheblicher Messabweichungen [423, 424], nur relativ ungenau lokalisierbar sind.

Im Folgenden wird daher ein Verfahren vorgestellt, mittels dessen sich zunächst die Position des Zentrums des Siemens-Sterns bestimmen lässt, um anschließend die durch dieses Zentrum verlaufenden Linienscans zur Auswertung und Ermittlung der topographischen räumlichen Auflösung heranzuziehen. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens sowie eine Untersuchung der Auswirkung eines ungenau identifizierten Zentrums auf die ermittelte topographische räumliche Auflösung ist in [P12] zu finden. Das Verfahren wurde zunächst angewandt, um die topographisch räumliche Auflösung des Konfokalsensors ohne Fokusabstandsmodulation zu ermitteln. Anschließend wurde die topographisch räumliche Auflösung des Konfokalsensors mit Fokusabstandsmodulation mittels dieses Verfahrens bestimmt. Als Messobjekt diente ein Siemens-Stern mit 18 Rillen, einem Radius r von $70\ \mu\text{m}$ und einer nominalen Rillentiefe von $200\ \text{nm}$ der sogenannten Bento Box des *National Physical Laboratory* (NPL) [425].

Zur Bestimmung des WKS wurden zunächst 18 Punkte etwas außerhalb des Siemens-Sterns manuell angefahren und an jedem Punkt das axiale Übertragungssignal aufgenommen (vgl. Bild 51, rote Kreise). Die entsprechenden Topographiepunkte wurden durch Anpassen einer Gauß-Funktion an das axiale Übertragungssignal bestimmt. Weiterhin wurde an diese so erhaltenen 18 Topografiepunkte eine Ebene eingepasst, welche die xy -Ebene des WKS festlegt. Zur Bestimmung der Position der Kanten wurde ausgehend von jedem dieser 18 Punkte eine Abtastung in Richtung des manuell in etwa lokalisierten Zentrums des Siemens-Sterns durchgeführt und die Position des Minimums des Signals der Fotodiode U_{FD} ermittelt. Eine solche Abtastung ist in Bild 52 ersichtlich, die so ermittelten Positionen der Kanten sind in Bild 51 als rote Kreuze dargestellt. An diese 18 ermittelten Kantenpositionen, bzw. genauer deren Orthogonalprojektionen auf die xy -Ebene des WKS, wurde zur vorläufigen Bestimmung des Zentrums des Siemens-Sterns ein Kreis angepasst, dessen Mittelpunkt außerdem der Ursprung des WKS ist. Da bei optischen Messsystemen eine Korrelation zwischen der Genauigkeit eines Topografiepunktes und dessen Amplitude des axialen Übertragungssignals besteht [426], wurden Topografiepunkte, deren Amplitude des axialen Übertra-

gungssignals eine gewisse Schwelle unterschritt, eliminiert. Der Schwellwert war hierbei 50 % der Amplitude des an einer ebenen Stelle neben dem Sinusstern erhaltenen axialen Übertragungssignals. Dies erklärt das Fehlen von Datenpunkten in den Topografiewerten, insbesondere an Kanten.

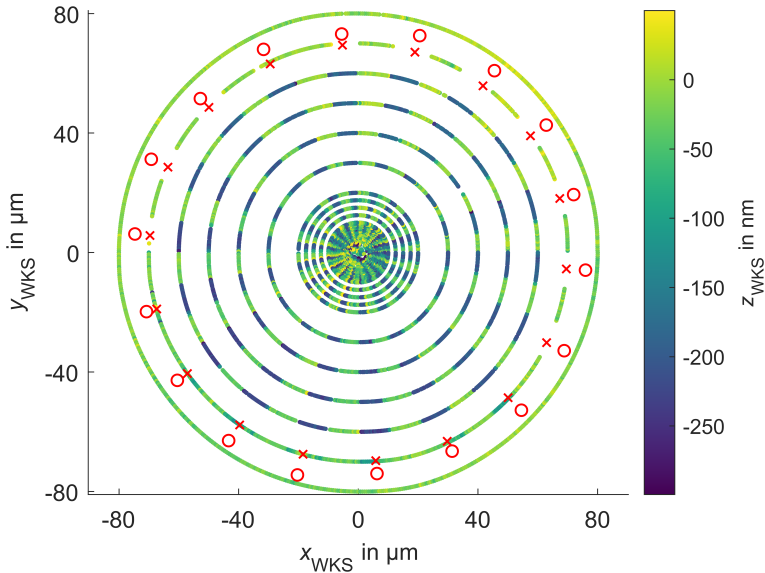


Bild 51: Bestimmung des WKS des Siemens-Sterns. Die manuell angefahrenen Punkte außerhalb des Siemens-Sterns sind als rote Kreise, die ermittelten Positionen der Kanten als rote Kreuze dargestellt. Bild modifiziert nach [P12].

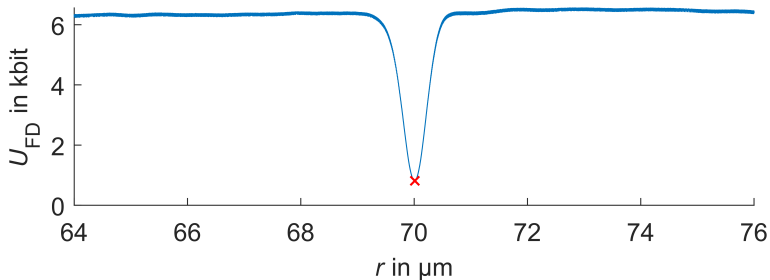


Bild 52: Laterale Abtastung ausgehend von außerhalb des Siemens-Sterns in Richtung dessen Zentrums. Als rotes Kreuz ist die ermittelte Position der Kante markiert. Bild modifiziert nach [P12].

Zur Bestimmung der Orientierung der Rillen um die z-Achse des WKS genügt eine radiale Abtastung bei einem gut auflösbaren Radius. Die Vielzahl der in Bild 51 ersichtlichen radialen Abtastungen dient lediglich zu Illustrationszwecken. Beispielhaft ist in Bild 53 der Radialschnitt bei $r = 60 \mu m$ dargestellt,

an welchen weiterhin eine Sinusfunktion angepasst wurde. Die Amplitude \hat{z} und die Phase ϕ der Sinusfunktion wurden nach

$$\hat{z} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (32)$$

und

$$\phi = \text{atan2}(Y, X) \quad (33)$$

errechnet, wobei X und Y durch Fourierreihenentwicklung aus den N Messwerten und $i = 1, \dots, N$ nach

$$X = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N z_{\text{WKS},i} \cdot \sin\left(2\pi \frac{18i}{N}\right) \quad (34)$$

und

$$Y = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N z_{\text{WKS},i} \cdot \cos\left(2\pi \frac{18i}{N}\right) \quad (35)$$

bestimmt wurden. In ϕ ist die Information über die Rotation der Rillen des Siemens-Sterns um die z -Achse des WKS enthalten.

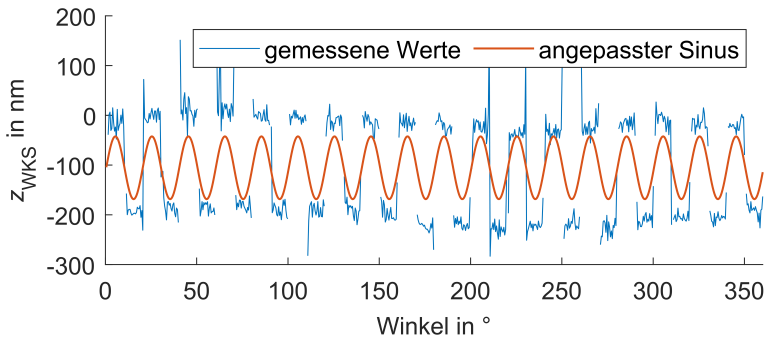


Bild 53: Radialschnitt bei $r = 60 \mu\text{m}$. Bild modifiziert nach [P12].

Zur Bestimmung der topographischen räumlichen Auflösung wurden je 31 parallele Abtastungen mit einem Abstand von 50 nm zueinander sowohl mittig in einer Furche als auch mittig auf einem benachbarten Plateau durchgeführt. Die Richtung der Abtastungen war $(\phi + 90^\circ)/18$ bzw. um 10° versetzt hierzu. Jede Abtastung wurde mit einer Länge von 50 μm und einem Punktabstand von 5 nm durchgeführt. In Bild 54 sind U_{FD} und z_{WKS} dieser Abtastungen dargestellt. Die gestrichelte schwarze Linie kennzeichnet die durch das im Vorherigen bestimmte Zentrum verlaufende laterale Abtastung. Wie aus dem Bild deutlich wird, weist diese Abtastung jedoch einen leichten Versatz zum

eigentlichen Zentrum desselben auf. Mittels U_{FD} lässt sich die Abtastung bestimmen, welche durch das eigentliche Zentrum des Siemens-Sterns verläuft (gestrichelte rote Linie). U_{FD} wird verwendet, da dieses Signal keine störenden Kanteneffekte aufweist. Die Abtastung, welche durch das eigentliche Zentrum verläuft ist diejenige, bei welchem die Plateaus zu den beiden Seiten des Zentrums am nächsten beieinanderliegen. Auf diese Weise wurde die durch das eigentliche Zentrum des Siemens-Sterns verlaufende Abtastung sowohl auf dem Plateau als auch in der danebenliegenden Furche bestimmt. Das neu bestimmte Zentrum entspricht dem Schnittpunkt dieser beiden Abtastungen. Durch Berechnung von Δ_z als Differenz der auf dem Plateau und auf der danebenliegenden Furche erhaltenen Topografiewerte z_{WKS} glei-

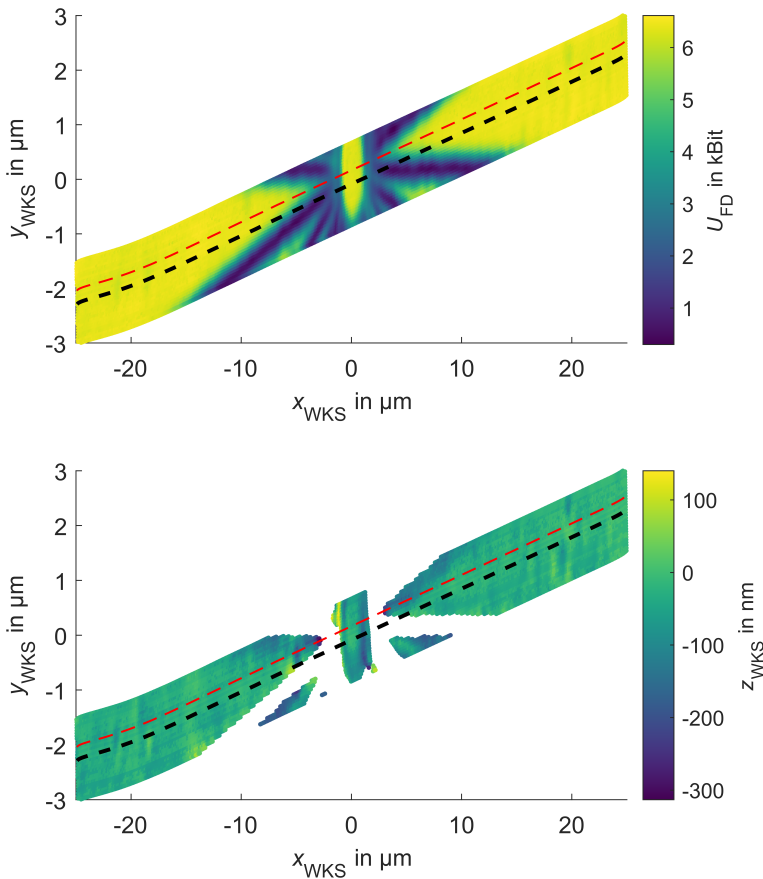


Bild 54: Laterale Abtastungen auf dem Plateau einer Rille. Die gestrichelte schwarze Linie verläuft durch das im Vorherigen bestimmte Zentrum des Siemens-Sterns, die gestrichelte rote Linie durch das neu bestimmte Zentrum desselben. Bild modifiziert nach [P12].

chen (vorzeichenbehafteten) Abstands zum neu bestimmten Zentrum, und Umrechnung dieses Abstands zur entsprechenden Strukturwellenlänge

$$\lambda_S = \frac{2\pi \cdot r}{18} \quad (36)$$

lässt sich in Anlehnung an das in [420] beschriebene Vorgehen die in Bild 55 dargestellte zweiseitige Transferfunktion des Sensors ermitteln. Hierbei wurde Δ_z anhand des Mittelwerts der in rot dargestellten, bei hohen Strukturwellenlängen erhaltenen Werte, normiert. Für D_{LIM} ergibt sich ein Wert von 2,22 μm . Eine detaillierte Beschreibung der Signalauswertung ist in [P12] zu finden.

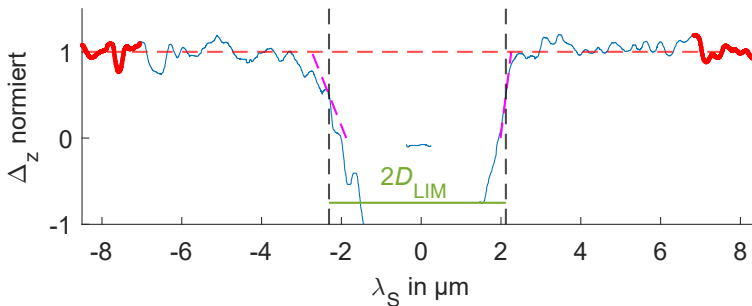


Bild 55: Bestimmung von D_{LIM} des Konfokalsensors ohne Fokusabstandsmodulation. Bild modifiziert nach [P12].

Der Wert von 2,22 μm liegt deutlich über den im Vorherigen bestimmten Strukturwellenlängen, für welche die kohärente Transferfunktion gerade 0,5 wird (theoretisch: 1,15 μm , empirisch: 1,25 μm). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Topografiewerte, deren Amplitude des axialen Übertragungssignals weniger als 50% der Amplitude des an einer ebenen Stelle neben dem Sinusstern erhaltenen axialen Übertragungssignals betrug, eliminiert wurden, lässt sich anhand von Bild 55 jedoch erkennen, dass die Übertragung der Topografie mit sinkender Strukturwellenlänge tatsächlich wesentlich schneller abnimmt als diejenige der Intensität. Dies könnte wiederum auf die bereits angesprochene Nichtlinearität des realen optischen Systems zurückzuführen sein, welche eine Abhängigkeit des Vermögens zur Auflösung einer Struktur und deren Amplitude bedingt. Eine Gleichsetzung der kohärenten Transferfunktion, welche die Übertragung der Intensität in Beziehung zur Ortsfrequenz der Reflektivität des Messobjekts setzt, und der dimensionellen Transferfunktion, welche die Ortsfrequenz der Topographie und das Übertragungsverhältnis ihrer Amplitude in Beziehung setzt, ist somit nicht möglich.

Nach Einschalten der Fokusabstandsmodulation wurde die topographische räumliche Auflösung ein weiteres Mal bestimmt. Anstatt U_{FD} wurde $Y_{h=2}$ zur Bestimmung der durch das Zentrum des Siemens-Sterns verlaufenden Abtastungen verwendet. In Bild 56 sind die lateralen Abtastungen auf dem Plateau einer Rille in Analogie zu Bild 54 ersichtlich. Nach Auswertung der durch das eigentliche Zentrum des Siemens-Sterns verlaufenden lateralen Abtastungen ergibt sich für D_{LIM} mit Fokusabstandsmodulation ein Wert von $2,16 \mu\text{m}$, welcher somit im Vergleich zum Wert ohne Fokusabstandsmodulation ($2,22 \mu\text{m}$) nur marginal abweicht. Die Vergleichbarkeit des Auflösungsvermögens beider

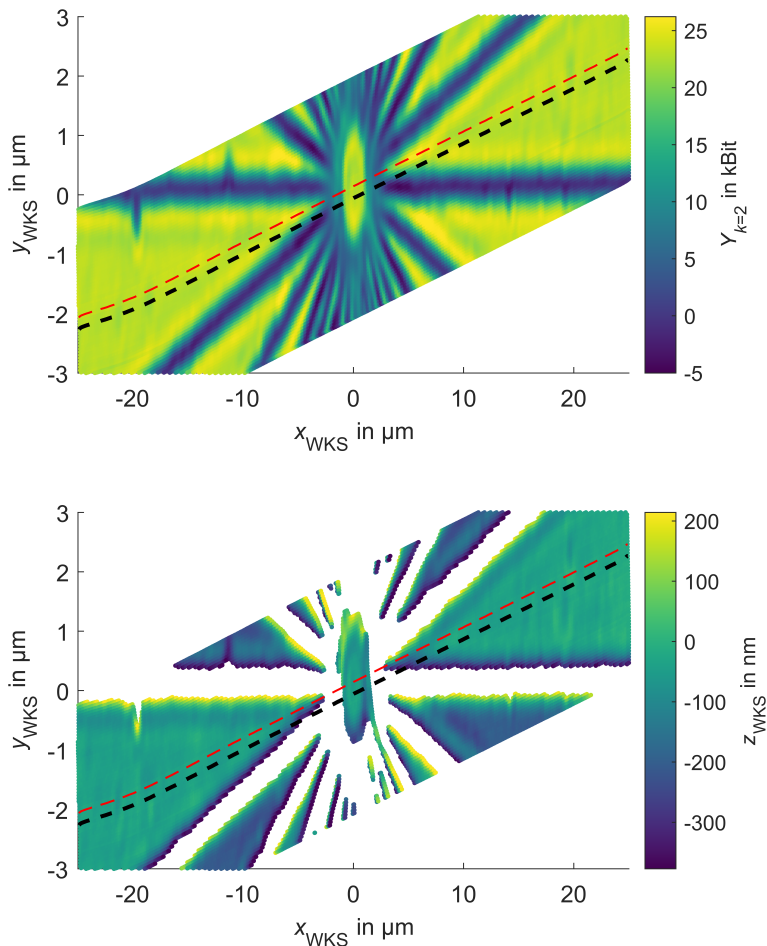


Bild 56: Laterale Abtastungen auf dem Plateau einer Rille des Siemens-Sterns. Die gestrichelte schwarze Linie verläuft durch das anhand der äußeren Kanten des Siemens-Sterns bestimmte Zentrum desselben, die gestrichelte rote Linie wurde mittels $Y_{h=2}$ als die eigentliche durch das Zentrum verlaufende Abtastung bestimmt.

Betriebsmodi ist auch in Bild 57 ersichtlich. In diesem sind die ausgewerteten Topografiewerte radialer Abtastungen um das Zentrum ohne (oben) und mit (unten) Fokusabstandsmodulation ersichtlich. Aufgrund der Vielzahl notwendiger radialer Abtastungen auf unterschiedlichen Höhen zur Messung ohne Fokusabstandsmodulation wurde der Abstand zwischen den einzelnen radialen Messungen für größere Radien bei diesem Modus vergrößert.

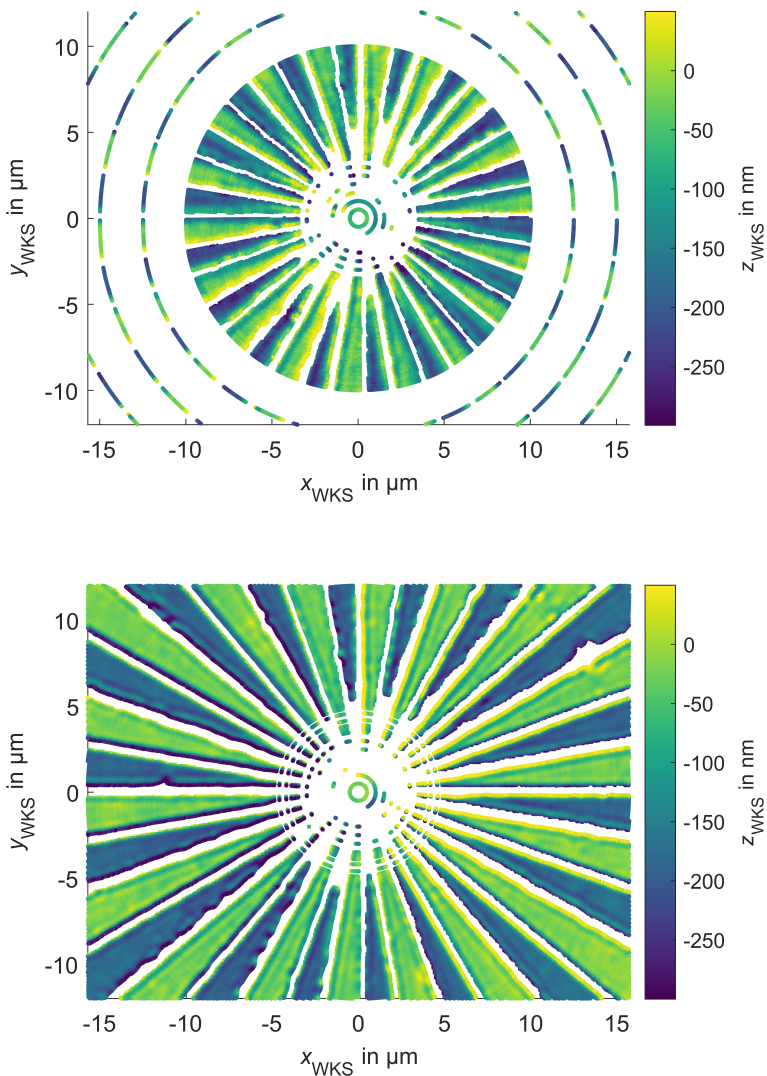


Bild 57: Messung des Siemens-Sterns ohne (oben) und mit (unten) Fokusabstandsmodulation. Zu Illustrationszwecken wurden einzelne Ausreißer entfernt.

5.2 Konfokalmikroskopische Kugelmessung

Während die an flachen Stellen eines Messobjekts mittels Konfokalmikroskopie erhaltenen Messpunkte im Allgemeinen von hoher Genauigkeit sind, kann es mit zunehmender lokaler Steigung und insbesondere an steilen Flanken zu erheblichen, systematischen Abweichungen kommen [423]. Aufgrund der stark verminderten Signalintensität an steilen Flanken lassen sich die Auswirkungen des letztgenannten Effekts mittels des Intensitätsschwellwerts in einem gewissen Maße reduzieren [P15], sodass für die bisher gezeigten konfokalmikroskopischen Messungen von einer hohen Genauigkeit der gültigen Messwerte ausgegangen werden kann. Dies gilt aufgrund der relativ geringen Rauheit desselben auch für die in Unterabschnitt 5.1.1 gezeigten Messungen an einem Raunormal. Entsprechend waren die ermittelten Rauheitskennwerte metrologisch verträglich zu den als **Referenzwerte** (VIM, 5.18) herangezogenen Kalibrierwerten.

Demgegenüber stellt die konfokalmikroskopische Messung einer Kugel eine besondere Herausforderungen dar. So wird bei einer solchen Messung sowohl bei Fokussierung auf die Oberfläche als auch auf das Zentrum derselben ein lokales Intensitätsmaximum detektiert [427]. Verhindern lässt sich dieser Effekt durch eine passend angeordnete, halbseitige Abschattung des Strahlengangs [428]. Aufgrund des bei einer Messung vorhandenen a priori Wissens um die ungefähre Lokalisation der zu messenden Kugel ist dies jedoch zumeist nicht notwendig. Im Gegenteil, bei den bereits in Unterabschnitt 2.6.1 angesprochenen Verfahren zur optischen Krümmungsradiusmessung (beispielsweise [297]) wird dieser Effekt explizit ausgenutzt. Probleme, i. e. systematische Messabweichungen, ergeben sich jedoch bei der Messung einer Topografie, welche lokal Elemente aufweist, deren Form der einfallenden Wellenfront entspricht, was wiederum in einem lokalen Intensitätsmaximum des detektierten Signals resultiert [429]. Die Behebung dieser Probleme durch die bereits angesprochene halbseitige Abschattung des Strahlengangs führt aufgrund der nun vorhandenen Asymmetrie desselben zu neuen Problemen [430].

Systematische Messabweichungen bei der konfokalmikroskopischen Messung eines Messobjekts mit variierender Oberflächennormale, also beispielsweise einer Kugel, ergeben sich außerdem bei Vorhandensein von Aberrationen im optischen Aufbau. Unabhängig des Vorhandenseins von Aberrationen nimmt mit zunehmender lokaler Steigung der Anteil des nicht mehr in das Objektiv zurückreflektierten Strahls zu, was zu einer Reduktion der Amplitude des axialen Übertragungssignals führt. Dies ist für die Signalauswertung, sofern noch ein hinreichendes Signal detektiert werden kann und abgesehen von einer damit unter Umständen einhergehenden Verringerung des Signal-

Rausch-Verhältnisses, jedoch irrelevant. Demgegenüber führen Aberrationen zu einer sich mit der lokalen Steigung ändernden Form des axialen Übertragungssignals. Insbesondere kann sich die axiale Position des Maximums des axialen Übertragungssignals um mehrere 100 nm von der Position der Oberfläche unterscheiden. Bei gleichbleibender Oberflächennormale über alle lateralen Positionen kann dies in aller Regel vernachlässigt werden. Bei einer über die lateralen Positionen variierenden Oberflächennormalen führt die Veränderung der Form des axialen Übertragungssignals jedoch zu entsprechenden systematischen Messabweichungen. In [355] wird zur Korrektur derselben die Messung einer Kugel mit bekanntem Radius vorgeschlagen, um hierüber einen von der lokalen Steigung abhängigen Korrekturwert empirisch zu ermitteln. In dieser Quelle trat jedoch auch eine relativ hohe Standardabweichung der so gemessenen Korrekturwerte zutage [355, S. 83]. [24, 431]

Die Asymmetrie des in Abschnitt 2.8 dargestellten axialen Übertragungssignals deutete bereits auf das Vorhandensein von Aberrationen im optischen Aufbau des fasergekoppelten Konfokalsensors hin. Im ersten Teil dieses Abschnitts werden daher an einem sphärischen Spiegel mit kalibriertem Radius die steigungsabhängigen systematischen Messabweichungen sowohl ohne als auch mit Fokusabstandsmodulation bestimmt.

Wie bereits in Kapitel 3 dargelegt, ist die Aufnahme von Messpunkten an einer Kugel mit einem der Oberflächenmesstechnik zuzuordnenden optischen Messverfahren wie der Konfokalmikroskopie im Allgemeinen auf eine Hemisphäre bzw. sogar nur auf einen relativ kleinen Teil derselben beschränkt. Eine Ausnahme bildet jedoch die bidirektionale Messung unter Zuhilfenahme eines Spiegels (vgl. Bild 10), welche bei einer mikrodimensionalen Kugel und Verwendung eines entsprechenden Mikroskopobjektivs möglich ist. Dieses Verfahren wird auf Basis des fasergekoppelten Konfokalsensors im zweiten Teil dieses Abschnitts evaluiert, wobei auch hierbei insbesondere systematische Messabweichungen untersucht werden, welche sich aus der sich im optischen Strahlengang befindlichen Kugel ergeben könnten. Die Anpassung einer Kugel an Messpunkte erfolgt im Folgenden stets nach der Methode der kleinsten Quadrate unter Anwendung des in [432, S3] beschriebenen Verfahrens.

5.2.1 Steigungsabhängige systematische Messabweichungen

Die Messungen zur Bestimmung der steigungsabhängigen systematischen Messabweichungen wurden an einem silberbeschichteten, konkaven, sphärischen Spiegel vom Typ CM254-019-P01 der Firma Thorlabs, Vereinigte Staaten von Amerika, und einem von der PTB³ kalibrierten Radius $r_k = 38,0306 \text{ mm} \pm 300 \text{ nm}$ ($k = 2$) durchgeführt. Dieser bietet kontinuierlich unterschiedliche lokale Steigungen im Bereich von 0° bis knapp 17° . Zunächst wurde die Antastrichtung des Konfokalsensors bei eingeschalteter Fokusabstandsmodulation mittels dieses Spiegels nach dem in [P16] beschriebenen Verfahren bestmöglich zur z-Achse der NMM-1 ausgerichtet. Bei fünfundzwanzigmaler Bestimmung des Antastwinkels, bezogen auf eben diese Achse, ergab sich ein Mittelwert von $0,06^\circ$, bei einer Standardabweichung von $0,037^\circ$ in x - bzw. y -Richtung (vgl. Bild 58). Dieser wird im Folgenden vernachlässigt.

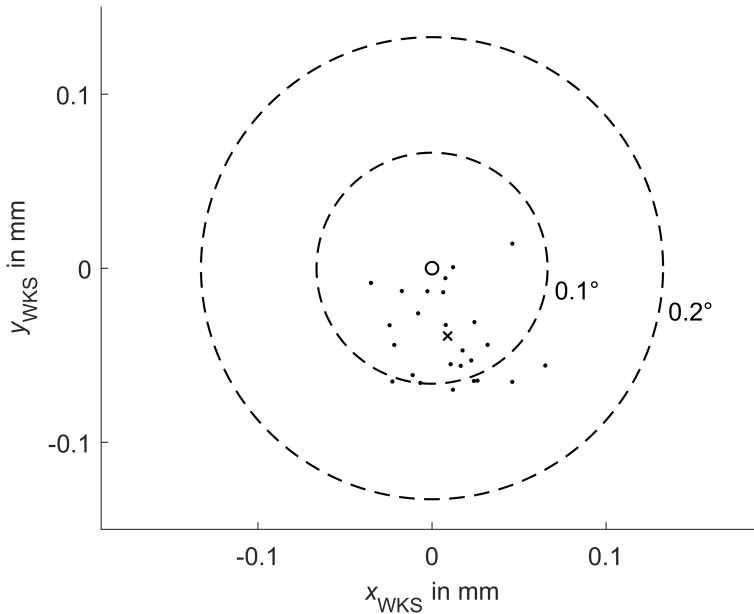


Bild 58: Fünfundzwanzigmale Bestimmung des Antastwinkels. Der Mittelwert ist als Kreuz dargestellt.

Nach der Bestimmung des WKS des sphärischen Spiegels wurde auf diesem zunächst an ausgewählten Positionen das axiale Übertragungssignal (ohne Fokusabstandsmodulation) bzw. die Kalibrierkurve (mit Fokusabstandsmodulation) je fünfundzwanzigmal wiederholt aufgenommen. Die Positionen

³ PTB-Kalibrierschein vom 2023-04-04, Kalibrierzeichen: 2648PTB22.

lassen sich über ihren Polarwinkel θ und Azimutwinkel η angeben. In Bild 59 ist das über 25 Wiederholungen gemittelte axiale Übertragungssignal für die Aufnahmen ohne Fokusabstandsmodulation für drei unterschiedliche θ dargestellt. Neben einer Reduktion der Amplitude des axialen Übertragungssignals führt die Zunahme der lokalen Steigung auch zu einer Veränderung der Form des axialen Übertragungssignals, was insbesondere anhand der normierten Darstellung ersichtlich wird. Für diese Darstellung wurden die z -Werte der einzelnen axialen Übertragungssignale durch Subtraktion des mittels Anpassen einer Gauß-Funktion erhaltenen Topografiewerts ermittelt. Anhand der sich ändernden Form des axialen Übertragungssignals kann jedoch auf das Vorhandensein von Aberrationen im optischen Aufbau geschlossen werden. In diesem Fall ist mit systematischen Abweichungen dieser Topografiewerte von bis zu mehreren 100 nm zu rechnen [24].

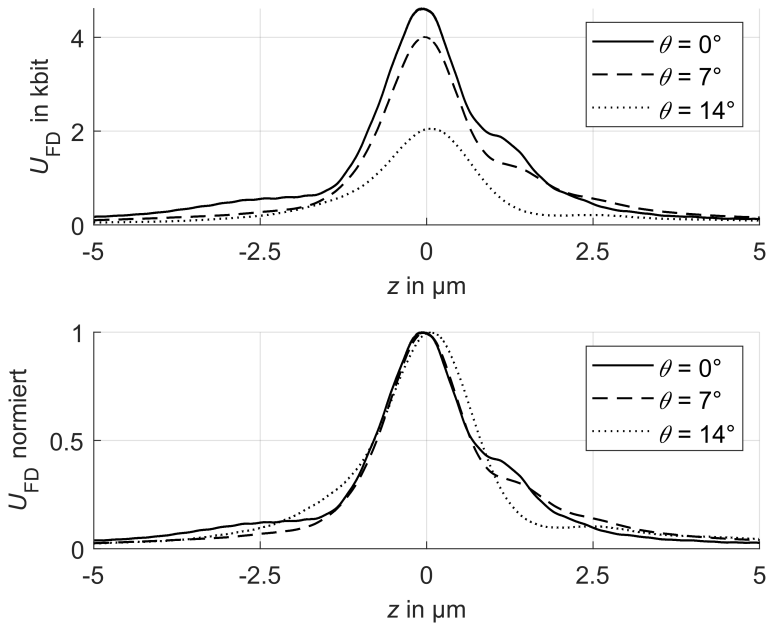


Bild 59: Gemitteltes axiales Übertragungssignal für unterschiedliche θ bei $\eta = 0^\circ$.

In Bild 60 sind die an denselben drei Positionen erhaltenen Signale für axiale Abtastungen mit Fokusabstandsmodulation dargestellt. Die z -Werte wurden in diesem Fall durch Subtraktion des Nulldurchgangs der jeweiligen Kalibrierkurve erhalten. In der oberen Darstellung ist ersichtlich, dass erwartungsgemäß die Amplitude der Signale $X_{h=3}$ und $Y_{h=2}$ mit zunehmendem θ sinkt. Diese Auswirkung allein wäre durch Bildung des Quotienten $X_{h=3} / Y_{h=2}$ kompensierbar (vgl. Unterabschnitt 2.8.2). Wie aus der unteren Darstellung

hervorgeht, führt die zusätzliche Veränderung der Form des axialen Übertragungssignals jedoch zu nicht kompensierbaren systematischen Abweichungen der Quotienten $X_{h=3} / Y_{h=2}$. Zur Quantifizierung derselben sind diese in Bild 61 beispielhaft für die Anwendung der für $\theta = 0^\circ$ erhaltenen Kalibrierkurve auf die axiale Abtastung bei $\theta = 14^\circ$ dargestellt. Um der stark verminderten Amplitude der Signale bei $\theta = 14^\circ$ Rechnung zu tragen, wurde der Schwellwert für $Y_{h=2}$ deaktiviert und errechnete Messwerte entsprechend lediglich anhand von $\max_{3/2}$ und $\min_{3/2}$ zurückgewiesen (vgl. auch hierzu Unterabschnitt 2.8.2). Wie aus der Darstellung hervorgeht, können schon bei einem Antastwinkel von 14° systematische Abweichungen der Kalibrierkurve von mehr als 50 nm auftreten, wobei hierbei eine möglicherweise ebenfalls vorhandene **Nullpunktabweichung** (VIM, 4.28), d. h. eine systematische Abweichung des Nulldurchgangs der Kalibrierkurve, noch gar nicht berücksichtigt wurde.

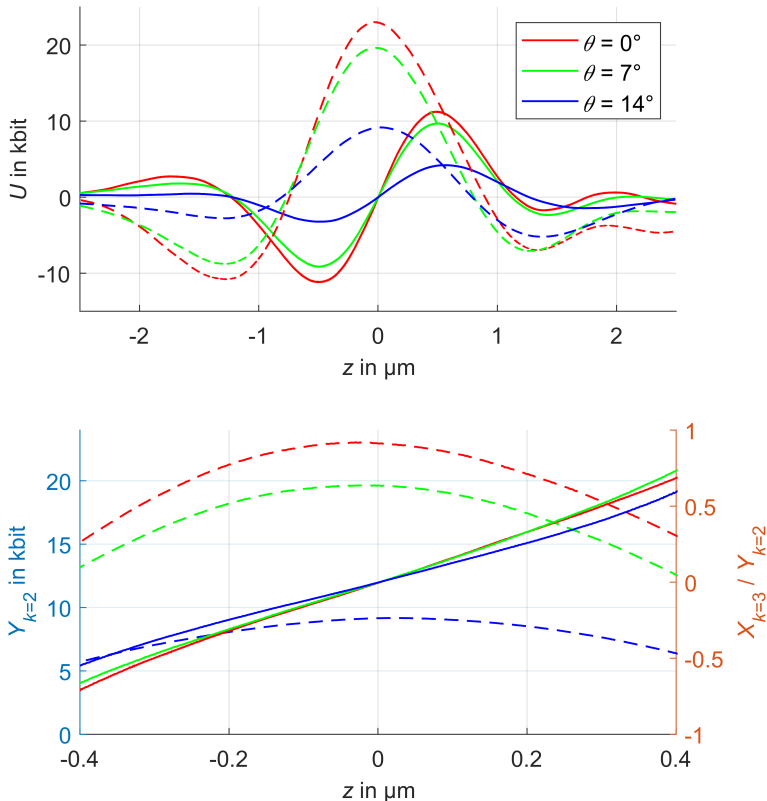


Bild 60: Oben: Gemittelte Signale ($X_{h=3}$ ist jeweils durchgezogen, $Y_{h=2}$ gestrichelt dargestellt) für axiale Abtastungen mit Fokusabstandsmodulation für unterschiedliche θ bei $\eta = 0^\circ$. Unten: $Y_{h=2}$ (gestrichelt, linke Ordinate) und $X_{h=3} / Y_{h=2}$ (durchgezogen, rechte Ordinate) im linearen Bereich der Kalibrierkurve.

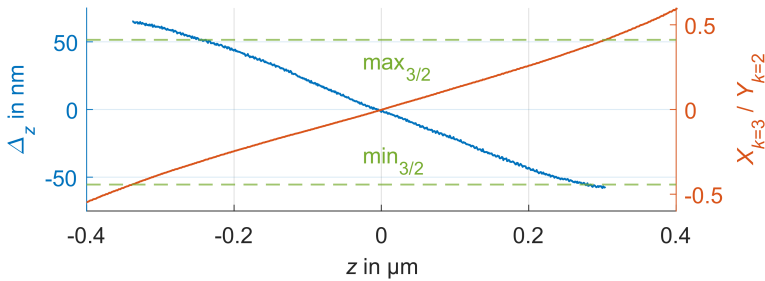
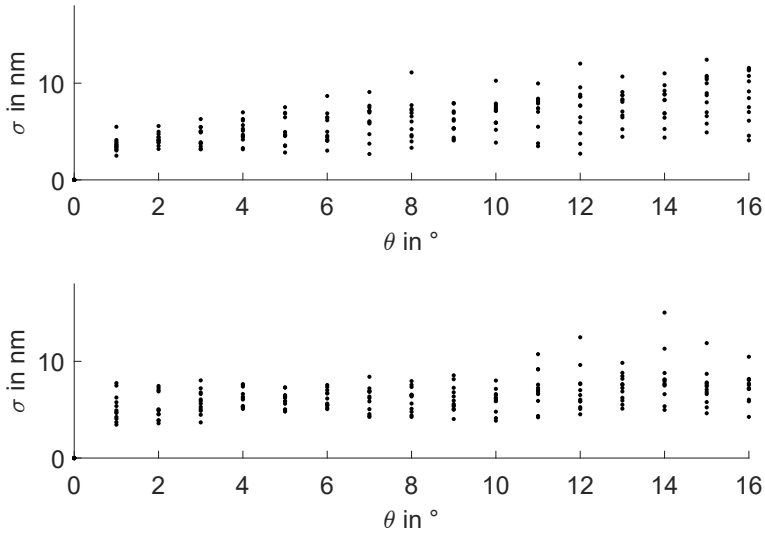
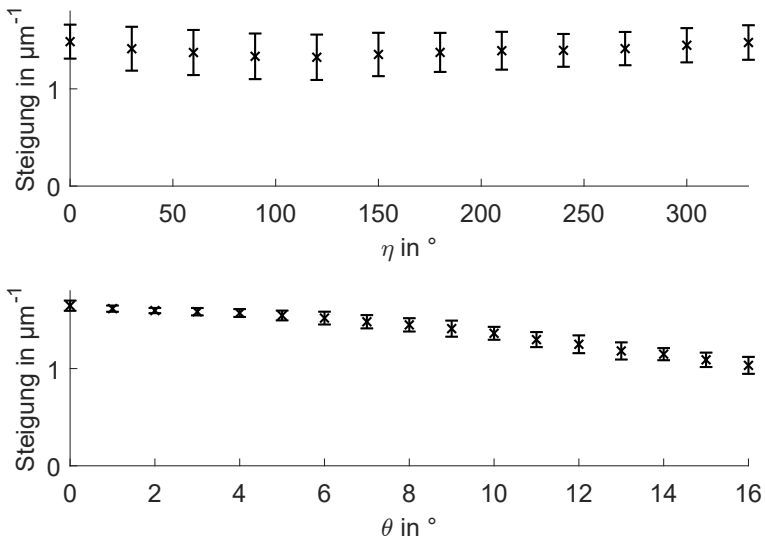


Bild 61: Systematische Abweichungen bei der Anwendung der für $\theta = 0^\circ$ erhaltenen Kalibrierkurve auf die axiale Abtastung bei $\theta = 14^\circ$.

Zur Ermittlung der von der lokalen Steigung des Messobjekts, und somit von θ abhängigen systematischen Messabweichung, erfolgten axiale Aufnahmen in einem Bereich von 0° bis 16° in 1° -Schritten (θ) und von 0° bis 330° in 30° -Schritten (η). Der Messablauf war hierbei, für ein η sämtliche θ zu messen, um anschließend auf das nächste η zu wechseln. Insbesondere wurde $\theta = 0^\circ$ für jedes η gemessen, sodass sich sämtliche Aufnahmen eines η an diesem für alle η identischen Punkt referenzieren lassen. Dies ermöglicht bei der Auswertung die weitestgehende Korrektur auftretender Driften. Zur Trennung zufälliger und systematischer Messabweichungen wurde die gesamte Messung fünfundzwanzigmal wiederholt. In Bild 62 ist die Standardabweichung σ der für die Einzelpunkte errechneten z -Werte ersichtlich, wobei für den Betriebsmodus mit Fokusabstandsmodulation die z -Werte als Nulldurchgang der Kalibrierkurve errechnet wurden. Aus dem Bild geht für beide Betriebsmodi eine aufgrund des abnehmenden Anteils des zurückreflektierten Lichts zu erwartende leichte Erhöhung von σ mit zunehmendem θ hervor. Die nach Formel 20 errechnete kombinierte Standardabweichung über alle Einzelpunkte beträgt $6,4 \text{ nm}$ ohne Fokusabstandsmodulation und $6,5 \text{ nm}$ mit Fokusabstandsmodulation, sodass sich diesbezüglich kein signifikanter Unterschied beider Betriebsmodi feststellen lässt. Für $\theta = 0^\circ$ ist σ aufgrund der Driftkorrektur definitionsgemäß null.

Da sich die variierende Oberflächennormale bei den Aufnahmen mit Fokusabstandsmodulation in einer Veränderung der Steigung der Kalibrierkurve auswirkt, und sich dieser Parameter genau quantifizieren lässt, lässt sich anhand dieser Aufnahmen auch der Einfluss von η genauer untersuchen. In Bild 63, oben, ist die über die 25 Wiederholungen gemittelte Steigung von $X_{h=3} / Y_{h=2}$ über η aufgetragen, wobei die Länge der Fehlerbalken der doppelten Standardabweichung der Steigungen über alle θ entspricht. Im Gegensatz dazu ist in der unteren Darstellung die über die 25 Wiederholungen gemittelte Steigung über θ aufgetragen, wobei die Länge der Fehlerbalken der doppelten Standardabweichung der Steigungen über alle η entspricht.

Bild 62: σ der Einzelpunkte ohne (oben) und mit (unten) Fokusabstandsmodulation.Bild 63: Oben: Steigung von $X_{h=3} / Y_{h=2}$ aufgetragen über η . Die Länge der Fehlerbalken entspricht der doppelten Standardabweichung der Steigungen über θ . Unten: Steigung von $X_{h=3} / Y_{h=2}$ aufgetragen über θ . Die Länge der Fehlerbalken entspricht der doppelten Standardabweichung der Steigungen über η .

Wie anhand dieses Bilds deutlich hervorgeht, liegt für die Steigung eine Abhängigkeit von θ vor, wohingegen eine solche Abhängigkeit von η nicht zu erkennen ist. Entsprechend werden im Folgenden die steigungsabhängigen

systematischen Messabweichungen in Abhängigkeit von θ und gemittelt über alle η bestimmt. Die Mittelung dient insbesondere der Reduktion des Einflusses von Formabweichungen oder einzelner, örtlicher Defekte auf die bestimmten Messabweichungen bzw. deren Korrekturwerte.

Die Korrekturwerte werden für jede der 25 Wiederholungen separat bestimmt und anschließend der Mittelwert errechnet sowie die Standardabweichung betrachtet. Für jede Wiederholung wird an alle Topografiewerte derselben eine Kugel mit dem kalibrierten Radius r_k angepasst, um deren Mittelpunkt $\vec{M} = [M_x \ M_y \ M_z]^T$ zu bestimmen. Anschließend wird für jeden einzelnen der N Messpunkte $([x_i \ y_i \ z_i]^T, i = 1, \dots, N)$ der lokale Polar- und zugleich Antastwinkel nach

$$\theta_i = \arcsin \left(\frac{\sqrt{(x_i - M_x)^2 + (y_i - M_y)^2}}{r_k} \right) \quad (37)$$

errechnet. Die systematische Abweichung eines einzelnen Punkts in z-Richtung lässt sich durch

$$\Delta_{z,i} = z_i - M_z - \cos(\theta_i)r_k \quad (38)$$

bestimmen. Als letzter Schritte zur Berechnung von $\Delta_z(\theta)$ erfolgt die Mittelung aller für ein (nominales) θ erhaltenen Abweichungen und Antastwinkel über η , sowie das Hinzufügen eines Offsets, sodass

$$\Delta_z(\theta = 0^\circ) = 0 \quad (39)$$

gilt. In Bild 64 sind die über die 25 Wiederholungen gemittelten systematischen Abweichungen Δ_z in Abhängigkeit von θ dargestellt. Definitionsgemäß wegen Formel 39 ist die Standardabweichung von $\Delta_z(0^\circ)$ null. Δ_z erreicht einen Wert von bis zu 153 nm mit und -104 nm ohne Fokusabstandsmodulation. Dies deckt sich betragsmäßig mit den nach [24] aufgrund von Aberrationen im optischen Aufbau zu erwartenden Werten. Ansonsten lässt sich anhand des unteren Bildes die höhere Streuung von Δ_z für den Betrieb mit im Vergleich zum Betrieb ohne Fokusabstandsmodulation erkennen. Die nach Formel 20 errechnete kombinierte Standardabweichung $\bar{\sigma}$ über alle θ beträgt 1,6 nm ohne und 2,9 nm mit Fokusabstandsmodulation.

Da die empirisch bestimmten Werte von Δ_z dem negierten Korrekturwert entsprechen, ist es notwendig, auch die Unsicherheit der Ermittlung von Δ_z zu bestimmen. Nach dem GUM errechnet sich der aus den **zufälligen Messabweichungen** (VIM, 2.19) resultierende Unsicherheitsbeitrag, ausgedrückt

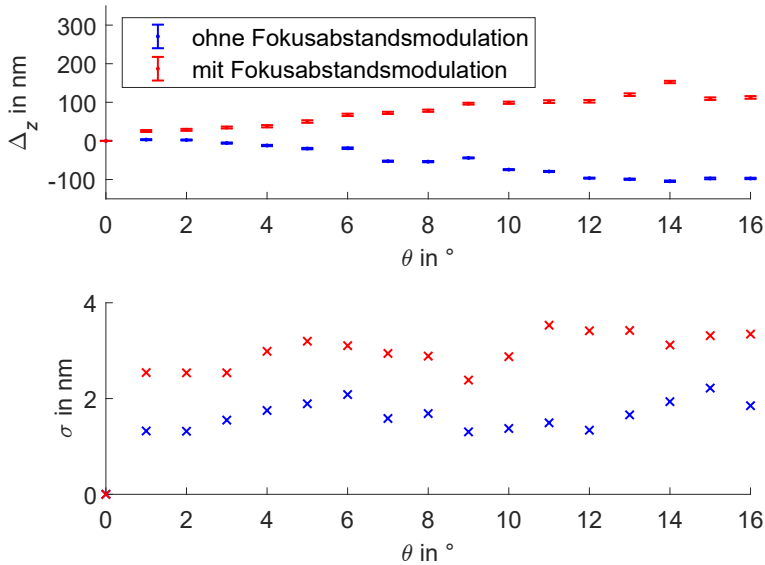


Bild 64: Oben: Über 25 Wiederholungen gemittelt $\Delta_Z(\theta)$. Die Länge der Fehlerbalken entspricht der doppelten Standardabweichung. Unten: Separate Darstellung der Standardabweichung von Δ_Z .

als Standardmessunsicherheit u , eines Mittelwerts aus der Quadratwurzel des Quotienten der Varianz der Einzelwerte und deren Anzahl. Der sich aus der Streuung der Werte ergebende Unsicherheitsbeitrag liegt somit sowohl ohne als auch mit Fokusabstandsmodulation weit unter 1 nm und kann entsprechend vernachlässigt werden. Nicht vernachlässigt werden kann jedoch die Unsicherheit des über alle η berechneten Mittelwerts. Dieser Unsicherheitsbeitrag ist in Abhängigkeit von θ in Bild 65 dargestellt.

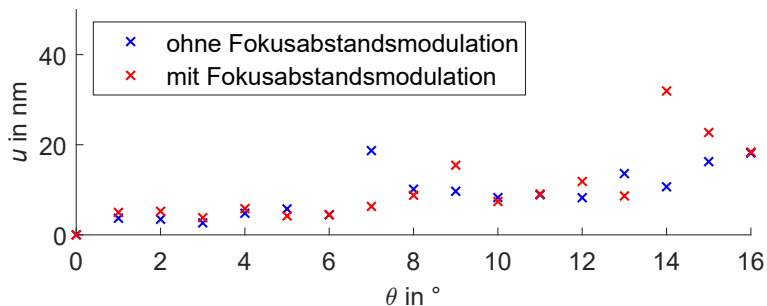


Bild 65: Standardmessunsicherheit des über alle η errechneten Mittelwerts von Δ_Z .

Weitere Unsicherheitsbeiträge resultieren aus der Unsicherheit von r_k sowie aus der Positionierunsicherheit der NMM-1. Für letztere wird in [170, S. 75] für

u ein Wert von 6,7 nm für die x - und y -Achse, sowie ein Wert von 6,8 nm für die z -Achse angegeben. $u(r_k)$ ergibt sich aus dem Kalibrierschein und beträgt 150 nm. Zur Ermittlung des sich aufgrund dieser Unsicherheiten ergebenden Unsicherheitsbeitrags von Δ_z bietet sich die Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation an, denn beispielsweise beeinflusst $r_k \Delta_z$ nicht nur direkt über Formel 38, sondern auch indirekt über die Ermittlung von θ (Formel 37) und der Bestimmung von \vec{M} . In Bild 66 ist das Resultat einer solchen Simulation dargestellt. Dieser Unsicherheitsbeitrag ist unabhängig davon, ob die Messung ohne oder mit Fokusabstandsmodulation durchgeführt wurde. Der maximale Wert von u ergibt sich für $\theta = 16^\circ$ und ist 6,6 nm. Die beiden Unsicherheitsbeiträge (Bild 65 und Bild 66) lassen sich mittels pythagoreische Addition zur kombinierten Standardmessunsicherheit u_c verrechnen. Diese ist in Bild 67 dargestellt und besitzt einen maximalen Wert von 19 nm ohne und 32 nm mit Fokusabstandsmodulation. Die nach Formel 20 über alle θ gemittelte Standardmessunsicherheit beträgt 11 nm ohne und 13 nm mit Fokusabstandsmodulation.

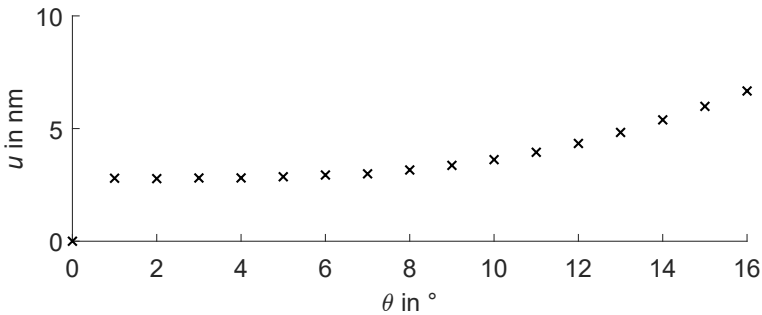


Bild 66: Ermittlung des Einflusses der Unsicherheit von r_k sowie der Positionierunsicherheit der NMM-1 mittels Monte-Carlo-Simulation mit $1 \cdot 10^6$ Stichproben.

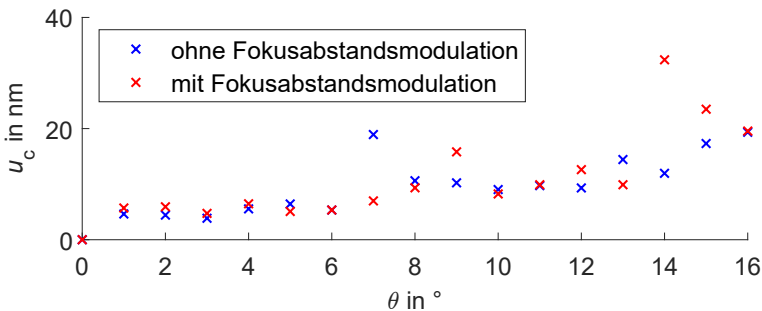


Bild 67: Kombinierte Standardmessunsicherheit von Δ_z .

5.2.2 Bidirektionale Messung einer mikrodimensionalen Kugel

Die bereits in Unterabschnitt 2.6.1 dargestellte bidirektionale optische Messung einer mikrodimensionalen Kugel unter Zuhilfenahme eines Spiegels wird in diesem Unterabschnitt genauer untersucht, wobei als Sensor wie im gesamten bisherigen Kapitel der fasergekoppelte Konfokalsensor eingesetzt wurde. Wie im vorangegangenen Unterabschnitt dargestellt, relativieren sich bei der Messung variierender Oberflächennormale die Vorteile der Fokusabstandsmodulation, da diese sowohl systematische Abweichungen der Steigung der Kalibrierkurve als auch des Nullpunkts derselben hervorrufen. Weiterhin streut der Nullpunkt in ähnlichem Maße, bzw. sogar noch etwas mehr, als die ohne Fokusabstandsmodulation ermittelten Topografiewerte. Die nun folgenden Untersuchungen wurden daher ohne Fokusabstandsmodulation durchgeführt, was ihnen außerdem eine größere Allgemeingültigkeit verleiht, da es sich bei diesem Betriebsmodus um den klassischerweise angewandten handelt. Als Messobjekt diente eine an einem Schaft befestigte Kugel mit einem nominalen Radius von 400 μm der Firma itp GmbH, Deutschland, aus Siliziumnitrid. Wie in [P11] gezeigt, ist das Messverfahren jedoch auch bei einer Rubinkugel anwendbar. Als Spiegel wurde ein silberbeschichteter Planspiegel vom Typ PF05-03-P01 der Firma Thorlabs, Vereinigte Staaten von Amerika, eingesetzt. Der in die NMM-1 integrierte Messaufbau ist in Bild 68 ersichtlich.

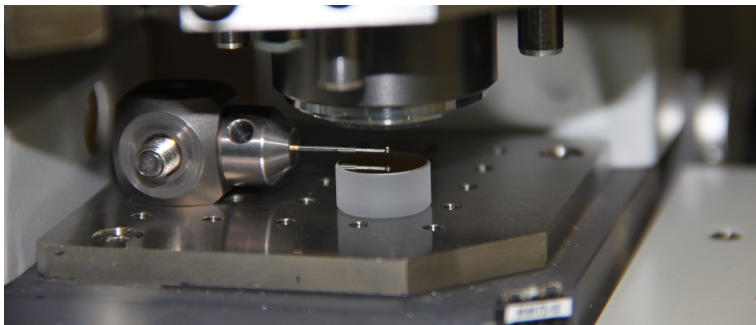


Bild 68: In die NMM-1 integrierter Messaufbau zur bidirektionalen Messung einer mikrodimensionalen Kugel.

Die Grundidee der bidirektionalen optischen Messung einer mikrodimensionalen Kugel unter Zuhilfenahme eines Spiegels lässt sich anhand von Bild 69 nachvollziehen, in welchem U_{FD} für eine kontinuierliche Abtastung vom Zenit der Kugel (durchgezogene Linie) durch den Spiegel (gepunktete Linie) bis zur gespiegelten Kugel (gestrichelte Linie) ersichtlich ist. Im Bild ist auch deutlich das nach [427] zu erwartende lokale Intensitätsmaximum bei Fokus-

sierung auf das Zentrum der Kugel ersichtlich, welches jedoch nicht weiter genutzt wird. Nach den Grundannahmen der Geometrischen Optik lassen sich die sowohl auf der realen als auch auf der gespiegelten Kugel aufgenommenen Topografiewerte durch Berechnung des euklidischen Abstands zum Spiegel an eben diesem referenzieren. Diesem Abstand wird die z -Koordinate zugeordnet, während die x - und y -Koordinate durch Orthogonalprojektion des Topografiewerts auf die Spiegelebene errechnet wird.

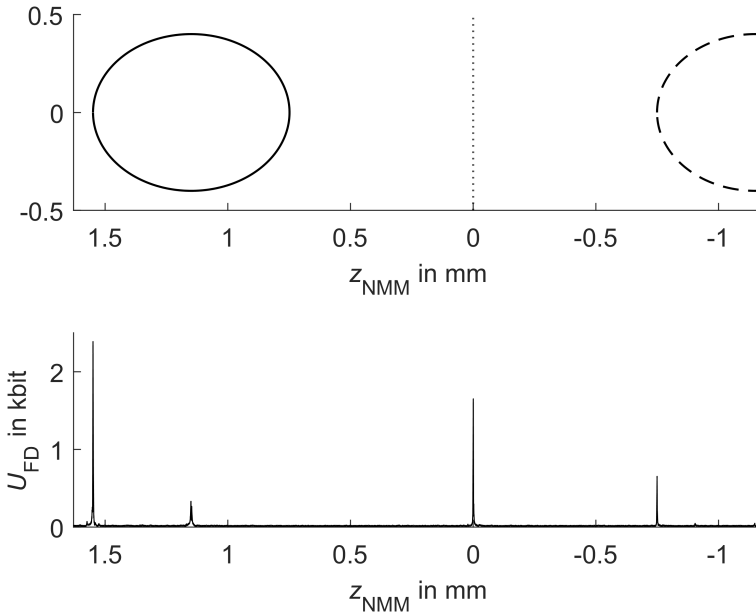


Bild 69: U_{FD} für eine kontinuierliche Abtastung vom Zenit der Kugel (durchgezogene Linie) durch den Spiegel (gepunktete Linie) bis zur gespiegelten Kugel (gestrichelte Linie). Zu Illustrationszwecken wurde z_{NMM} ein Offset hinzuaddiert.

In Bild 70 ist das axiale Übertragungssignal auf der Oberseite der Kugel, auf dem Spiegel direkt unter der Kugel und auf der gespiegelten Kugel dargestellt. Für diese Darstellung wurden die z -Werte der einzelnen axialen Übertragungssignale durch Subtraktion des mittels Anpassen einer Gauß-Funktion erhaltenen Topografiewerts ermittelt. Insbesondere aus der normierten Darstellung ist die sich verändernde Form des axialen Übertragungssignals deutlich zu erkennen. Daher ist auch für diese Topografiewerte mit relativ hohen systematischen Abweichungen zu rechnen. Die starke Verminderung der Amplitude des axialen Übertragungssignals auf der gespiegelten Kugel ist auf die sich im Strahlengang befindliche Kugel und die durch diese hervorgerufene teilweise Abschattung desselben zurückzuführen. Beim axialen Übertragungssignal auf dem Spiegel wird dieser Effekt aufgrund der wesentlich besseren Reflexi-

onseigenschaften desselben im Vergleich zur Kugel kompensiert. Neben der durch die Kugel hervorgerufenen Abschattung könnte es an dieser jedoch auch zu Beugungseffekten kommen [185, S. 980 ff.], welche wiederum zu systematischen Abweichungen führen könnten.

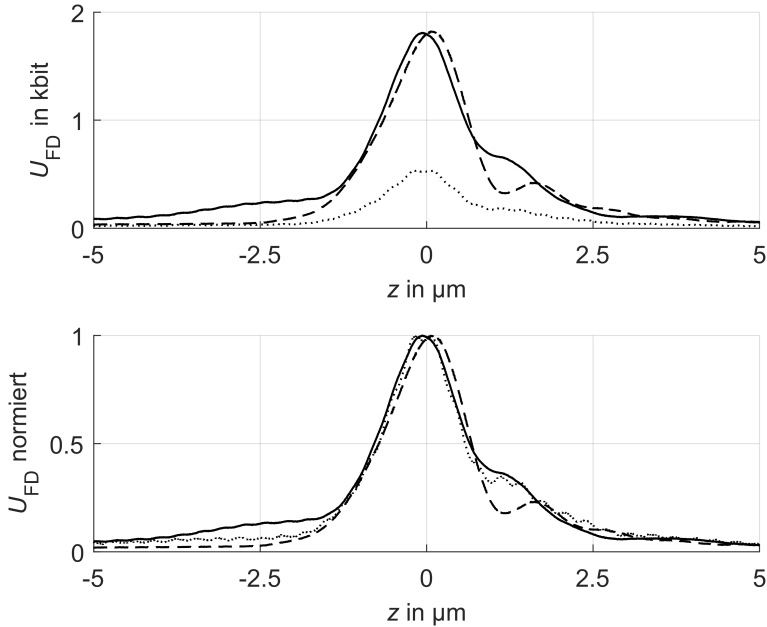


Bild 70: Axiales Übertragungssignal auf der Oberseite der Kugel (durchgezogen), auf dem Spiegel direkt unter der Kugel (gestrichelt) und auf der gespiegelten Kugel (gepunktet).

Um die aufgrund der sich im Strahlengang befindlichen Kugel hervorgerufenen systematischen Abweichungen zu quantifizieren, sowie eine Trennung systematischer und zufälliger Abweichungen gewährleisten zu können, wurden auf dem Spiegel direkt unterhalb der Kugel in einem quadratischen Feld mit etwa 2,9 mm Kantenlänge 17×17 , also in Summe 289 axiale Übertragungssignale fünfundzwanzigmal wiederholt aufgenommen und die Topografiewerte mittels Anpassen einer Gauß-Funktion ermittelt. Für die äußersten lateralen Positionen ist somit sichergestellt, dass die an diesen aufgenommenen axialen Übertragungssignale nicht von der Kugel, deren Zentrum in etwa 1,2 mm über dem Spiegel schwebte, beeinflusst wurden. Anschließend wurde die Kugel entfernt, ohne hierbei den Spiegel zu verschieben, und an denselben Positionen nochmals fünfundzwanzigmal wiederholt die axialen Übertragungssignale aufgenommen und die Topografiewerte ermittelt. Aufgrund der Dauer dieser Messungen sind Driften unvermeidlich. Die Effekte derselben lassen sich jedoch effektiv unterdrücken, indem für jede Messwiederholung

der Mittelwert der z -Werte denselben abgezogen wird. Eine Korrektur in lateraler Richtung ist hingegen aufgrund des in dieser Richtung wesentlich verminderten Auflösungsvermögens des Sensors nicht nötig. Hinsichtlich der Messpräzision liegt die nach Formel 20 errechnete kombinierte Standardabweichung der 289 z -Werte ohne Abschattung bei 5,1 nm, mit Abschattung bei 18 nm. Diese Erhöhung ist auf die Abschattung zurückzuführen, denn die äußersten, von der Kugel definitiv nicht beeinflussten z -Werte streuen auch für die Messungen mit Abschattung im Mittel lediglich um 4,0 nm. In Bild 71 sind über die 25 Wiederholungen gemittelt die Amplitude und die Topografiewerte mit Abschattung dargestellt. Hierbei sind die z -Werte der Abstand zu einer an die schwarz markierten Punkte, für welche eine Beeinflussung durch die Kugel ausgeschlossen werden kann, angepassten Ebene. Zum Vergleich ist in Bild 72 die Amplitude sowie die Topografiewerte ohne sich im Strahlengang befindlicher Kugel abgebildet. Der Effekt der Kugel und des in Richtung von y_{NMM} platzierten Schafts ist sowohl anhand der Amplitude als auch anhand der Topografiewerte deutlich zu erkennen. So beträgt die größte Abweichung zur angepassten Ebene 87 nm für die Messung ohne Abschattung, aber 2,2 μm mit Abschattung (diese Werte wurden als Ausreißer in den Bildern zu Illustrationszwecken entfernt).

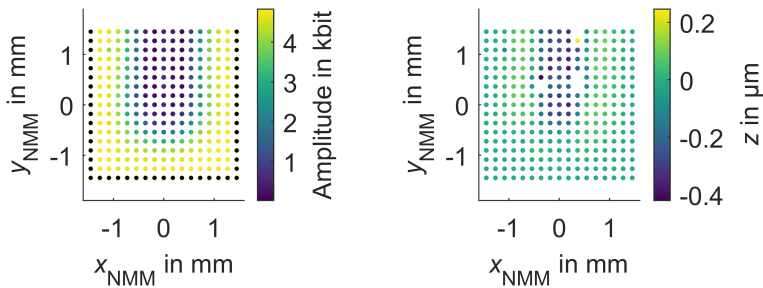


Bild 71: Mittlere Amplitude (links) und Topografiewerte (rechts) für die Messung auf dem Spiegel bei sich im Strahlengang befindlicher Kugel. Zu Illustrationszwecken wurde x_{NMM} und y_{NMM} ein Offset hinzuaddiert sowie Ausreißer entfernt.

Anhand der nicht abgeschatteten Referenzwerte (schwarz markiert in Bild 71) lässt sich eine mögliche Drift zwischen den Messungen mit und ohne Kugel herausrechnen und anschließend für jeden Messpunkt die systematische Messabweichung Δ_z errechnen. Weiterhin lässt sich die Signifikanz dieser Abweichung unter Berücksichtigung der Einzelpunktstreuungen mit (σ_a) und ohne (σ_o) Abschattung in Anlehnung an [72] anhand der normierten Abweichung

$$E_n = \left| \frac{1}{2} \frac{\Delta_z}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_o^2}} \right| \quad (40)$$

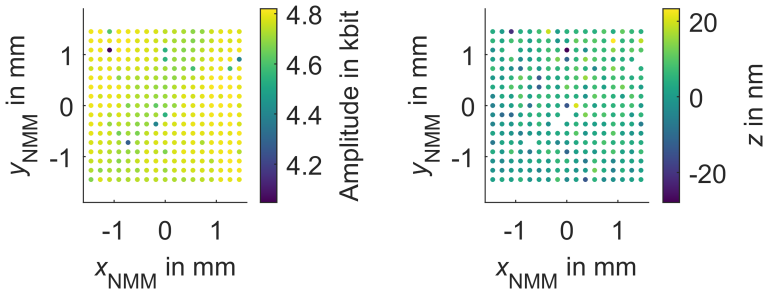


Bild 72: Mittlere Amplitude (links) und Topografiewerte (rechts) für die Messung auf dem Spiegel ohne sich im Strahlengang befindlicher Kugel. Zu Illustrationszwecken wurde x_{NMM} und y_{NMM} ein Offset hinzuaddiert sowie Ausreißer entfernt.

bewerten, wobei $E_n > 1$ die Signifikanz der Abweichung signalisiert. In Bild 73 ist Δ_z und E_n aller Werte dargestellt, für welche $E_n > 1$ gilt. Die Signifikanz der Beeinflussung der Topografiewerte durch die Kugel und insbesondere auch den Schaft ist deutlich zu erkennen. Die betragsmäßig größte Abweichung liegt bei $2,17 \mu\text{m}$, im Schnitt (berechnet als Mittelwert der Beträge von Δ_z) liegt Δ_z bei 134 nm . Die betragsmäßig größten Werte für Δ_z treten erwartungsgemäß recht zentral auf, da dort die hervorgerufene Abschattung am höchsten ist. In genau diesen Positionen befindet sich die Kugel jedoch insbesondere bei der Messung der gespiegelten Kugel.

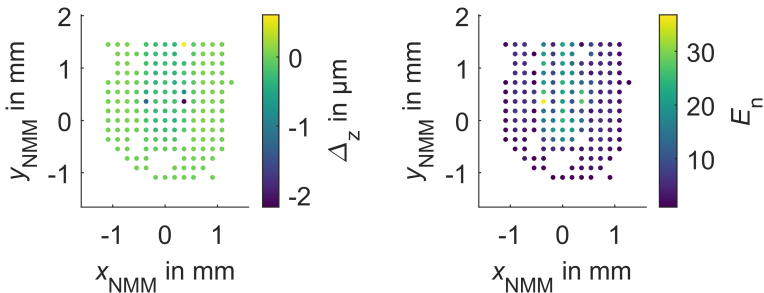


Bild 73: Δ_z (links) und E_n (rechts) für alle lateralen Positionen, für welche $E_n > 1$.

Der genauen Bestimmung der Position des Spiegels kommt bei der bidirektionalen Messung eine besondere Bedeutung zu, da alle Messwerte an diesem referenziert werden. Um einen negativen Einfluss der soeben gezeigten systematischen Messabweichungen auf diese Bestimmung auszuschließen, erscheint es sinnvoll, den Spiegel so zu messen, dass sich während der Messung die Kugel nicht im Strahlengang befindet. Daher wurde für die bidirektionale Messung einer mikrodimensionalen Kugel der Spiegel nicht

anhand von Messpunkten direkt unterhalb der Kugel, sondern seitlich versetzt zu diesen, bestimmt (vgl. schwarz markierte Messpunkte in Bild 71). An der Kugel selbst wurden auf beiden Hemisphären jeweils 162 Messpunkte mit einem maximalen Polarwinkel von 20° aufgenommen. Wie üblich wurden Topografiewerte, für welche die Amplitude der angepassten Gauß-Funktion den Schwellwert von 50 % der auf dem Zenit der jeweiligen Hemisphäre angepassten Gauß-Funktion unterschritt, zurückgewiesen. In Bild 74 ist das Ergebnis einer solchen bidirektionalen Messung einer Mikrokugel dargestellt, wobei die Messwerte durch Subtraktion des Mittelpunkts einer an eben diese angepassten Kugel in das WKS überführt wurden. Der Radius der so angepassten Kugel beträgt $400,58 \mu\text{m}$. Dieser Wert übersteigt die vom Hersteller mit 150 nm angegebene maximale Abweichung des Durchmessers, selbst unter Berücksichtigung der mit 125 nm angegebenen maximalen Formabweichung. Da sich die reale Kugel jedoch bei der Messung der gespiegelten Kugel unweigerlich im optischen Strahlengang befindet, ist insbesondere hinsichtlich der auf der Unterseite der Kugel aufgenommenen Messwerte mit signifikanten, systematischen Messabweichungen zu rechnen. Eine genaue Quantifizierung dieser Abweichung ist jedoch nicht möglich, da keine hochgenau kalibrierte mikrodimensionale Kugel zur Verfügung steht.

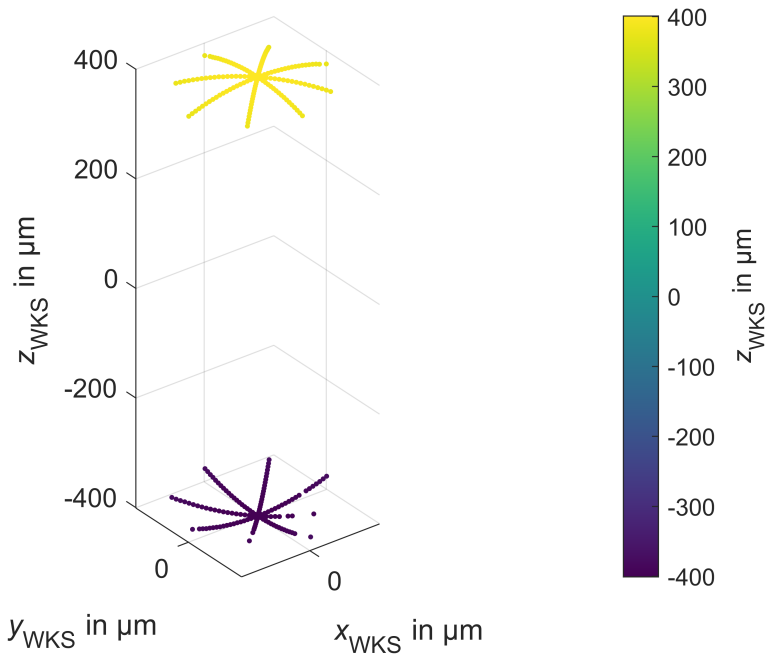


Bild 74: Ergebnis der bidirektionalen Messung einer mikrodimensionalen Kugel aus Siliziumnitrid unter Zuhilfenahme eines Spiegels. Die oberen Messwerte sind die auf der Oberseite der Kugel aufgenommenen.

Zur Bewertung der Präzision dieses Messverfahrens wurde die Messung der Mikrokugel fünfundzwanzigmal wiederholt durchgeführt und jeweils eine Kugel nach der Methode der kleinsten Quadrate an die Messpunkte beider Hemisphären angepasst. Zum Vergleich wurde eine Kugel außerdem an die Messpunkte der einzelnen Hemisphären angepasst. In Tabelle 4 ist der mittlere Radius \bar{r} sowie die Standardabweichung der Radien σ_r für diese drei Fälle, also der Berücksichtigung der Messpunkte der oberen Hemisphäre, der unteren Hemisphäre sowie beider Hemisphären, ersichtlich. Das bidirektionale Messverfahren ermöglicht im Vergleich zur Berücksichtigung der Messpunkte lediglich einer Hemisphäre eine wesentliche Verbesserung der Präzision der ermittelten Radien. So beträgt die Standardabweichung des Radius in diesem Fall lediglich 3,0 nm, im Vergleich zu 164 nm bei Berücksichtigung der Messpunkte lediglich der oberen und 629 nm bei Berücksichtigung der Messpunkte lediglich der unteren Hemisphäre. Die auf der unteren im Vergleich zur oberen Hemisphäre stattfindende Verschlechterung der Präzision ist mit der aufgrund der Abschattung durch die Kugel einhergehenden, wesentlichen Reduktion der Signalamplitude zu erklären. Interessanterweise liegt jedoch der an der unteren Hemisphäre bestimmte mittlere Radius dem nominalen Wert am nächsten.

Tabelle 4: Mittelwert und Standardabweichung der bei fünfundzwanzigmaliger Wiederholung bestimmten Radien der mikrodimensionalen Kugel.

Hemisphäre	obere	untere	beide
\bar{r}	402,76 μm	400,30 μm	400,582 μm
σ_r	164 nm	629 nm	3,0 nm

5.3 Fazit

In diesem Kapitel wurden Untersuchungen zur Eignung der unterschiedlichen Betriebsmodi des am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik aufgebauten fasergekoppelten Konfokalsensors zur Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper gezeigt. In Unterabschnitt 5.1.2 wurde unter anderem der Einfluss der Fokusabstandsmodulation auf die topographisch räumliche Auflösung untersucht, wobei kein signifikanter Einfluss festgestellt werden konnte. Anhand der Messung eines sphärischen Spiegels mit kalibriertem Radius konnten in Unterabschnitt 5.2.1 signifikante Messabweichungen bei der Messung variierender Oberflächennormale bei sämtlichen Betriebsmodi festgestellt werden. Beim Betriebsmodus ohne Fokusabstandsmodulation kann es hinsichtlich der ermittelten Topografiewerte schon bei Steigungen von unter 16° zu systematischen Abweichungen von etwa 100 nm kommen.

Die maximale Verschiebung des Nullpunkts der Kalibrierkurve beim Betrieb mit Fokusabstandsmodulation liegt bei etwa 150 nm (vgl. Bild 64). Zusätzlich kommt es zu signifikanten Abweichungen der Steigung der Kalibrierkurve. Die Möglichkeit der Korrektur der Abweichungen des Nullpunkts der Kalibrierkurve (mit Fokusabstandsmodulation) bzw. des anhand des axialen Übertragungssignals ermittelten Topografiewerts (ohne Fokusabstandsmodulation) wurde anhand einer Unsicherheitsanalyse bewertet. Hierbei ergab sich eine maximale Standardmessunsicherheit von 19 nm ohne und 32 nm mit Fokusabstandsmodulation für Korrekturwerte, welche für einen maximalen Antastwinkel von 16° ermittelt wurden.

Auch hinsichtlich der in Unterabschnitt 5.2.2 gezeigten bidirektionalen Messung einer mikrodimensionalen Kugel unter Zuhilfenahme eines Spiegels konnten durch die sich im Strahlengang befindliche Kugel hervorgerufene systematische Messabweichungen nachgewiesen werden. Diese können für einzelne Punkte über $2\ \mu\text{m}$ betragen, liegen im Schnitt jedoch bei etwas mehr als 100 nm. Für die Bestimmung der Position des Spiegels ist es möglich, diesen so zu messen, dass sich die Kugel währenddessen nicht im Strahlengang befindet. Für die Durchführung der Messung an der unteren Hemisphäre der Kugel befindet sich die Kugel jedoch in jedem Fall im Strahlengang, sodass für diese Messpunkte mit relativ hohen systematischen Messabweichungen zu rechnen ist. Eine Korrektur dieser Abweichungen war in Ermangelung eines hochgenau kalibrierten Referenzobjekts nicht möglich, jedoch konnte hinsichtlich der Präzision der bidirektionalen Konfokalmikroskopie ein hervorragender Wert im unteren einstelligen Nanometerbereich für den gemessenen Radius der mikrodimensionalen Kugel nachgewiesen werden.

6 Zielerreichung und Ausblick

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen Beitrag zur Schließung der metrologischen Lücke hinsichtlich hochauflösender, nanometrologischer 3D-KMS zu leisten. Ausgehend von dieser übergeordneten Zielstellung und dem in Kapitel 2 dargestellten Stand der Technik wurde in Abschnitt 3.1 der bestehende Handlungsbedarf abgeleitet. Zur weiteren Schließung der metrologischen Lücke wurde hierbei die Verbesserung der Genauigkeit mikrotaktile Tastsysteme als am zielführendsten identifiziert. Aus den beiden Hauptproblemfeldern der mikrotaktile Antastung, der nicht hinreichend genau bekannten Grobgestalt der Tastkugel (i. e. deren Durchmesser und Formabweichungen) sowie dem nicht hinreichend verstandenen Einfluss anziehender Kräfte auf die Antastung, ließ sich als *conditio sine qua non* der Genauigkeitsverbesserung mikrotaktile Tastsysteme die nanometrologische Charakterisierung mikrodimensionaler Referenzkörper bzw. der Tastkugel selbst, sowohl hinsichtlich der Grob-, als auch der Feingestalt, ableiten. Davon ausgehend wurde in Abschnitt 3.2 die Zielsetzung der Arbeit konkretisiert. Im ersten Teil dieses letzten Kapitels wird diese Ziele rekapitulierend und die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend die Zielerreichung dargestellt. Im zweiten Teil des Kapitels wird davon ausgehend noch bestehender Handlungsbedarf zur Erfüllung des übergeordneten Ziels skizziert.

6.1 Zielerreichung

Als erster Teil der Zielstellung der Arbeit sollten hinsichtlich der Charakterisierung der Feingestalt eines nanometrologischen Referenzkörpers die metrologischen Eigenschaften eines am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik aufgebauten SFM mit einstellbarer Antastrichtung untersucht werden, um darauf aufbauend dessen potentielle Eignung zur Charakterisierung der Feingestalt nanometrologischer Referenzkörper zu bewerten. Konkret waren folgende vier Fragestellungen zu beantworten:

- 1) Was sind die metrologischen Eigenschaften des SFM mit einstellbarer Antastrichtung?
- 2) Lassen sich diese Eigenschaften durch Umgestaltung des Sensorkopfs unter Beseitigung potentiell instabiler Verbindungen im Messkreis verbessern?
- 3) Lassen sich diese Eigenschaften durch Verwendung eines selbstsensierenden und selbstaktuierenden Cantilevers und unter Beseitigung des Piezoaktors aus dem Messkreis verbessern?

- 4) Ist eines der Messsysteme bzw. eine etwas modifizierte Variante desselben potentiell zur Charakterisierung der Feingestalt nanometrologischer Referenzkörper geeignet?

Der Beantwortung dieser Fragen war Kapitel 4 gewidmet, in welchem anhand umfangreicher Untersuchungen die metrologischen Eigenschaften des ursprünglichen SFM (Abschnitt 4.1, Frage 1), einer modifizierten Variante davon mit klemmendem Sensorhalter zur Beseitigung potentiell instabiler Verbindungen aus dem Messkreis (Abschnitt 4.2) sowie des Betriebs mit selbstaktuierendem Cantilever (Abschnitt 4.3) ermittelt wurden. Die Ergebnisse wurden in Unterabschnitt 4.4.1 zur Beantwortung der Fragen 2 und 3 zusammengefasst. Hierbei ließ sich kein signifikanter Unterschied der metrologischen Eigenschaften der drei Konfigurationen feststellen, sodass diese beiden Fragen mit „nein“ zu beantworten sind. Jedoch konnten für alle drei Konfigurationen hervorragende metrologische Eigenschaften mit Standardabweichungen im zumeist einstelligen Nanometerbereich, und somit die prinzipielle Eignung des Messsystems zur Charakterisierung der Feingestalt nanometrologischer Referenzkörper (Frage 4), festgestellt werden.

Als zweiter Teil der Zielstellung der Arbeit war hinsichtlich der Charakterisierung der Grobgestalt eines nanometrologischen Referenzkörpers die bidirektionale optische Messung unter Zuhilfenahme eines Spiegels am Beispiel einer mikrodimensionalen Kugel zu untersuchen. Da der hierfür eingesetzte fasergekoppelte Konfokalsensor die Möglichkeit der Fokusabstandsmodulation und somit unterschiedliche Betriebsmodi bietet, sollte zum einen untersucht werden, inwiefern sich diese hinsichtlich ihrer topographischen räumlichen Auflösung unterscheiden, und zum anderen, inwiefern es bei diesen bei der Messung gekrümmter Oberflächen mit variabler Oberflächennormale bzw. bei sich im Strahlengang befindlicher Kugel zu systematischen Messabweichungen kommt. Konkret waren folgende vier Fragestellungen zu beantworten:

- 1) Unterscheidet sich der Betrieb des Konfokalsensors mit und ohne Fokusabstandsmodulation hinsichtlich der topographisch räumlichen Auflösung?
- 2) Kommt es bei der Messung an variablen Oberflächennormalen in den unterschiedlichen Betriebsmodi zu systematischen Abweichungen?
- 3) Kommt es bei der bidirektionalen Messung zu systematischen Abweichungen aufgrund der sich im Strahlengang befindlichen Kugel?
- 4) Ist zumindest einer der Betriebsmodi des Konfokalsensors zur Charakterisierung der Grobgestalt nanometrologischer Referenzkörper geeignet?

Der Beantwortung dieser Fragen war Kapitel 5 gewidmet. In Unterabschnitt 5.1.2 wurde die Auswirkung der Fokusabstandsmodulation auf die topographische räumliche Auflösung anhand von Messungen an einem topo-

graphischen Siemens-Stern untersucht, wobei sich kein signifikanter Unterschied feststellen ließ (Frage 1). Bei den im Unterabschnitt 5.2.1 dargestellten, umfangreichen empirischen Untersuchungen an einem kalibrierten sphärischen Spiegel zu an variablen Oberflächennormalen auftretenden, systematischen Messabweichungen konnten ganz erhebliche Abweichungen bei sämtlichen Betriebsmodi festgestellt werden (Frage 2). Mit Fokusabstandsmodulation kommt es aufgrund variierender Oberflächennormale zu signifikanten Abweichungen der Steigung der Kalibrierkurve. Weiterhin verursachen bereits Steigungen von unter 16° systematische Abweichungen des Nullpunkts der Kalibrierkurve von etwa 150 nm. Die Abweichungen der Topografiewerte beim Betrieb ohne Fokusabstandsmodulation liegen bei etwa 100 nm. Aufgrund des sich somit relativierenden Vorteils der Fokusabstandsmodulation bei der Messung gekrümmter Oberflächen mit variierender Oberflächennormale, wurden die Untersuchungen zur bidirektionalen Messung unter Zuhilfenahme eines Spiegels lediglich ohne Fokusabstandsmodulation durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden in Unterabschnitt 5.2.2 gezeigt. Hierbei ließen sich ebenfalls teilweise erhebliche systematische Abweichungen aufgrund der sich im Strahlengang befindlichen Kugel nachweisen (Frage 3). Die Frage nach der Eignung der Konfokalmikroskopie zur Charakterisierung der Grobgestalt nanometrologischer Referenzkörper (Frage 4) ist daher differenziert zu beantworten: Aufgrund der Möglichkeit, eine ähnliche Anzahl an Messpunkten auf beiden Hemisphären der mikrodimensionalen Kugel aufzunehmen, ermöglicht die bidirektionale Konfokalmikroskopie zwar die hochpräzise Bestimmung des Radius der Kugel mit einer Standardabweichung im unteren einstelligen Nanometerbereich (vgl. Tabelle 4), es ist jedoch mit diesen Wert bei Weitem übersteigenden systematischen Messabweichungen zu rechnen. Um diese zu korrigieren, bedürfte es eines hinsichtlich der Grobgestalt hochgenau charakterisierten nanometrologischen Referenzkörpers. Die originäre Charakterisierung eines solchen Referenzkörpers ist somit zum jetzigen Stand mit der bidirektionalen Konfokalmikroskopie nicht zu leisten. Sie könnte jedoch perspektivisch zu einem die Vorteile der optischen Messung bewahrenden Messverfahren werden, um eine solche Charakterisierung zu vervielfältigen, ohne hierbei (aufgrund der hervorragenden Präzision) die Genauigkeit wesentlich zu verschlechtern, etwa zur Kalibrierung von **Sekundärnormalen** (VIM, 5.5).

6.2 Ausblick

Hinsichtlich der rasterkraftmikroskopischen Charakterisierung der Feingestalt nanometrologischer Referenzkörper konnte zwar die prinzipielle Eignung und auch die hervorragenden metrologischen Eigenschaften des SFM mit einstellbarer Antastrichtung gezeigt werden, es zeigten sich jedoch auch

außerhalb des eigentlichen SFM-Sensors liegende Potentiale zur Verbesserung des Messsystems. Denn die relativ große, sich komplett im metrologischen Kreis befindliche Rotationskinematik bedingt eine hohe thermische Sensitivität des Messsystems und dadurch bedingt eine aufgrund der erreichbaren Temperaturstabilität nach unten auf einen Wert von etwa 7 nm begrenzte Vergleichpräzision. Durch eine Anpassung der Rotationskinematik ließe sich zum einen die thermische Sensitivität des Messsystems noch signifikant reduzieren, zum anderen die Einstellbarkeit der Antastrichtung auf einen noch größeren Bereich erhöhen. Aufgrund der nicht auszumaachenden Unterschiede hinsichtlich der metrologischen Eigenschaften der unterschiedlichen Sensorhalter könnte auch diesbezüglich ein neuer, sehr einfach gestalteter, dafür aber aus Materialien mit einem besonders niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten hergestellter Sensorhalter konzipiert werden.

Zur originären Charakterisierung der Grobgestalt eines nanometrologischen Referenzkörpers, i. e. einer Charakterisierung, welche nicht selbst auf einen solchen nanometrologischen Referenzkörper angewiesen ist, kann die bidirektionale Konfokalmikroskopie nach jetzigem Stand aufgrund der zu erwartenden signifikanten systematischen Abweichungen, welche aus der sich im Strahlengang befindlichen Kugel resultieren, nicht beitragen. Bei Verfügbarkeit eines solchen Referenzkörpers könnte sie jedoch dazu eingesetzt werden, weitere, der Ähnlichkeitsbedingung nach DIN EN ISO 15530-3 [140] genügende Körper zu kalibrieren. Aufgrund der hervorragenden und im einstelligen Nanometerbereich liegenden Präzision des Messverfahrens ist hierbei nur mit einer geringen Vergrößerung der Unsicherheit des in dieser Weise kalibrierten Körpers im Vergleich zum Referenzkörper zu rechnen. Voraussetzung wäre jedoch, das Messsystem noch um zumindest eine Rotationsachse zu erweitern, um Messpunkte an der gesamten Umfangslinie der Kugel aufnehmen zu können. Zur Aufnahme von Messpunkten auf der dem Schaft gegenüberliegenden Seite wäre entweder eine zweite Rotationsachse erforderlich, oder aber es könnten durch Hinzufügen eines weiteren, gekippten Spiegels Messpunkte an dieser Seite aufgenommen werden.

Einer Schlussbemerkung, wenngleich diese nicht direkt im Zusammenhang mit dem übergeordneten Ziel dieser Arbeit steht, sind die Ergebnisse zu sich bei variierenden Oberflächennormalen ergebenden systematischen Messabweichungen wert. Das bereits in [24] gezeigte Auftreten dieser Abweichungen konnte im Rahmen dieser Arbeit mittels eines hochgenauen Positioniersystems und eines hochgenau kalibrierten sphärischen Spiegels bestätigt werden. Die Abweichungen sind selbst für Winkel, die weit von dem entfernt waren, was als die Einsatzgrenze des Mikroskopobjektivs angesehen werden könnte, ganz erheblich und übersteigen die Standardabweichung der Einzel-

punkte um ein Vielfaches. Dennoch wird auf diese Problematik, etwa in der DIN EN ISO 25178-607 [319] oder der VDI/VDE 2655 Blatt 1.2 [347], in welchen die nach dem Prinzip der Konfokalmikroskopie messenden Oberflächenmessgeräte bzw. deren Kalibrierung beschrieben wird, nicht eingegangen. Stattdessen findet sich beispielsweise in der Norm mit „das maximale Signal der axialen Übertragung wird erreicht, wenn die Oberfläche sich exakt in der Brennpunktebene des Mikroskopobjektivs befindet“ [319, S. 19] ein Hinweis, welcher bei Vorhandensein von Aberrationen im optischen Aufbau sowie der Messung einer Oberfläche mit variierender Normale seine Gültigkeit verliert. Die vielfach aufgezeigte, mangelnde metrologische Verträglichkeit mittels optisch antastender Messverfahren generierter Messergebnisse [74, 75, 433–440] könnte, sicherlich neben anderer wichtiger Einflussfaktoren wie etwa der Nichtbeachtung der aufgrund der topographischen räumlichen Auflösung gegebenen Einsatzgrenzen eines Messsystems [108], auch hierin begründet sein. Denn selbst bei Bestimmung der winkelabhängigen systematischen Abweichungen an einem Bauteil mit kalibriertem Radius kommt bei der Messung einer unbekanntem Kontur und der Anwendung des entsprechenden Korrekturwerts ein weiterer signifikanter Unsicherheitsbeitrag hinzu: Die Bestimmung der lokalen Steigung und somit des anzuwendenden Korrekturwerts auf Grundlage abweichungsbehafteter Topografiewerte. Denn zumeist beinhaltet ein Oberflächenmessgerät nicht auch noch ein integriertes Winkelmesssystem, wie dies beispielsweise in [441] gezeigt wurde, sondern der lokale Winkel müsste zunächst anhand eben der Topografiewerte, die es zu korrigieren gilt, bestimmt werden. Mit welcher Genauigkeit dies, und darauf aufbauend die Korrektur der systematischen Abweichungen möglich ist, bedarf weiterer Untersuchungen. In jedem Fall dürfte die Unsicherheit selbst eines korrigierten Messwerts dessen Präzision bei Weitem übersteigen, sodass letztere einen ungenügenden Parameter zur Bewertung der Qualität konfokalmikroskopischer Messungen an Bauteilen mit variierenden Oberflächennormalen darstellt.

Literaturverzeichnis

- [1] Taniguchi, N. „Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing“. *CIRP Ann.* 32.2 (1983), S. 573–582.
- [2] Masuzawa, T. „State of the Art of Micromachining“. *CIRP Ann.* 49.2 (2000), S. 473–488.
- [3] Geiger, M.; Kleiner, M.; Eckstein, R.; Tiesler, N. und Engel, U. „Micro-forming“. *CIRP Ann.* 50.2 (2001), S. 445–462.
- [4] Byrne, G.; Dornfeld, D. und Denkena, B. „Advancing Cutting Technology“. *CIRP Ann.* 52.2 (2003), S. 483–507.
- [5] Masuzawa, T. und Tönshoff, H. K. „Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools“. *CIRP Ann.* 46.2 (1997), S. 621–628.
- [6] Uhlmann, E.; Mullany, B.; Biermann, D.; Rajurkar, K. P.; Hausotte, T. und Brinksmeier, E. „Process chains for high-precision components with micro-scale features“. *CIRP Ann.* 65.2 (2016), S. 549–572.
- [7] Gebhardt, A.; Steinkopf, R.; Scheiding, S.; Risse, S.; Damm, C.; Zeh, T. und Kaiser, S. „MERTIS - Optics Manufacturing and Verification“. *Proc. SPIE.* Bd. 7808. 78080Q. 2010.
- [8] Fang, F. Z.; Zhang, X. D.; Weckenmann, A.; Zhang, G. X. und Evans, C. „Manufacturing and measurement of freeform optics“. *CIRP Ann.* 62.2 (2013), S. 823–846.
- [9] Liu, K.; Peirs, J.; Ferraris, E.; Lauwers, B. und Reynaerts, D. „Micro Electrical Discharge Machining of Si_3N_4 -based Ceramic Composites“. *Proc. of the 4th Int. Conf. on Multi-Material Micro Manufacture.* 2008, S. 161–166.
- [10] Kamaraj, A. B.; Sundaram, M. M. und Mathew, R. „Ultra high aspect ratio penetrating metal microelectrodes for biomedical applications“. *Microsyst. Technol.* 19.2 (2013), S. 179–186.
- [11] Blondiaux, N.; Diserens, M.; Chauvy, P.-F.; Oudot, B. und Pugin, R. „Manufacturing of hierarchically structured surfaces for decorative applications“. *Proc. 21st euspen Int. Conf.* 2021, S. 119–120.
- [12] Segerman, H. „3D Printing for Mathematical Visualisation“. *Math. Intell.* 34.4 (2012), S. 56–62.
- [13] Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B. und Martina, F. „Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints“. *CIRP Ann.* 65.2 (2016), S. 737–760.

- [14] Schmidt, M.; Merklein, M.; Bourell, D.; Dimitrov, D.; Hausotte, T.; Wegener, K.; Overmeyer, L.; Vollertsen, F. und Levy, G. N. „Laser based additive manufacturing in industry and academia“. *CIRP Ann.* 66.2 (2017), S. 561–583.
- [15] Rogkas, N.; Vakouftsis, C.; Spitas, V.; Lagaros, N. D. und Georgantzinou, S. K. „Design Aspects of Additive Manufacturing at Microscale: A Review“. *Micromachines* 13.775 (2022), S. 1–23.
- [16] Feynman, R. P. „Plenty of Room at the Bottom“. *Engineering and Science* (1960).
- [17] Alting, L.; Kimura, F.; Hansen, H. N. und Bissacco, G. „Micro Engineering“. *CIRP Ann.* 52.2 (2003), S. 635–657.
- [18] Vollertsen, F. „Categories of size effects“. *Prod. Eng. Res. Devel.* 2 (2008), S. 377–383.
- [19] Hansen, H. N.; Carneiro, K.; Haitjema, H. und De Chiffre, L. „Dimensional Micro and Nano Metrology“. *CIRP Ann.* 55.2 (2006), S. 721–743.
- [20] Krah, T.; Wedmann, A.; Kniel, K. und Härtig, F. „Measurement and Evaluation Processes for Inner Micro Structures“. *Proc. 13th euspen Int. Conf.* 2013.
- [21] Weckenmann, A.; Peggs, G. und Hoffmann, J. „Probing systems for dimensional micro- and nano-metrology“. *Meas. Sci. Technol.* 17.3 (2006), S. 504–509.
- [22] Lehmann, P. „Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures“. *Opt. Lett.* 35.11 (2010), S. 1768–1770.
- [23] Hiersemenzel, F.; Petzing, J. N.; Leach, R. K.; Helml, F. S. und Singh, J. „Areal Texture and Angle Measurements of Tilted Surfaces using Focus Variation Methods“. *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Surface Metrology.* 2012.
- [24] Rahlves, M.; Roth, B. und Reithmeier, E. „Systematic errors on curved microstructures caused by aberrations in confocal surface metrology“. *Opt. Express* 23.8 (2015), S. 9640–9648.
- [25] *DIN EN ISO 14253-1:2018. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (ISO 14253-1:2017).*
- [26] Berndt, G.; Hultsch, E. und Weinhold, H. „Funktionstoleranz und Messunsicherheit“. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 17.2 (1968), S. 465–471.

- [27] Abbe, E. „Meßapparate für Physiker“. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 10 (1890), S. 446–448.
- [28] Hausotte, T. *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen - Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*. 1. Aufl. Berlin: Pro Business, 2011.
- [29] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T.; Müller, A. und Balzer, F. „Nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200 - a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology“. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 4.3 (2016), S. 034004.
- [30] Michelson, A. A. „The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether“. *The American Journal of Science. Third Series* 22 (1881), S. 127–132.
- [31] Gao, W.; Kim, S. W.; Bosse, H.; Haitjema, H.; Chen, Y. L.; Lu, X. D.; Knapp, W.; Weckenmann, A.; Estler, W. T. und Kunzmann, H. „Measurement technologies for precision positioning“. *CIRP Ann.* 64.2 (2015), S. 773–796.
- [32] Sheu, D.-Y. und Leach, R. „Evaluation method for micro-CMM spherical stylus tips using micro-EDM on-machine measurement“. *Proc. 10th Int. Symp. on Measurement and Quality Control*. 2010.
- [33] Bosse, H.; Kunzmann, H.; Pratt, J. R.; Schlamming, S.; Robinson, I.; Podesta, M. de; Shore, P.; Balsamo, A. und Morantz, P. „Contributions of precision engineering to the revision of the SI“. *CIRP Ann.* 66.2 (2017), S. 827–850.
- [34] Syam, W. P.; Jianwei, W.; Zhao, B.; Maskery, I.; Elmadih, W. und Leach, R. „Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation“. *Precis. Eng.* 52 (2018), S. 494–506.
- [35] Küng, A.; Meli, F. und Thalmann, R. „Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe“. *Meas. Sci. Technol.* 18.2 (2007), S. 319–327.
- [36] Schwenke, H.; Neuschaefer-Rube, U.; Pfeifer, T. und Kunzmann, H. „Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering“. *CIRP Ann.* 51.2 (2002), S. 685–699.
- [37] Thalmann, R.; Meli, F. und Küng, A. „State of the Art of Tactile Micro Coordinate Metrology“. *Appl. Sci.* 6.5 (2016), S. 150.
- [38] Clausewitz, C. von. *Vom Kriege*. Anaconda Verlag, 2010.

- [39] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) - Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*. 3. Aufl. Beuth Verlag, 2010.
- [40] Weckenmann, A. und Gawande, B. „Einführung“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 1, S. 1–23.
- [41] Leach, R.; Ferrucci, M. und Haitjema, H. „Dimensional Metrology“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 2020, S. 1–11.
- [42] Krystek, M. *Berechnung der Messunsicherheit - Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung*. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e. V. 3. Aufl. Beuth Verlag, 2020.
- [43] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008.
- [44] Haitjema, H. „Measurement Uncertainty“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Hrsg. von Laperrière, L. und Reinhart, G. Springer, 2014, S. 852–857.
- [45] *DIN EN ISO 80000-1:2013. Größen und Einheiten - Teil 1: Allgemeines (ISO 80000-1:2009 + Cor 1:2011)*.
- [46] Giacomo, P. „News from the BIPM“. *Metrologia* 20.1 (1984), S. 25–30.
- [47] Bureau International des Poids et Mesures. *The International System of Units (SI)*. 9. Aufl. 2019.
- [48] Yacoot, A.; Bosse, H. und Dixson, R. „The lattice parameter of silicon: a secondary realisation of the metre“. *Meas. Sci. Technol.* 31.12 (2020), S. 121001.
- [49] Bureau International des Poids et Mesures. *SI Brochure - Appendix 2 - Mise en pratique for the definition of the metre in the SI*. 9. Aufl. 2019.
- [50] *DAkS 71 SD 0 006. Rückführung von Mess- und Prüfmitteln auf nationale Normale*. 2010.
- [51] Härtig, F. und Wendt, K. „Messunsicherheit und Rückverfolgbarkeit von Messwerten“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, Albert. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 9, S. 359–385.
- [52] Estler, W. T. „Traceability“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Hrsg. von Laperrière, L. und Reinhart, G. Springer, 2014, S. 1251–1254.

- [53] Imkamp, D.; Berthold, J.; Heizmann, M.; Kniel, K.; Manske, E.; Peterrek, M.; Schmitt, R.; Seidler, J. und Sommer, K.-D. „Challenges and trends in manufacturing measurement technology - the “Industrie 4.0” concept“. *J. Sens. Sens. Syst.* 5.2 (2016), S. 325–335.
- [54] Keferstein, C. P.; Marxer, M. und Bach, C. *Fertigungsmesstechnik - Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik*. 9. Aufl. Springer Vieweg, 2018.
- [55] Carmignato, S.; De Chiffre, L.; Bosse, H.; Leach, R. K.; Balsamo, A. und Estler, W. T. „Dimensional artefacts to achieve metrological traceability in advanced manufacturing“. *CIRP Ann.* 69.2 (2020), S. 693–716.
- [56] *DIN EN ISO/IEC 17025:2017. Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017)*.
- [57] Köchert, P. „Das neue Positionierungssystem am Nanometerkomparator der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt“. Diss. Technische Universität Ilmenau, 2017.
- [58] *DIN 1319-2:2005. Grundlagen der Messtechnik - Teil 2: Begriffe für Messmittel*.
- [59] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement“ - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. 2008.
- [60] Cox, M. G. und Siebert, B. R. L. „The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty“. *Metrologia* 43.4 (2006), S178–S188.
- [61] Eisenhart, C. „Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems“. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 67C.2 (1963), S. 161–187.
- [62] Dieck, R. H. „The Purpose for Measurements and Understanding Their Uncertainties (The Basic, ISO and ASME Uncertainty Models Compared)“. *IET & ISA 60th Int. Instrumentation Symposium*. 2014.
- [63] Willink, R. „What can we learn from the GUM of 1995?“ *Measurement* 91 (2016), S. 692–698.
- [64] Willink, R. *Measurement Uncertainty and Probability*. 1. Aufl. Cambridge University Press, 2013.
- [65] Weise, K. und Wöger, W. „A Bayesian theory of measurement uncertainty“. *Meas. Sci. Technol.* 4.1 (1993), S. 1–11.

- [66] Gleser, L. J. „Assessing Uncertainty in Measurement“. *Stat. Sci.* 13,3 (1998), S. 277–290.
- [67] Kunzmann, H.; Pfeifer, T.; Schmitt, R.; Schwenke, H. und Weckenmann, A. „Productive Metrology - Adding Value to Manufacture“. *CIRP Ann.* 54.2 (2005), S. 155–168.
- [68] Cox, M. G. und Harris, P. M. *Software Support for Metrology Best Practice Guide No. 6 - Uncertainty Evaluation*. Techn. Ber. National Physical Laboratory, 2010.
- [69] Leach, R. „Some Basics of Measurement“. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Leach, R. 2. Aufl. Elsevier, 2014. Kap. 2, S. 7–39.
- [70] *DIN EN ISO 14253-2:2011. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011)*.
- [71] Haitjema, H. „Measurement uncertainty“. *Basics of Precision Engineering*. Hrsg. von Leach, R. und Smith, S. T. CRC Press, 2018. Kap. 9, S. 413–448.
- [72] Wöger, W. „Remarks on the E_n -Criterion Used in Measurement Comparisons“. *PTB-Mitteilungen* 109.1 (1999), S. 24–27.
- [73] Friederici, S.; Rudtsch, S. und Büniger, L. „Quantitativer Ergebnis-Indikator zur Bewertung von Vergleichsmessungen; Vergleichsmessungen aus Sicht des Verbraucherschutzes auswerten“. 10. *VDI-Fachtagung „Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen - Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2021“*, *VDI-Berichte* 2390. 2021, S. 197–207.
- [74] Carmignato, S.; Voltan, A. und Savio, E. „Metrological performance of optical coordinate measuring machines under industrial conditions“. *CIRP Ann.* 59.1 (2010), S. 497–500.
- [75] Tosello, G.; Haitjema, H.; Leach, R. K.; Quagliotti, D.; Gasparin, S. und Hansen, H. N. „An international comparison of surface texture parameters quantification on polymer artefacts using optical instruments“. *CIRP Ann.* 65.1 (2016), S. 529–532.
- [76] Kunzmann, H.; Trapet, E. und Wäldele, F. „Results of the International Comparison of Ball Plate Measurements in CIRP and WECC“. *CIRP Ann.* 44.1 (1995), S. 479–482.

- [77] Trenk, M.; Franke, M. und Schwenke, H. „The “Virtual CMM” a software tool for uncertainty evaluation - practical application in an accredited calibration lab“. *Proc. ASPE*. Bd. 9. 2004, S. 68–75.
- [78] Leach, R. K.; Boyd, R.; Burke, T.; Danzebrink, H.-U.; Dirscherl, K.; Dziomba, T.; Gee, M.; Koenders, L.; Morazzani, V.; Pidduck, A.; Roy, D.; Unger, W. E. S. und Yacoot, A. „The European nanometrology landscape“. *Nanotechnology* 22.6 (2011), S. 062001.
- [79] Gao, W.; Haitjema, H.; Fang, F. Z.; Leach, R. K.; Cheung, C. F.; Savio, E. und Linares, J. M. „On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing“. *CIRP Ann.* 68.2 (2019), S. 843–866.
- [80] *DIN EN ISO 8015:2011. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln (ISO 8015:2011).*
- [81] *DIN EN ISO 17450-1:2011. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO 17450-1:2011).*
- [82] *VDI/VDE 2631-1.1. Formmesstechnik; Grundlagen.* Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [83] Dietzsch, M.; Gröger, S. und Gerlach, M. „Messaufgaben“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 2, S. 25–51.
- [84] *DIN EN ISO 14405-1:2016. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Lineare Größenmaße (ISO 14405-1:2016).*
- [85] Leo Kumar, S. P.; Jerald, J.; Kumanan, S. und Prabakaran, R. „A Review on Current Research Aspects in Tool-Based Micromachining Processes“. *Mater. Manuf. Process.* 29 (2014), S. 1291–1337.
- [86] Weckenmann, A. und Hartmann, W. „Function-oriented method for the definition and verification of microstructured surfaces“. *Precis. Eng.* 37.3 (2013), S. 684–693.
- [87] Savio, E.; De Chiffre, L. und Schmitt, R. „Metrology of freeform shaped parts“. *CIRP Ann.* 56.2 (2007), S. 810–835.
- [88] Knapp, W. „Grundprinzip und Gerätetechnik“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 4.3, S. 133–146.
- [89] Tanton, J. *Encyclopedia of Mathematics*. New York: Facts on File, 2005.

- [90] DIN 863-1:2017. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Messschrauben - Teil 1: Bügelmessschrauben; Grenzwerte für Messabweichungen.*
- [91] DIN 878:2018. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Mechanische Messuhren - Grenzwerte für Messabweichungen.*
- [92] DIN 2273:1979. *Sinuslineale.*
- [93] Hocken, R. J. und Bosch, J. A. „Evolution of Measurement“. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. Hrsg. von Hocken, R. J. und Pereira, P. H. 2. Aufl. CRC Press, 2012. Kap. 1, S. 1–30.
- [94] Whitehouse, D. J. „Comparison Between Stylus and Optical Methods for Measuring Surfaces“. *CIRP Ann.* 37.2 (1988), S. 649–653.
- [95] DIN EN ISO 25178-601:2011. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (ISO 25178-601:2010).*
- [96] DIN EN ISO 21920-2:2022. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO 21920-2:2021, korrigierte Fassung 2022-06).*
- [97] DIN EN ISO 25178-600:2019. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 600: Messtechnische Merkmale für flächentopographische Messverfahren (ISO 25178-600:2019).*
- [98] Leach, R. „Surface Topography Measurement Instrumentation“. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Leach, R. 2. Aufl. Elsevier, 2014. Kap. 6, S. 133–204.
- [99] Cuenat, A. und Leach, R. „Scanning Probe and Particle Beam Microscopy“. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Leach, R. 2. Aufl. Elsevier, 2014. Kap. 7, S. 205–239.
- [100] Leach, R. „Surface Topography Characterisation“. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Leach, R. 2. Aufl. Elsevier, 2014. Kap. 8, S. 241–294.
- [101] Leach, R. und Hart, A. *Investigation into the shape of diamond styli used for surface texture measurement as part of project LE9953, milestone 5.3.1.9*. Techn. Ber. National Physical Laboratory, 2001.
- [102] Villarrubia, J. S. „Algorithms for scanned probe microscope image simulation, surface reconstruction, and tip estimation“. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 102.4 (1997), S. 425–454.

- [103] Renegar, T. B.; Soons, J.; Muralikrishnan, B.; Villarrubia, J. S.; Zheng, A.; Vorburger, T. V. und Song, J. „Stylus Tip-Size Effect on the Calibration of Periodic Roughness Specimens with Rectangular Profiles“. *Proc. ICSM3*. 2012, S. 291–295.
- [104] Lonardo, P. M.; Lucca, D. A. und De Chiffre, L. „Emerging Trends in Surface Metrology“. *CIRP Ann.* 51.2 (2002), S. 701–723.
- [105] Abbe, E. „Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung“. *Archiv f. mikrosk. Anatomie* 9 (1873), S. 413–468.
- [106] Lord Rayleigh, F. R. S. „Investigations in Optics, with special reference to the Spectroscope“. *London Edinburgh Philos. Mag. J. Sci.* 8.49 (1879), S. 261–274.
- [107] Leach, R. „Some Common Terms and Definitions“. *Optical Measurement of Surface Topography*. Hrsg. von Leach, R. 1. Aufl. Springer-Verlag, 2011. Kap. 2, S. 15–22.
- [108] Leach, R. und Haitjema, H. „Bandwidth characteristics and comparisons of surface texture measuring instruments“. *Meas. Sci. Technol.* 21 (2010), S. 032001.
- [109] Stedman, M. „Mapping the performance of surface-measuring instruments“. *Proc. SPIE*. Bd. 0803. 1987, S. 138–142.
- [110] Weckenmann, A.; Estler, T.; Peggs, G. und McMurtry, D. „Probing Systems in Dimensional Metrology“. *CIRP Ann.* 53.2 (2004), S. 657–684.
- [111] *DIN EN ISO 10360-1:2000+AC:2002. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe (enthält Berichtigung AC:2002) (ISO 10360-1:2000+Cor.1:2002).*
- [112] Hoffmann, J. „Taktile Antastung“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 4.1, S. 93–119.
- [113] Neukirch, C. „Koordinatenmessgeräte mit Gelenkarmen“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 5.2, S. 167–175.
- [114] *VDI/VDE 2634-3. Optische 3-D-Messsysteme; Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. Berlin: Beuth Verlag. 2008.

- [115] Christoph, R. „Visuelle Sensoren“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 4.2, S. 119–132.
- [116] Seewig, J. und Krüger-Sehm, R. „Berührungslose Abstandssensoren“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 3, S. 133–146.
- [117] Tutsch, R. „Optische Messsysteme“. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hrsg. von Weckenmann, A. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2012. Kap. 5.5, S. 216–228.
- [118] Wang, Z.; Guo, W.; Li, L.; Luk'yanchuk, B.; Khan, A.; Liu, Z.; Chen, Z. und Hong, M. „Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope“. *Nat. Commun.* 2.218 (2011).
- [119] Knoll, M. und Ruska, E. „Das Elektronenmikroskop“. *Z. Physik* 78 (1932), S. 318–339.
- [120] Ardenne, M. von. „Das Elektronen-Rastermikroskop - Theoretische Grundlagen“. *Z. Physik* 109 (1938), S. 553–572.
- [121] Dai, G.; Koenders, L.; Fluegge, J. und Bosse, H. „Two approaches for realizing traceability in nanoscale dimensional metrology“. *Opt. Eng.* 55.9 (2016), S. 091407.
- [122] Misumi, I.; Kizu, R.; Itoh, H.; Kumagai, K.; Kobayashi, K. und Sighenzi, T. „Research Activities of Nanodimensional Standards Using Atomic Force Microscopes, Transmission Electron Microscope, and Scanning Electron Microscope at the National Metrology Institute of Japan“. *Nanomanuf. Metro.* 5.2 (2022), S. 83–90.
- [123] Benthem, K. van; Lupini, A. R.; Kim, M.; Baik, H. S.; Doh, S.; Lee, J.-H.; Oxley, M. P.; Findlay, S. D.; Allen, L. J.; Luck, J. T. und Pennycook, S. J. „Three-dimensional imaging of individual hafnium atoms inside a semiconductor device“. *Appl. Phys. Lett.* 87.3 (2005), S. 034104.
- [124] Midgley, P. A. und Weyland, M. „3D electron microscopy in the physical sciences: the development of Z-contrast and EFTEM tomography“. *Ultramicroscopy* 96.3-4 (2003), S. 413–431.
- [125] Vernon-Parry, K. D. „Scanning Electron Microscopy: an introduction“. *III-Vs Review* 13.4 (2000), S. 40–44.

- [126] Zhou, W.; Apkarian, R. P.; Wang, Z. L. und Joy, D. „Fundamentals of Scanning Electron Microscopy“. *Scanning Microscopy for Nanotechnology - Techniques and Applications*. Hrsg. von Zhou, W. und Wang, Z. L. 1. Aufl. Springer Science+Business Media, 2012. Kap. 1, S. 1–40.
- [127] Pennycook, S. J.; Lupini, A. R.; Varela, M.; Borisevich, A. Y.; Peng, Y.; Oxley, M. P.; Benthem, K. van und Chisholm, M. F. „Scanning Transmission Electron Microscopy for Nanostructure Characterization“. *Scanning Microscopy for Nanotechnology - Techniques and Applications*. Hrsg. von Zhou, W. und Wang, Z. L. 1. Aufl. Springer Science+Business Media, 2012. Kap. 6, S. 152–191.
- [128] Klein, T.; Buhr, E. und Frase, C. G. „TSEM: A Review of Scanning Electron Microscopy in Transmission Mode and Its Applications“. *Advances in Imaging and Electron Physics* 171 (2012), S. 297–356.
- [129] Butzhammer, L. und Hausotte, T. „Complex 3D scan trajectories for industrial cone-beam computed tomography using a hexapod“. *Meas. Sci. Technol.* 32.10 (2021), S. 105402.
- [130] Townsend, A.; Pagani, L.; Scott, P. und Blunt, L. „Areal surface texture data extraction from X-ray computed tomography reconstructions of metal additively manufactured parts“. *Precis. Eng.* 48 (2017), S. 254–264.
- [131] Kruth, J. P.; Bartscher, M.; Carmignato, S.; Schmitt, R.; De Chiffre, L. und Weckenmann, A. „Computed tomography for dimensional metrology“. *CIRP Ann.* 60.2 (2011), S. 821–842.
- [132] Kistner, T.; Hausotte, T. und Imkamp, D. „Simulation der morphologischen Filterung und der Abplattung der Rauheitsspitzen mechanisch bearbeiteter Werkstücke und deren Auswirkung auf die Bewertung der Formabweichung in der Koordinatenmesstechnik“. *tm - Tech. Mess.* 88.2 (2021), S. 78–89.
- [133] Hernla, M.; Wendt, K. und Franke, M. „Aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen“. *tm - Tech. Mess.* 77.11 (2010), S. 607–615.
- [134] Wäldele, F. und Schwenke, H. „Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis“. *tm - Tech. Mess.* 69.12 (2002), S. 550–557.
- [135] VDI/VDE 2617-7. *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation*. Berlin: Beuth Verlag, 2008.

- [136] Sladek, J. und Gaška, A. „Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method“. *Measurement* 45.6 (2012), S. 1564–1575.
- [137] Franke, M.; Kistner, T.; Hausotte, T.; Heißelmann, D.; Schwehn, C. und Wendt, K. „Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme“. *tm - Tech. Mess.* 84.5 (2017), S. 325–335.
- [138] Gaška, A.; Harmatys, W.; Gaška, P.; Gruza, M.; Gromczak, K. und Ostrowska, K. „Virtual CMM-based model for uncertainty estimation of coordinate measurements performed in industrial conditions“. *Measurement* 98 (2017), S. 361–371.
- [139] Heißelmann, D.; Franke, M.; Rost, K.; Wendt, K.; Kistner, T. und Schwehn, C. „Determination of measurement uncertainty by Monte Carlo simulation“. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI*. Hrsg. von Forbes, A. B.; Zhang, N.-F.; Chunovkina, A.; Eichstädt, S. und Pavese, F. Bd. 89. Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. World Scientific, 2018, S. 192–202.
- [140] *DIN EN ISO 15530-3:2011. Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen (ISO 15530-3:2011)*.
- [141] *VDI/VDE 2630-2.1. Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik; Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren*. Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [142] Carmignato, S. „Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison“. *CIRP Ann.* 61.1 (2012), S. 491–494.
- [143] Angel, J. und De Chiffre, L. „Comparison on Computed Tomography using industrial items“. *CIRP Ann.* 63.1 (2014), S. 473–476.
- [144] Stolfi, A. und De Chiffre, L. „Interlaboratory comparison of a physical and a virtual assembly measured by CT“. *Precis. Eng.* 51 (2018), S. 263–270.
- [145] Zanini, F. und Carmignato, S. „X-Ray Computed Tomography for Dimensional Metrology“. *Metrology*. Hrsg. von Gao, W. 1. Aufl. Springer Nature, 2019. Kap. 17, S. 537–583.
- [146] Binder, F. und Hausotte, T. „Über die Abgrenzung von Auflösungskonzepten in der industriellen Computertomografie“. *tm - Tech. Mess.* 89.S1 (2022), S. 20–24.

- [147] Carmignato, S.; Dreossi, D.; Mancini, L.; Marinello, F.; Tromba, G. und Savio, E. „Testing of x-ray microtomography systems using a traceable geometrical standard“. *Meas. Sci. Technol.* 20.8 (2009), S. 084021.
- [148] Neuschaefer-Rube, U.; Bartscher, M.; Neukamm, M.; Neugebauer, M.; Härtig, F.; Goebbels, J.; Ehrig, K. und Staude, A. „Measurement of micro gears - Comparison of optical, tactile-optical and CT-measurements“. *Proc. SPIE*. Bd. 7864. 7864oH. 2011.
- [149] Ontiveros, S.; Yagüe-Fabra, J. A.; Jiménez, R.; Tosello, G.; Gasparin, S.; Pierobon, A.; Carmignato, S. und Hansen, H. N. „Dimensional measurement of micro-moulded parts by computed tomography“. *Meas. Sci. Technol.* 23.12 (2012), S. 125401.
- [150] Helmecke, E.; Fleßner, M.; Kaufmann, M.; Staude, A. und Hausotte, T. „Numerical measurement uncertainty determination for dimensional measurements of microparts with CT“. *6th Conf. on iCT*. 2016.
- [151] Kampschulte, M.; Langheinrich, A. C.; Sender, J.; Litzlbauer, H. D.; Althöhn, U.; Schwab, J. D.; Alexandre-Lafont, E.; Martels, G. und Krombach, G. A. „Nano-Computed Tomography: Technique and Applications“. *Fortschr. Röntgenstr.* 188.2 (2016), S. 146–154.
- [152] Heenan, T. M. M.; Llewellyn, A. V.; Leach, A. S.; Kok, M. D. R.; Tan, C.; Jervis, R.; Brett, D. J. L. und Shearing, P. R. „Resolving Li-Ion Battery Electrode Particles Using Rapid Lab-Based X-Ray Nano-Computed Tomography for High-Throughput Quantification“. *Adv. Sci.* 7.12 (2020), S. 2000362.
- [153] Ferrucci, M.; Leach, R. K.; Giusca, C.; Carmignato, S. und Dewulf, W. „Towards geometrical calibration of x-ray computed tomography systems—a review“. *Meas. Sci. Technol.* 26.9 (2015), S. 092003.
- [154] Hiller, J. und Reindl, L. M. „A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography“. *Measurement* 45.8 (2012), S. 2166–2182.
- [155] Wohlgemuth, F.; Müller, A. M. und Hausotte, T. „Development of a virtual metrological CT for numerical measurement uncertainty determination using aRTist 2“. *tm - Tech. Mess.* 85.12 (2018), S. 728–737.
- [156] Binnig, G.; Quate, C. F. und Gerber, C. „Atomic Force Microscope“. *Phys. Rev. Lett.* 56.9 (1986), S. 930–933.
- [157] Martin, Y. und Wickramasinghe, H. K. „Method for imaging sidewalls by atomic force microscopy“. *Appl. Phys.* 64.19 (1994), S. 2498–2500.
- [158] Bryan, J. B. „The Abbé Principle Revisited: An Updated Interpretation“. *Precis. Eng.* 1.3 (1979), S. 129–132.

- [159] Hausotte, T. „Interferometric measuring systems of nanopositioning and nanomeasuring machines“. *Proc. SPIE*. Bd. 10678. 106780Q. 2018.
- [160] Holmes, M.; Hocken, R. und Trumper, D. „The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy“. *Precis. Eng.* 24.3 (2000), S. 191–209.
- [161] Kramer, J. A. „Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine“. *Meas. Sci. Technol.* 16.11 (2005), S. 2121–2128.
- [162] Hesse, S.; Schäffel, C.; Mohr, H.-U.; Katzschmann, M. und Büchner, H.-J. „Design and performance evaluation of an interferometric controlled planar nanopositioning system“. *Meas. Sci. Technol.* 23.7 (2012), S. 074011.
- [163] Henselmans, R.; Cacace, L.; Kramer, G.; Rosielle, N. und Steinbuch, M. „Nanometer level freeform surface measurements with the NANOMEFOS non-contact measurement machine“. *Proc. SPIE*. Bd. 7426. 742606. 2009.
- [164] Petter, J. und Berger, G. „Non-contact profiling for high precision fast asphere topology measurement“. *Proc. SPIE*. Bd. 8788. 878819. 2013.
- [165] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T. und Büchner, H.-J. „Nanomessmaschine zur abbefehlerfreien Koordinatenmessung“. *tm - Tech. Mess.* 67.7-8 (2000), S. 319–323.
- [166] Ruijl, T. „Ultra Precision Coordinate Measuring Machine - Design, Calibration and Error Compensation“. Diss. Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [167] Hausotte, T. „Nanopositionier- und Nanomessmaschine“. Diss. Technische Universität Ilmenau, 2002.
- [168] Hausotte, T.; Percle, B.; Gerhardt, U.; Dontsov, D.; Manske, E. und Jäger, G. „Interference signal demodulation for nanopositioning and nanomeasuring machines“. *Meas. Sci. Technol.* 23.7 (2012), S. 074004.
- [169] Hausotte, T.; Percle, B.; Manske, E.; Füßl, R. und Jäger, G. „Measuring value correction and uncertainty analysis for homodyne interferometers“. *Meas. Sci. Technol.* 22.9 (2011), S. 094028.
- [170] Schmidt, I. „Beiträge zur Verringerung der Positionierunsicherheit in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine“. Diss. Technische Universität Ilmenau, 2008.
- [171] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T. und Büchner, H.-J. „The Metrological Basis and Operation of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine NMM-1“. *tm - Tech. Mess.* 76.5 (2009), S. 227–234.

- [172] Hausotte, T.; Percle, B. und Jäger, G. „Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine“. *Meas. Sci. Technol.* 20.8 (2009), S. 084004.
- [173] VDI/VDE 2627-1. *Messräume; Klassifizierung und Kenngrößen; Planung und Ausführung*. Berlin: Beuth Verlag. 2015.
- [174] Gröschl, A. „Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [175] Gorges, S.; Hesse, S.; Schäffel, C.; Ortlepp, I.; Manske, E.; Langlotz, E. und Dontsov, D. „Integrated Planar 6-DOF Nanopositioning System“. *IFAC-PapersOnLine* 52.15 (2019), S. 313–318.
- [176] Huang, Q.; Wu, K.; Wang, C.; Li, R.; Fan, K.-C. und Fei, Y. „Development of an Abbe Error Free Micro Coordinate Measuring Machine“. *Appl. Sci.* 6.4 (2016), S. 97.
- [177] Küng, A.; Meli, F. und Nicolet, A. „A 5 degrees of freedom μ CMM“. *Proc. 14th euspen Int. Conf.* 2014, S. 269–272.
- [178] Fern, F. „Metrologie in fünfsichtigen Nanomess- und Nanopositioniermaschinen“. Diss. Technische Universität Ilmenau, 2020.
- [179] Schuler, C. A. „Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische Sensornachführung unter Anwendung nanometeraufgelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung“. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [180] Schuler, A.; Weckenmann, A. und Hausotte, T. „Setup and evaluation of a sensor tilting system for dimensional micro- and nanometrology“. *Meas. Sci. Technol.* 25.6 (2014), S. 064010.
- [181] Timmermann, M.; Weinert, B.; Schuler, A.; Loderer, A. und Hausotte, T. „Fiber-optical 3-D measurement of highly curved free-form surfaces“. *15th Int. Conf. on Met. & Props. of Eng. Surf.* 2015.
- [182] Schuler, A.; Hausotte, T. und Sun, Z. „Micro- and nanocoordinate measurements of micro-parts with 3-D tunnelling current probing“. *J. Sens. Sens. Syst.* 4.1 (2015), S. 199–208.
- [183] Brunner, J. F. „Analyse und Optimierung der Konstruktion zur Integration selbstsensierender AFM Sensoren in die NMM-1 für 3-D-Messungen“. Projektarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [184] Thurner, K.; Quacquarelli, F. P.; Braun, P.-F.; Dal Savio, C. und Karrai, K. „Fiber-based distance sensing interferometry“. *Appl. Opt.* 54.10 (2015), S. 3051–3063.

- [185] Hecht, E. *Optik*. 7. Aufl. Walter de Gruyter GmbH, 2018.
- [186] Binnig, G.; Rohrer, H.; Gerber, C. und Weibel, E. „Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy“. *Phys. Rev. Lett.* 49.1 (1982), S. 57–61.
- [187] Wickramasinghe, H. K. „Scanned-Probe Microscopes“. *Sci. Am.* 261.4 (1989), S. 98–105.
- [188] Young, R.; Ward, J. und Scire, F. „The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopography“. *Rev. Sci. Instrum.* 43.7 (1972), S. 999–1011.
- [189] Foster, A. S. und Hofer, W. A. *Scanning Probe Microscopy - Atomic Scale Engineering by Forces and Currents*. 1. Aufl. NanoScience and Technology. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [190] Danzebrink, H.-U.; Koenders, L.; Wilkening, G.; Yacoot, A. und Kunzmann, H. „Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology“. *CIRP Ann.* 55.2 (2006), S. 841–878.
- [191] Hoffmann, J.; Schuler, A. und Weckenmann, A. „Construction and evaluation of a traceable metrological scanning tunnelling microscope“. *Measurement* 42.9 (2009), S. 1324–1329.
- [192] Shinno, H.; Yoshioka, H.; Gokan, T. und Sawano, H. „A newly developed three-dimensional profile scanner with nanometer spatial resolution“. *CIRP Ann.* 59.1 (2010), S. 525–528.
- [193] Giessibl, F. J. „Advances in atomic force microscopy“. *Rev. Mod. Phys.* 75.3 (2003), S. 949–983.
- [194] Lambert, P. *Capillary Forces in Microassembly - Modeling, Simulation, Experiments, and Case Study*. Hrsg. von Fujita, H. und Liepmann, D. Springer Science+Business Media, 2007.
- [195] Meyer, E.; Bennewitz, R. und Hug, H. J. *Scanning Probe Microscopy - The Lab on a Tip*. 2. Aufl. Springer Nature, 2021.
- [196] Mie, G. „Zur kinetischen Theorie der einatomigen Körper“. *Ann. Phys.* 316.8 (1903), S. 657–697.
- [197] Israelachvili, J. *Intermolecular and Surface Forces*. 3. Aufl. Academic Press, 2011.
- [198] Vorbringer-Dorozhovets, N.; Manske, E. und Jäger, G. „Interferometrisches Rasterkraftmikroskop: Aufbau, messtechnische Eigenschaften und Applikationsmessungen“. *tm - Tech. Mess.* 85.S1 (2018), S. 52–58.
- [199] Wu, Y.; Wirthmann, E.; Klöpzig, U. und Hausotte, T. „A metrological atomic force microscope system“. *Nano Express* 2.1 (2021), S. 010035.

- [200] Tortonese, M.; Yamada, H.; Barrett, R. C. und Quate, C. F. „Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever“. *TRANSDUCERS '91: Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers*. 1991, S. 448–451.
- [201] Dukic, M.; Adams, J. D. und Fantner, G. E. „Piezoresistive AFM cantilevers surpassing standard optical beam deflection in low noise topography imaging“. *Sci. Reports* 5 (2015), S. 16393.
- [202] Meyer, G. und Amer, N. M. „Optical-beam-deflection atomic force microscopy: The NaCl (001) surface“. *Appl. Phys. Lett.* 56.21 (1990), S. 2100–2101.
- [203] Giessibl, F. J.; Gerber, C. und Binnig, G. „A low-temperature atomic force/scanning tunneling microscope for ultrahigh vacuum“. *J. Vac. Sci. Technol. B* 9.2 (1990), S. 984–988.
- [204] Ohnesorge, F. und Binnig, G. „True Atomic Resolution by Atomic Force Microscopy Through Repulsive and Attractive Forces“. *Science* 260.5113 (1993), S. 1451–1456.
- [205] Ivanov, T.; Gotszalk, T.; Grabiec, P.; Tomerov, E. und Rangelow, I. W. „Thermally driven micromechanical beam with piezoresistive deflection readout“. *Microelectron. Eng.* 67-68 (2003), S. 550–556.
- [206] Martin, Y.; Williams, C. C. und Wickramasinghe, H. K. „Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale“. *J. Appl. Phys.* 61.10 (1987), S. 4723–4729.
- [207] Garcia, R. und Perez, R. „Dynamic atomic force microscopy methods“. *Surf. Sci. Rep.* 47.6-8 (2002), S. 197–301.
- [208] Giessibl, F. J. „Atomic Resolution of the Silicon (111)-(7x7) Surface by Atomic Force Microscopy“. *Science* 267.5194 (1995), S. 68–71.
- [209] Spatz, J. P.; Sheiko, S.; Möller, M.; Winkler, R. G.; Reineker, P. und Marti, O. „Forces affecting the substrate in resonant tapping force microscopy“. *Nanotechnology* 6.2 (1995), S. 40–44.
- [210] Zhong, Q.; Inniss, D.; Kjoller, K. und Elings, V. B. „Fractured polymer / silica fiber surface studied by tapping mode atomic force microscopy“. *Surf. Sci.* 290.1-2 (1993), S. L688–L692.
- [211] Habibullah, H. „30 Years of atomic force microscopy: Creep, hysteresis, cross-coupling, and vibration problems of piezoelectric tube scanners“. *Measurement* 159 (2020), S. 107776.
- [212] 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.

- [213] Danzebrink, H.-U.; Pohlenz, F.; Dai, G. und Dal Savio, C. „Metrological Scanning Probe Microscope - Instruments for Dimensional Nanometrology“. *Nanoscale Calibration Standards and Methods: Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range*. Hrsg. von Wilkening, G. und Koenders, L. 1. Aufl. 1. WILEY-VCH, 2005, S. 3–21.
- [214] Dai, G.; Jung, L.; Koenders, L. und Krüger-Sehm, R. „Calibration of stylus profilometers using standards calibrated by metrological SFMs“. *J. Phys.: Conf. Ser.* 13 (2005), S. 236–239.
- [215] Odin, C.; Aime, J. P.; El Kaakour, Z. und Bouhacina, T. „Tip’s finite size effects on atomic force microscopy in the contact mode: simple geometrical considerations for rapid estimation of apex radius and tip angle based on the study of polystyrene latex balls“. *Surf. Sci.* 317.3 (1994), S. 321–340.
- [216] Czerkas, S.; Dziomba, T. und Bosse, H. „Comparison of Different Methods of SFM Tip Shape Determination for Various Characterisation Structures and Types of Tip“. *Nanoscale Calibration Standards and Methods: Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range*. Hrsg. von Wilkening, G. und Koenders, L. 1. Aufl. 23. WILEY-VCH, 2005, S. 311–320.
- [217] Machleidt, T.; Kästner, R. und Franke, K.-H. „Reconstruction and Geometric Assessment of AFM tips“. *Nanoscale Calibration Standards and Methods: Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range*. Hrsg. von Wilkening, G. und Koenders, L. 1. Aufl. 22. WILEY-VCH, 2005, S. 297–310.
- [218] Maragliano, C.; Gliá, A.; Stefancich, M. und Chiesa, M. „Effective AFM cantilever tip size: methods for in-situ determination“. *Meas. Sci. Technol.* 26.1 (2015), S. 015002.
- [219] Yacoot, A. und Koenders, L. „Aspects of scanning force microscope probes and their effects on dimensional measurement“. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41.10 (2008), S. 103001.
- [220] Yacoot, A. und Koenders, L. „Recent developments in dimensional nanometrology using AFMs“. *Meas. Sci. Technol.* 22.12 (2011), S. 122001.
- [221] Hussain, D.; Ahmad, K.; Song, J. und Xie, H. „Advances in the atomic force microscopy for critical dimension metrology“. *Meas. Sci. Technol.* 28.1 (2017), S. 012001.

- [222] Orji, N. G.; Badaroglu, M.; Barnes, B. M.; Beitia, C.; Bunday, B. D.; Celano, U.; Kline, R. J.; Neisser, M.; Obeng, Y. und Vladar, A. E. „Metrology for the next generation of semiconductor devices“. *Nat. Electron.* 1.10 (2018), S. 532–547.
- [223] Thiesler, J.; Tutsch, R.; Fromm, K. und Dai, G. „True 3D-AFM sensor for nanometrology“. *Meas. Sci. Technol.* 31.7 (2020), S. 074012.
- [224] Dahlen, G.; Osborn, M.; Liu, H.-C.; Jain, R.; Foreman, W. und Osborne, J. R. „Critical Dimension AFM tip characterization and image reconstruction applied to the 45 nm node“. *Proc. SPIE.* Bd. 6152. 61522R. 2006.
- [225] Orji, N. G.; Itoh, H.; Wang, C.; Dixon, R. G.; Walecki, P. S.; Schmidt, S. W. und Irmer, B. „Tip characterization method using multi-feature characterizer for CD-AFM“. *Ultramicroscopy* 162 (2016), S. 25–34.
- [226] Mancevski, V. und McClure, P. F. „Development of a dual-probe Caliper™ CD-AFM for near model-independent nanometrology“. *Proc. SPIE.* Bd. 4689. 2002, S. 83–91.
- [227] Dai, G.; Wolff, H.; Weimann, T.; Xu, M.; Pohlenz, F. und Danzebrink, H.-U. „Nanoscale surface measurements at sidewalls of nano- and micro-structures“. *Meas. Sci. Technol.* 18.2 (2007), S. 334–341.
- [228] Dai, G.; Wolff, H. und Danzebrink, H.-U. „Atomic force microscope cantilever based microcoordinate measuring probe for true three-dimensional measurements of microstructures“. *Appl. Phys. Lett.* 91.12 (2007), S. 121912.
- [229] Lebrasseur, E.; Pourciel, J.-B.; Bourouina, T.; Masuzawa, T. und Fujita, H. „A new characterization tool for vertical profile measurement of high-aspect-ratio microstructures“. *J. Micromech. Microeng.* 12.3 (2002), S. 280–285.
- [230] Uchiyama, K.; Murakami, H.; Katsuki, A. und Sajima, T. „Development of a Sharp-Tipped L-Shaped Stylus for Measurement of Nanoscale Sidewall Features“. *Int. J. Autom. Technol.* 16.4 (2022), S. 489–496.
- [231] Peiner, E. und Doering, L. „MEMS cantilever sensor for non-destructive metrology within high-aspect-ratio micro holes“. *Microsyst. Technol.* 16.7 (2010), S. 1259–1268.
- [232] Garnaes, J.; Hansen, P.-E.; Agersnap, N.; Davi, I.; Petersen, J. C.; Kühle, A.; Holm, J. und Christensen, L. H. „Determination of sub-micrometer high aspect ratio grating profiles“. *Proc. SPIE.* Bd. 5878. 587803. 2005.

- [233] Zhao, X. S.; Sun, T.; Yan, Y. D.; Li, Z. Q. und Dong, S. „Measurement of Roundness and Sphericity of the Micro Sphere Based on Atomic Force Microscope“. *Key Eng. Mater.* 315-316 (2006), S. 796–799.
- [234] Fouchier, M.; Pargon, E. und Bardet, B. „An atomic force microscopy-based method for line edge roughness measurement“. *Appl. Phys.* 113.10 (2013), S. 104903.
- [235] Oertel, E. und Manske, E. „Radius and roundness measurement of micro spheres based on a set of AFM surface scans“. *Meas. Sci. Technol.* 32.4 (2021), S. 044005.
- [236] Dal Savio, C.; Dejima, S.; Danzebrink, H.-U. und Gotszalk, T. „3D metrology with a compact scanning probe microscope based on self-sensing cantilever probes“. *Meas. Sci. Technol.* 18.2 (2007), S. 328–333.
- [237] Jayanth, G. R.; Jhiang, S. M. und Menq, C.-H. „Two-axis probing system for atomic force microscopy“. *Rev. Sci. Instrum.* 79.2 (2008), S. 023705.
- [238] Hua, Y.; Coggins, C. und Park, S. „Advanced 3D Metrology Atomic Force Microscope“. *IEEE/SEMI ASMC.* 2010, S. 7–10.
- [239] Cho, S.-J.; Ahn, B.-W.; Kim, J.; Lee, J.-M.; Hua, Y.; Yoo, Y. K. und Park, S.-i. „Three-dimensional imaging of undercut and sidewall structures by atomic force microscopy“. *Rev. Sci. Instrum.* 82.2 (2011), S. 023707.
- [240] Kizu, R.; Misumi, I.; Hirai, A.; Kinoshita, K. und Gonda, S. „Development of a metrological atomic force microscope with a tip-tilting mechanism for 3D nanometrology“. *Meas. Sci. Technol.* 29.7 (2018), S. 075005.
- [241] VDI/VDE 2617-12.1. *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte zum taktilen Messen von Mikrogeometrien.* Berlin: Beuth Verlag. 2011.
- [242] Meli, F. und Küng, A. „AFM investigation on surface damage caused by mechanical probing with small ruby spheres“. *Meas. Sci. Technol.* 18.2 (2007), S. 496–502.
- [243] Claverley, J. D. „Development and validation of a 3D vibrating contact probe for micro-CMMs“. Diss. University of Nottingham, 2014.
- [244] Bos, E. J. C. „Aspects of tactile probing on the micro scale“. *Precis. Eng.* 35.2 (2011), S. 228–240.

- [245] Haitjema, H.; Pril, W. O. und Schellekens, P. H. J. „Development of a Silicon-based Nanoprobe System for 3-D Measurements“. *CIRP Ann.* 50.1 (2001), S. 365–368.
- [246] Büttefisch, S.; Büttgenbach, S.; Kleine-Besten, T. und Brand, U. „Micro-mechanical three-axial tactile force sensor for micromaterial characterisation“. *Microsyst. Technol.* 7.4 (2001), S. 171–174.
- [247] Ruther, P.; Bartholomeyczik, J.; Trautmann, A.; Wandt, M.; Paul, O.; Dominicus, W.; Roth, R.; Seitz, K. und Strauss, W. „Novel 3D Piezoresistive Silicon Force Sensor for Dimensional Metrology of Micro Components“. *SENSORS. IEEE.* 2005, S. 1006–1009.
- [248] Bos, E. J. C. „Tactile 3D probing system for measuring MEMS with nanometer uncertainty : aspects of probing, design, manufacturing and assembly“. Diss. Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [249] Lewis, A. J. „A fully traceable miniature CMM with sub-micrometre uncertainty“. *Proc. SPIE.* Bd. 5190. 2003, S. 265–276.
- [250] Chu, C.-L. und Chiu, C.-Y. „Development of a low-cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads“. *Meas. Sci. Technol.* 18.7 (2007), S. 1831–1842.
- [251] Wang, W.-L.; Fan, K.-C.; Chen, Y.-J. und Fei, Y.-T. „Development of a touch trigger probe for micro/nano CMM“. *Proc. SPIE.* Bd. 7130. 71300K. 2008.
- [252] Liebrich, T. und Knapp, W. „New concept of a 3D-probing system for micro-components“. *CIRP Ann.* 59.1 (2010), S. 513–516.
- [253] Balzer, F. G.; Hausotte, T.; Dorozhovets, N.; Manske, E. und Jäger, G. „Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli“. *Meas. Sci. Technol.* 22.9 (2011), S. 094018.
- [254] 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 Ann.* 50.1 (2001), S. 361–364.
- [255] Muralikrishnan, B.; Stone, J. A. und Stoup, J. R. „Fiber Deflection Probe for Small Hole Metrology“. *Precis. Eng.* 30.2 (2006), S. 154–164.
- [256] Murakami, H.; Katsuki, A.; Onikura, H.; Sajima, T.; Kawagoishi, N. und Kondo, E. „Development of a System for Measuring Micro Hole Accuracy Using an Optical Fiber Probe“. *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 4.5 (2010), S. 995–1004.
- [257] Cui, J.; Li, L. und Tan, J. „Opto-tactile probe based on spherical coupling for inner dimension measurement“. *Meas. Sci. Technol.* 23.8 (2012), S. 085105.

- [258] Weckenmann, A. und Schuler, A. „Application of modern high resolution tactile sensors for micro-objects“. *Int. J. Precision Technology* 2.2/3 (2011), S. 266–288.
- [259] Flack, D.; Claverley, J. und Leach, R. „Coordinate Metrology“. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Leach, R. 2. Aufl. Elsevier, 2014. Kap. 9, S. 295–325.
- [260] Claverley, J. D. und Leach, R. K. „A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs“. *Precis. Eng.* 39 (2015), S. 1–15.
- [261] Michihata, M. „Surface-Sensing Principle of Microprobe System for Micro-Scale Coordinate Metrology: A Review“. *Metrology* 2.1 (2022), S. 46–72.
- [262] Bhushan, B. „Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction“. *JVST B - Microelectronics and Nanometer Structures* 21.6 (2003), S. 2262–2296.
- [263] Hidaka, K. und Schellekens, P. H. J. „Study of a Small-sized Ultrasonic Probe“. *CIRP Ann.* 55.1 (2006).
- [264] Muralikrishnan, B.; Stone, J. A. und Stoup, J. R. „Enhanced Capabilities of the NIST Fiber Probe for Microfeature Metrology“. *Proc. 21st ASPE*. 2006, S. 1–4.
- [265] Murakami, H.; Katsuki, A.; Sajima, T. und Suematsu, T. „Study of a vibrating fiber probing system for 3-D micro-structures: performance improvement“. *Meas. Sci. Technol.* 25.9 (2014), S. 094010.
- [266] Goj, B. „Entwicklung eines dreiachsigen taktilen Mikromesssystems in Silicium-Technologie“. Diss. Technische Universität Ilmenau, 2014.
- [267] Chao, Z. X.; Tan, S. L. und Xu, G. „Evaluation on the probing error of a micro-coordinate measuring machine“. *Proc. SPIE*. Bd. 7155. 71550K. 2008.
- [268] Fleischer, J.; Behrens, I.; Komori, M.; Okamoto, K.; Kubo, A.; Härtig, F. und Dai, G. „A Geometrical Standard for Micro Gears“. *10th CIRP Conf. on Computer Aided Tolerancing*. 2007.
- [269] *DIN EN ISO 4288:1998. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1996)*.
- [270] Dai, G.; Jung, L.; Pohlenz, F.; Danzebrink, H.-U.; Krüger-Sehm, R.; Hasche, K. und Wilkening, G. „Measurement of micro-roughness using a metrological large range scanning force microscope“. *Meas. Sci. Technol.* 15.10 (2004), S. 2039–2046.

- [271] Wozniak, A.; Mayer, J. R. R. und Balazinski, M. „Stylus tip envelop method: corrected measured point determination in high definition coordinate metrology“. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 42 (2009), S. 505–514.
- [272] *DIN EN ISO 10360-5:2020. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) - Teil 5: Koordinatenmessgeräte (KMG) mit berührendem Messkopfsystem im Einzelpunkt- und/oder Scanningmodus (ISO 10360-5:2020).*
- [273] Weckenmann, A.; Jiang, X.; Sommer, K.-D.; Neuschaefer-Rube, U.; Seewig, J.; Shaw, L. und Estler, T. „Multisensor data fusion in dimensional metrology“. *CIRP Ann.* 58.2 (2009), S. 701–721.
- [274] Leach, R.; Weckenmann, A.; Coupland, J. und Hartmann, W. „Interpreting the probe-surface interaction of surface measuring instruments, or what is a surface?“ *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 2.3 (2014), S. 035001.
- [275] Boye, T. und Sellmann, F. „Accuracy behavior of five-axis machines: classification and influence of individual error components“. *Proc. 21st euspen Int. Conf.* 2021.
- [276] Claverley, J. D.; Georgi, A. und Leach, R. K. „Modelling the Interaction Forces between an Ideal Measurement Surface and the Stylus Tip of a Novel Vibrating Micro-scale CMM Probe“. *Precision Assembly Technologies and Systems. IPAS 2010*. Hrsg. von Ratchev, S. Bd. 315. Springer, 2010, S. 131–138.
- [277] Freund, J.; Halbritter, J. und Hörber, J. K. H. „How Dry Are Dried Samples? Water Adsorption Measured by STM“. *Microsc. Res. Tech.* 44 (1999), S. 327–338.
- [278] Spengen, W. M. van; De Wolf, I. und Puers, B. „An auto-adhesion model for MEMS surfaces taking into account the effect of surface roughness“. *Proc. SPIE*. Bd. 4175. 2000, S. 104–112.
- [279] Grutzeck, H. und Kiesewetter, L. „Downscaling of grippers for micro assembly“. *Microsyst. Technol.* 8 (2002), S. 27–31.
- [280] Brussel, H. van; Peirs, J.; Reynaerts, D.; Delchambre, A.; Reinhart, G.; Roth, N.; Weck, M. und Zussman, E. „Assembly of microsystems“. *CIRP Ann.* 49.2 (2000), S. 451–472.
- [281] Hamaker, H. C. „The London—van der Waals attraction between spherical particles“. *Physica* 4.10 (1937), S. 1058–1072.

- [282] Maradudin, A. A. und Mazur, P. „Effects of surface roughness on the van der Waals force between macroscopic bodies“. *Phys. Rev. B* 22.4 (1980), S. 1677–1684.
- [283] Arai, F.; Ando, D.; Fukuda, T.; Nonoda, Y. und Oota, T. „Micro Manipulation Based on Micro Physics - Strategy Based on Attractive Force Reduction and Stress Measurement“. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. Bd. 2. 1995, S. 236–241.
- [284] Fearing, R. S. „Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling“. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1995, S. 212–217.
- [285] Zhou, Y. und Nelson, B. J. „Force Controlled Microgripping“. *Proc. SPIE*. Bd. 3834. 1999, S. 211–221.
- [286] Vögeli, B. und Känel, H. von. „AFM-study of sticking effects for micro-parts handling“. *Wear* 238.1 (2000), S. 20–24.
- [287] Fuller, K. N. G. und Tabor, D. „The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids“. *Proc. R. Soc. Lond. A*. 345 (1975), S. 327–342.
- [288] Delrio, F. W.; De Boer, M. P.; Knapp, J. A.; Reedy Jr., E. D.; Clews, P. J. und Dunn, M. L. „The role of van der Waals forces in adhesion of micromachined surfaces“. *nature materials* 4 (2005), S. 629–634.
- [289] Li, Q.; Rudolph, V. und Peukert, W. „London-van der Waals adhesiveness of rough particles“. *Powder Technol.* 161.3 (2006), S. 248–255.
- [290] Murakami, H.; Katsuki, A.; Sajima, T. und Fukuda, M. „Reduction of Liquid Bridge Force for 3D Microstructure Measurements“. *Appl. Sci.* 6.5 (2016), S. 153.
- [291] Thalmann, R. „Basics of highest accuracy roundness measurement“. *Simposio de Metrologia*. 2006.
- [292] Fan, K.-C.; Wang, N.; Wang, Z.-W. und Zhang, H. „Development of a roundness measuring system for microspheres“. *Meas. Sci. Technol.* 25.6 (2014), S. 064009.
- [293] Chen, Y.-L.; Machida, Y.; Shimizu, Y.; Matsukuma, H. und Gao, W. „A stitching linear-scan method for roundness measurement of small cylinders“. *CIRP Ann.* 67.1 (2018), S. 535–538.
- [294] Bai, J.; Wang, Y.; Wang, X.; Zhou, Q.; Ni, K. und Li, X. „Three-Probe Error Separation with Chromatic Confocal Sensors for Roundness Measurement“. *Nanomanuf. Metro.* 4.4 (2021), S. 247–255.

- [295] Ito, S.; Tsutsumi, D.; Kamiya, K.; Matsumoto, K. und Kawasegi, N. „Measurement of form error of a probe tip ball for coordinate measuring machine (CMM) using a rotating reference sphere“. *Precis. Eng.* 61 (2020), S. 41–47.
- [296] Spaan, H. A. M.; Widdershoven, I. und Morel, M. A. A. „Novel calibration techniques and applications for touch probes with nanometre accuracy“. *Proc. 6th euspen Int. Conf.* 2006, S. 386–389.
- [297] Selberg, L. A. „Radius measurement by interferometry“. *Opt. Eng.* 31.9 (1992), S. 1961–1966.
- [298] Malacara, Z. „Angle, Prisms, Curvature, and Focal Length Measurements“. *Optical Shop Testing*. Hrsg. von Malacara, D. 3. Aufl. Wiley-Interscience, 2007. Kap. 17, S. 808–831.
- [299] Sun, R.; Qiu, L.; Yang, J. und Zhao, W. „Laser differential confocal radius measurement system“. *Appl. Opt.* 51.26 (2012), S. 6275–6281.
- [300] Psota, P.; Stašik, M.; Kredba, J.; Lédl, V. und Nečásek, J. „Measurement of radius of curvature directly in the interferometer confocal position“. *Appl. Opt.* 60.15 (2021), S. 4485–4490.
- [301] Schwider, J. und Falkenstörfer, O. „Twyman-Green interferometer for testing microspheres“. *Opt. Eng.* 34.10 (1995), S. 2972–2975.
- [302] Griesmann, U.; Soons, J.; Wang, Q. und DeBra, D. „Measuring Form and Radius of Spheres with Interferometry“. *CIRP Ann.* 53.1 (2004), S. 451–454.
- [303] Neugebauer, M. und Krystek, M. „The Influence of Form Deviations and Surface Topography of Micro-components on the Uncertainty of their Geometrical Parameters“. *Key Eng. Mater.* 381–382 (2008), S. 649–652.
- [304] Andreas, B.; Azuma, Y.; Bartl, G.; Becker, P.; Bettin, H.; Borys, M.; Busch, I.; Fuchs, P.; Fujii, K.; Fujimoto, H.; Kessler, E.; Krumrey, M.; Kuetgens, U.; Kuramoto, N.; Mana, G.; Massa, E.; Mizushima, S.; Nicolaus, A.; Picard, A.; Pramann, A.; Rienitz, O.; Schiel, D.; Valkiers, S.; Waseda, A. und Zakel, S. „Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition“. *Metrologia* 48.2 (2011), S1–S13.
- [305] Bartl, G. und Nicolaus, A. „Influence of the distribution of measuring points on the mean diameter determination of the Avogadro project’s silicon spheres“. *Meas. Sci. Technol.* 20.6 (2009), S. 065104.
- [306] Bartl, G.; Bettin, H.; Krystek, M.; Mai, T.; Nicolaus, A. und Peter, A. „Volume determination of the Avogadro spheres of highly enriched ^{28}Si with aspherical Fizeau interferometer“. *Metrologia* 48.2 (2011), S96–S103.

- [307] Chen, L.-C. „Automatic 3D surface reconstruction and sphericity measurement of micro spherical balls of miniaturized coordinate measuring probes“. *Meas. Sci. Technol.* 18.6 (2007), S. 1748–1755.
- [308] Ismail, M. A. B. „Development and Characterisation of Next Generation Stylus for Micro Coordinate Measuring Machine“. Diss. University of Warwick, 2017.
- [309] Mirau, A. H. *Interferometer*. US Patent 2,612,074. 1952.
- [310] Medicus, K. M. und Jansen, M. „Diameter Measurement of Small Spheres on a White Light Interferometer Including Uncertainty Analysis“. *Proc. euspen Int. Conf.* 2010, S. 75–78.
- [311] Kobayashi, Y.; Michihata, M.; Zhao, Z.; Chu, B.; Takamasu, K. und Takahashi, S. „Radial mode number identification on whispering gallery mode resonances for diameter measurement of microsphere“. *Meas. Sci. Technol.* 30.6 (2019), S. 065201.
- [312] Ramirez, C. und Strojnik, M. „Estimation of the degree of asphericity of a glass sphere using a vectorial shearing interferometer“. *Opt. Commun.* 284.6 (2011), S. 1517–1525.
- [313] Fang, C.; Huang, Q.; Xu, J.; Cheng, R.; Chen, L.; Li, R.; Wang, C. und Zhang, L. „A Measurement Method of Microsphere with Dual Scanning Probes“. *Appl. Sci.* 9.8 (2019), S. 1598.
- [314] Fang, C.; Huang, Q.; Ding, X.; Cheng, R.; Zhang, L.; Wang, C.; Mei, J. und Li, H. „Measurement and uncertainty evaluation of the microsphere used for micro-CMM probe“. *Meas. Sci. Technol.* 31.2 (2020), S. 025004.
- [315] Oertel, E. und Manske, E. „Unsicherheitsbetrachtungen zur Charakterisierung von Mikrokugeln auf Basis von AFM-Oberflächenscans“. 10. *VDI-Fachtagung „Messunsicherheit praxisingerecht bestimmen - Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2021“*, *VDI-Berichte* 2390. 2021, S. 121–132.
- [316] Oertel, E. und Manske, E. „Influence of form deviations on the radius and roundness measurement of micro spheres“. *tm - Tech. Mess.* 89.10 (2022), S. 704–713.
- [317] *DIN EN ISO 25178-604:2013. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 604: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Weißlicht-Interferometrie) (ISO 25178-604:2013)*.

- [318] *DIN EN ISO 25178-606:2015. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 606: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Fokusvariation) (ISO 25178-606:2015).*
- [319] *DIN EN ISO 25178-607:2019. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 607: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (konfokale Mikroskopie) (ISO 25178-607:2019).*
- [320] Schröder, G. und Treiber, H. *Technische Optik*. 11. Aufl. Vogel Buchverlag, 2014.
- [321] Cajori, F. *A HISTORY OF PHYSICS*. Hrsg. von Janarthanan, C. Maven Books, 2018.
- [322] Maxwell, J. C. „VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field“. *Philos. Trans. R. Soc.* 155 (1865), S. 459–512.
- [323] Fizeau, H. „Versuch, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts zu bestimmen“. *Ann. Phys.* 19 (1850), S. 167–169.
- [324] Wawilow, S. I. *Die Mikrostruktur des Lichts - Untersuchungen und Grundgedanken*. Akademie-Verlag, 1954.
- [325] Einstein, A. „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“. *Ann. Phys.* 4 (1905), S. 132–148.
- [326] Kidd, R.; Ardini, J. und Anton, A. „Evolution of the modern photon“. *Am. J. Phys.* 57.1 (1989), S. 27–35.
- [327] Pedrotti, F.; Pedrotti, L.; Bausch, W. und Schmidt, H. *Optik für Ingenieure; Grundlagen*. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [328] Meschede, D. *Optik, Licht und Laser*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [329] Hering, E.; Martin, R. und Stohrer, M. *Physik für Ingenieure*. 12. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [330] Born, M. und Wolf, E. *Principles of Optics: 60th Anniversary Edition*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [331] Steward, E. G. *FOURIER OPTICS: an introduction*. E. Horwood Halted Press, 1983.
- [332] Goodman, J. W. *Introduction to Fourier Optics*. 2. Aufl. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering. New York: The McGraw-Hill Companies, 1996.
- [333] Minsky, M. *Microscopy apparatus*. US Patent 3,013,467. 1961.

- [334] Minsky, M. „Memoir on Inventing the Confocal Scanning Microscope“. *Scanning* 10 (1988), S. 128–138.
- [335] Sheppard, C. J. R. und Choudhury, A. „Image Formation in the Scanning Microscope“. *Opt. Acta* 24.10 (1977), S. 1051–1073.
- [336] Brakenhoff, G. J.; Blom, P. und Barends, P. „Confocal scanning light microscopy with high aperture immersion lenses“. *J. Microsc.* 117.2 (1979), S. 219–232.
- [337] White, J. G.; Amos, W. B. und Fordham, M. „An evaluation of confocal versus conventional imaging of biological structures by fluorescence light microscopy“. *J. Cell Biol.* 105.1 (1987), S. 41–48.
- [338] Wilson, T. „Confocal Microscopy“. *Confocal Microscopy*. Hrsg. von Wilson, T. 1. Aufl. London: Academic Press, 1990. Kap. 1, S. 1–64.
- [339] Davidovits, P. und Egger, M. D. „Scanning Laser Microscope“. *Nature* 223.5208 (1969), S. 831.
- [340] Cremer, C. und Cremer, T. „Considerations on a laser-scanning-microscope with high resolution and depth of field“. *Microsc. Acta* 81.1 (1978), S. 31–44.
- [341] Lukosz, W. „Optical Systems with Resolving Powers Exceeding the Classical Limit“. *J. Opt. Soc. Am.* 56.11 (1966), S. 1463–1472.
- [342] Wilson, T. und Sheppard, C. *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy*. 1. Aufl. London: Academic Press, 1984.
- [343] Sarafis, V. „Biological Perspectives of Confocal Microscopy“. *Confocal Microscopy*. Hrsg. von Wilson, T. 1. Aufl. London: Academic Press, 1990. Kap. 12, S. 325–337.
- [344] Stelzer, E. H. K. und Wijnaendts-van-resandt, R. W. „Optical Cell Splicing with the Confocal Fluorescence Microscope: Microtomoscopy“. *Confocal Microscopy*. Hrsg. von Wilson, T. 1. Aufl. London: Academic Press, 1990. Kap. 7, S. 199–212.
- [345] Bayguinov, P. O.; Oakley, D. M.; Shih, C.-C.; Geanon, D. J.; Joens, M. S. und Fitzpatrick, J. A. J. „Modern Laser Scanning Confocal Microscopy“. *Curr. Protoc. Cytom.* 85.1 (2018), e39.
- [346] Hamilton, D. K. und Wilson, T. „Surface profile measurement using the confocal microscope“. *J. Appl. Phys.* 53.7 (1982), S. 5320–5322.
- [347] VDI/VDE 2655-1.2. *Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung*. Berlin: Beuth Verlag. 2010.
- [348] Wilson, T. und Carlini, A. R. „Size of the detector in confocal imaging systems“. *Opt. Lett.* 12.4 (1987), S. 227–229.

- [349] Sheppard, C. J. R. und Wilson, T. „The image of a single point in microscopes of large numerical aperture“. *Proc. R. Soc. Lond. A.* 379 (1982), S. 145–158.
- [350] Artigas, R. „Imaging Confocal Microscopy“. *Optical Measurement of Surface Topography*. Hrsg. von Leach, R. 1. Aufl. Springer-Verlag, 2011. Kap. 11, S. 237–286.
- [351] Tiziani, H. J.; Wegner, M. und Steudle, D. „Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis“. *Opt. Eng.* 39.1 (2000), S. 32–39.
- [352] Ishihara, M. und Sasaki, H. „High-speed surface measurement using a non-scanning multiple-beam confocal microscope“. *Opt. Eng.* 38.6 (1999), S. 1035–1040.
- [353] Tan, J.; Liu, C.; Liu, J. und Wang, H. „Sinc² fitting for height extraction in confocal scanning“. *Meas. Sci. Technol.* 27.2 (2016), S. 025006.
- [354] Ruprecht, A. K.; Wiesendanger, T. F. und Tiziani, H. J. „Signal evaluation for high-speed confocal measurements“. *Appl. Opt.* 41.35 (2002), S. 7410–7415.
- [355] Rahlves, M. „Calibration of Confocal Microscopes in 3D-Metrology“. Diss. Leibniz Universität Hannover, 2011.
- [356] Rahlves, M.; Roth, B. und Reithmeier, E. „Confocal signal evaluation algorithms for surface metrology: uncertainty and numerical efficiency“. *Appl. Opt.* 56.21 (2017), S. 5920–5926.
- [357] Chen, C.; Wang, J.; Zhang, C.; Lu, W.; Liu, X.; Lei, Z.; Yang, W. und Jiang, X. „Influence of optical aberrations on the peak extraction in confocal microscopy“. *Opt. Commun.* 449 (2019), S. 24–32.
- [358] 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.
- [359] Juškaitis, R.; Rea, N. P. und Wilson, T. „Semiconductor laser confocal microscopy“. *Appl. Opt.* 33.4 (1994), S. 578–584.
- [360] Yan, Y.; Li, L.; Feng, C.; Guo, W.; Lee, S. und Hong, M. „Microsphere-Coupled Scanning Laser Confocal Nanoscope for Sub-Diffraction-Limited Imaging at 25 nm Lateral Resolution in the Visible Spectrum“. *ACS Nano* 8.2 (2014), S. 1809–1816.
- [361] Yang, X. und Hong, M. „Enhancement of axial resolution and image contrast of a confocal microscope by a microsphere working in non-contact mode“. *Appl. Opt.* 60.17 (2021), S. 5271–5277.

- [362] Tiziani, H. J. und Uhde, H.-M. „Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy“. *Appl. Opt.* 33.10 (1994), S. 1838–1843.
- [363] *DIN EN ISO 25178-602:2010. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde) (ISO 25178-602:2010).*
- [364] Schick, A.; Schneider, R. und Stockmann, M. *Optischer Abstandssensor*. Europäische Patentschrift o 615 607 B1. 1994.
- [365] Doemens, G.; Köllensperger, P. und Schick, A. *Optischer Abstandssensor*. Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 195 24 022 A1. 1997.
- [366] Belkner, J.; Hofmann, M.; Kirchner, J. und Manske, E. „Demonstration of aberration-robust high-frequency modulated Differential Confocal Microscopy with an oscillating Pinhole“. *Proc. SPIE*. Bd. 11352. 113520N. 2020.
- [367] Lee, C.-H. und Wang, J. „Noninterferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution“. *Opt. Commun.* 135.4-6 (1997), S. 233–237.
- [368] *DIN EN ISO 25178-605:2014. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 605: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Punkt-Autofokus-Sensor) (ISO 25178-605:2014).*
- [369] Udupa, G.; Singaperumal, M.; Sirohi, R. S. und Kothiyal, M. P. „Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system“. *Meas. Sci. Technol.* 11.3 (2000), S. 305–314.
- [370] Tan, J. und Wang, F. „Theoretical analysis and property study of optical focus detection based on differential confocal microscopy“. *Meas. Sci. Technol.* 13.8 (2002), S. 1289–1293.
- [371] Liu, J.; Tan, J.; Bin, H. und Wang, Y. „Improved differential confocal microscopy with ultrahigh signal-to-noise ratio and reflectance disturbance resistibility“. *Appl. Opt.* 48.32 (2009), S. 6195–6201.
- [372] Balzer, F. G.; Gerhardt, U.; Hausotte, T.; Albrecht, K.; Manske, E. und Jäger, G. „Application of a novel fibre-coupled confocal sensor in a nanopositioning and nanomeasuring machine“. *Proc. 12th euspen Int. Conf.* 2012.
- [373] Boettner, M. C. und Ouderkirk, S. J. *Scanning confocal microscope with oscillating objective lens*. US Patent 5,880,465. 1999.

- [374] Nipkow, P. *Elektrisches Teleskop*. Kaiserliches Patentamt, Patentschrift 30105. 1885.
- [375] Petráň, M.; Hadravský, M.; Egger, M. D. und Galambos, R. „Tandem-Scanning Reflected-Light Microscope“. *J. Opt. Soc. Am.* 58.5 (1968), S. 661–664.
- [376] Weber, K. *Vorrichtung zur optischen Abtastung mikroskopischer Objekte*. Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift 1 472 293. 1969.
- [377] Wilke, V. „Optical Scanning Microscopy - The Laser Scan Microscope“. *Scanning* 7 (1985), S. 88–96.
- [378] Meinert, T.; Weber, N.; Zappe, H. und Seifert, A. „Varifocal MOEMS fiber scanner for confocal endomicroscopy“. *Opt. Express* 22.25 (2014), S. 31529–31544.
- [379] Petráň, M.; Boyde, A. und Hadravský, M. „Direct View Confocal Microscopy“. *Confocal Microscopy*. Hrsg. von Wilson, T. 1. Aufl. London: Academic Press, 1990. Kap. 9, S. 245–283.
- [380] Kino, G. S. und Xiao, G. Q. „Real-time Scanning Optical Microscopes“. *Confocal Microscopy*. Hrsg. von Wilson, T. 1. Aufl. London: Academic Press, 1990. Kap. 14, S. 361–387.
- [381] Chanbai, S.; Zafarullah, I.; Wiora, G.; Wewer, L. und Roth, H. „Confocal Line Scanning Sensor“. *J. Phys.: Conf. Ser.* 311 (2011), S. 012028.
- [382] Cogswell, C. J.; Sheppard, C. J. R.; Moss, M. C. und Howard, C. V. „A method for evaluating microscope objectives to optimize performance of confocal systems“. *J. Microsc.* 158.2 (1990), S. 177–185.
- [383] Schick, A. und Doemens, G. *Optischer Abstandssensor*. Deutsches Patentamt, Patentschrift DE 196 08 468 C2. 1997.
- [384] Yasuno, Y.; Makita, S.; Yatagai, T.; Wiesendanger, T.; Ruprecht, A. und Tiziani, H. „Non-mechanically-axial-scanning confocal microscope using adaptive mirror switching“. *Opt. Express* 11.1 (2003), S. 54–60.
- [385] Schick, A. und Doemens, G. *Konfokales Abbildungssystem mit geteiltem Retroreflektor*. Europäische Patentschrift 1 305 566 B1. 2005.
- [386] 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.
- [387] 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.

- [388] Oku, H. und Ishikawa, M. „A variable-focus lens with 1 kHz bandwidth applied to axial-scan of a confocal scanning microscope“. *The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS)*. 2003.
- [389] Khan, S. A. und Riza, N. A. „Confocal microscopy based agile optical endoscope using liquid crystals“. *Digest of the LEOS Summer Topical Meetings Biophotonics/Optical Interconnects and VLSI Photonics/WBM Microcavities*. 2004.
- [390] Jabbour, J. M.; Malik, B. H.; Olsovsky, C.; Cuenca, R.; Cheng, S.; Jo, J. A.; Cheng, Y.-S. L.; Wright, J. M. und Maitland, K. C. „Optical axial scanning in confocal microscopy using an electrically tunable lens“. *Biomed. Opt. Express* 5.2 (2014), S. 645–652.
- [391] 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)“. *Opt. Express* 22.5 (2014), S. 6025–6039.
- [392] Kang, S.; Duocastella, M. und Arnold, C. B. „Variable optical elements for fast focus control“. *nature photonics* 14 (2020), S. 533–542.
- [393] Mermillod-Blondin, A.; McLeod, E. und Arnold, C. B. „High-speed varifocal imaging with a tunable acoustic gradient index of refraction lens“. *Opt. Lett.* 33.18 (2008), S. 2146–2148.
- [394] Duocastella, M.; Vicidomini, G. und Diaspro, A. „Simultaneous multiplane confocal microscopy using acoustic tunable lenses“. *Opt. Express* 22.16 (2014).
- [395] Köhler, A. „Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrophotographische Zwecke“. *Zeitschr. f. wiss. Mikroskopie* 10.4 (1893), S. 433–440.
- [396] Gu, M.; Sheppard, C. J. R. und Gan, X. „Image formation in a fiber-optical confocal scanning microscope“. *J. Opt. Soc. Am. A* 8.11 (1991), S. 1755–1761.
- [397] Gu, M.; Gan, X. und Sheppard, C. J. R. „Three-dimensional coherent transfer functions in fiber-optical confocal scanning microscopes“. *J. Opt. Soc. Am. A* 8.7 (1991), S. 1019–1025.
- [398] Gu, M. und Sheppard, C. J. R. „Signal level of the fibre-optical confocal scanning microscope“. *J. Mod. Opt.* 38.8 (1991), S. 1621–1630.
- [399] Corle, T. R.; Chou, C.-H. und Kino, G. S. „Depth response of confocal optical microscopes“. *Opt. Lett.* 11.12 (1986), S. 770–772.
- [400] Sheppard, C. J. R. „Aberrations in high aperture conventional and confocal imaging systems“. *Appl. Opt.* 27.22 (1988), S. 4782–4786.

- [401] Wilson, T. und Carlini, A. R. „The effect of aberrations on the axial response of confocal imaging systems“. *J. Microsc.* 154.3 (1989), S. 243–256.
- [402] Zurich Instruments. „Principles of lock-in detection and the state of the art“. *White Paper* (Nov. 2016).
- [403] Leach, R. „Precision Measurement Instrumentation - Some Design Principles“. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Leach, R. 2. Aufl. Elsevier, 2014. Kap. 3, S. 41–61.
- [404] *DIN EN ISO 25178-70:2014. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 70: Maßverkörperungen (ISO 25178-70:2014)*.
- [405] El Melegy, A.; Hausotte, T.; Younes, M. A.; Amer, M.; Weinert, B. und Klöpzig, U. „Large range self-sensing atomic force microscope (LR-SAFM) for surface topography“. *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*. 2016, S. 261–266.
- [406] *DIN EN ISO 5436-1:2000. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale - Teil 1: Maßverkörperungen (ISO 5436-1:2000)*.
- [407] Hegewald, T. „Modellierung des nichtlinearen Verhaltens piezokeramischer Aktoren“. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 2007.
- [408] Ziegler, J. G. und Nichols, N. B. „Optimum Settings for Automatic Controllers“. *trans. ASME* 64.11 (1942), S. 759–765.
- [409] Fantner, G. E.; Burns, D. J.; Belcher, A. M.; Rangelow, I. W. und Youcef-Toumi, K. „DMCMN: In Depth Characterization and Control of AFM Cantilevers With Integrated Sensing and Actuation“. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*. 131.6 (2009), S. 061104.
- [410] Ellis, J. D. *Field Guide to Displacement Measuring Interferometry*. Hrsg. von Greivenkamp, J. E. 1. Aufl. SPIE Press, 2014.
- [411] Heydemann, P. L. M. „Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers“. *Appl. Opt.* 20.19 (1981), S. 3382–3384.
- [412] *DIN EN ISO 4287:1998+AC:2008+A1:2009. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennung, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997+Cor 1:1998+Cor 2:2005+Amd 1:2009)*.
- [413] Leach, R.; Haitjema, H.; Su, R. und Thompson, A. „Metrological characteristics for the calibration of surface topography measuring instruments: a review“. *Meas. Sci. Technol.* 32.3 (2021), S. 032001.

- [414] Foreman, M. R.; Giusca, C. L.; Coupland, J. M.; Török, P. und Leach, R. K. „Determination of the transfer function for optical surface topography measuring instruments—a review“. *Meas. Sci. Technol.* 24.5 (2013), S. 052001.
- [415] Groot, P. de. „The instrument transfer function for optical measurements of surface topography“. *J. Phys. Photonics* 3.2 (2021), S. 024004.
- [416] Papula, L. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2 - Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 14. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [417] Groot, P. de; Lega, X. C. de; Sykora, D. und Deck, L. „The Meaning and Measure of Lateral Resolution for Surface Profiling Interferometers“. *Opt. Photonics News* 23 (2012), S. 10–13.
- [418] Puente León, F. und Jäkel, H. *Signale und Systeme*. 7. Aufl. Berlin / Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2019.
- [419] Weckenmann, A.; Tan, Ö.; Hoffmann, J. und Sun, Z. „Practice-oriented evaluation of lateral resolution for micro- and nanometre measurement techniques“. *Meas. Sci. Technol.* 20.6 (2009), S. 065103.
- [420] Giusca, C. L. und Leach, R. K. „Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 3. Resolution“. *Meas. Sci. Technol.* 24 (2013), S. 105010.
- [421] Birch, G. C. und Griffin, J. C. „Sinusoidal Siemens star spatial frequency response measurement errors due to misidentified target centers“. *Opt. Eng.* 54.7 (2015), S. 074104.
- [422] Eifler, M.; Ströer, F.; Hering, J.; Freymann, G. von und Seewig, J. „User-oriented evaluation of the metrological characteristics of areal surface topography measuring instruments“. *Proc. SPIE*. Bd. 11056. 110560Y. 2019.
- [423] Aguilar, J. F. und Méndez, E. R. „On the Limitations of the Confocal Scanning Optical Microscope as a Profilometer“. *J. Mod. Opt.* 42.9 (1995), S. 1785–1794.
- [424] Harasaki, A. und Wyant, J. C. „Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry“. *Appl. Opt.* 39.13 (2000), S. 2101–2106.
- [425] Leach, R. K.; Giusca, C. L. und Rubert, P. „A single set of material measures for the calibration of areal surface topography measuring instruments: the NPL Areal Bento Box“. *Proc. Met. & Props* 23. 2013, S. 406–413.

- [426] Langholz, N.; Seewig, J. und Reithmeier, E. „Robust surface fitting - Using weights based on a priori knowledge about the measurement process“. *Wear* 266.5-6 (2009), S. 515–517.
- [427] Weise, W.; Zinin, P.; Wilson, T.; Briggs, A. und Boseck, S. „Imaging of spheres with the confocal scanning optical microscope“. *Opt. Lett.* 21.22 (1996), S. 1800–1802.
- [428] Aguilar, J. F.; Lera, M. und Sheppard, C. J. R. „Imaging of spheres and surface profiling by confocal microscopy“. *Appl. Opt.* 39.25 (2000), S. 4621–4628.
- [429] Mauch, F.; Lyda, W.; Gronle, M. und Osten, W. „Improved signal model for confocal sensors accounting for object depending artifacts“. *Opt. Express* 20.18 (2012), S. 19936–19945.
- [430] Aguilar, J. F. „Confocal profiling of grooves and ridges with circular section using the divided aperture technique“. *Rev. Mex. Fis.* 51.4 (2005), S. 420–425.
- [431] Belkner, J.; Ortlepp, I.; Gerhardt, U. und Manske, E. „Compensating Aberration induced Error in Differential Confocal Microscopy“. *Proc. SPIE*. Bd. 11782. 117820P. 2021.
- [432] Ahn, S. J. *Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space*. Springer-Verlag, 2004.
- [433] Hillmann, W. und Kunzmann, H. „Surface Profiles Obtained by Means of Optical Methods - Are They True Representations of the Real Surface?“ *CIRP Ann.* 39.1 (1990), S. 581–583.
- [434] Haitjema, H. „International comparison of depth-setting standards“. *Metrologia* 34.2 (1997), S. 161–167.
- [435] Leach, R. und Hart, A. *A comparison of stylus and optical methods for measuring 2D surface texture*. Techn. Ber. National Physical Laboratory, 2002.
- [436] Rhee, H.-G.; Vorburger, T. V.; Lee, J. W. und Fu, J. „Discrepancies between roughness measurements obtained with phase-shifting and white-light interferometry“. *Appl. Opt.* 44.28 (2005), S. 5919–5927.
- [437] Ottevaere, H.; Schwider, J.; Kacperski, J.; Steinbock, L.; Weible, K.; Kujawinska, M. und Thienpont, H. „Benchmarking instrumentation tools for the characterization of microlenses within the EC Network of Excellence on Micro-Optics (NEMO)“. *Proc. SPIE*. Bd. 6995. 69950J. 2008.

- [438] McCarthy, M. B.; Brown, S. B.; Evenden, A. und Robinson, A. D. „NPL freeform artefact for verification of non-contact measuring systems“. *Proc. SPIE*. Bd. 7864. 7864oK. 2011.
- [439] Launhardt, M.; Wörz, A.; Loderer, A.; Laumer, T.; Drummer, D.; Hausotte, T. und Schmidt, M. „Detecting surface roughness on SLS parts with various measuring techniques“. *Polym. Test.* 53 (2016), S. 217–226.
- [440] Heinel, M.; Greiner, S.; Wudy, K.; Pobel, C.; Rasch, M.; Huber, F.; Papke, T.; Merklein, M.; Schmidt, M.; Körner, C.; Drummer, D. und Hausotte, T. „Measuring procedures for surface evaluation of additively manufactured powder bed-based polymer and metal parts“. *Meas. Sci. Technol.* 31.9 (2020), S. 095202.
- [441] Schmitt, R.; Uekita, M. und Vielhaber, K. „Focus sensor with integrated high-range slope measurement“. *Meas. Sci. Technol.* 20.11 (2009), S. 117003.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Schaude, J. und Hausotte, T. „Uncertainty-based determination of recalibration dates“. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.* 15.2 (2024).
- [P2] Schaude, J. und Hausotte, T. „Investigations on the accuracy and evaluation of the uncertainty of stitching in optical surface metrology“. *Proc. SPIE*. Bd. 12618. 1261813. 2023.
- [P3] Schaude, 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“. *tm - Tech. Mess.* 86.S1 (2019), S. 12–16.
- [P4] Gröschl, A. C.; Schaude, J. und Hausotte, T. „Evaluation und Korrektur thermischer Driften eines hochfrequent fokusbandsmodulierten, fasergekoppelten konfokalen Punktsensors“. *tm - Tech. Mess.* 86.S1 (2019), S. 117–121.
- [P5] Schaude, J. und Hausotte, T. „Investigations on the measurement precision of an atomic force microscope with an adjustable probe direction“. *Proc. 21st euspen Int. Conf.* 2021.
- [P6] Hausotte, T.; Gröschl, A. und Schaude, J. „High-speed focal-distance-modulated fiber-coupled confocal sensor for coordinate measuring systems“. *Appl. Opt.* 57.14 (2018), S. 3907–3914.
- [P7] Schaude, J.; Gröschl, A. C. und Hausotte, T. „Stitched open-loop measurements with a focal-distance-modulated confocal sensor“. *tm - Tech. Mess.* 88.9 (2021), S. 544–555.
- [P8] Gröschl, A.; Köhnen, S.; Schaude, J. und Hausotte, T. „Improvements of a high-speed focus distance modulated fibre-coupled confocal sensor for nanocoordinate measuring systems“. *Sensors and Measuring Systems; 19th ITG/GMA-Symposium*. VDE. 2018, S. 98–101.
- [P9] Schaude, J.; Fimushkin, M. und Hausotte, T. „Redesigned Sensor Holder for an Atomic Force Microscope with an Adjustable Probe Direction“. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 22.9 (2021), S. 1563–1571.
- [P10] Schaude, J. und Hausotte, T. „Atomic Force Microscope with an Adjustable Probe Direction and Integrated Sensing and Actuation“. *Nanomanuf. Metrol.* 5.2 (2022), S. 139–148.
- [P11] Schaude, J.; Baumgärtner, B. und Hausotte, T. „Bidirectional confocal measurement of a microsphere“. *Appl. Opt.* 60.28 (2021), S. 8890–8895.

- [P12] Schaudé, J.; Gröschl, A. C. und Hausotte, T. „Effect of a Misidentified Centre of a Type ASG Material Measure on the Determined Topographic Spatial Resolution of an Optical Point Sensor“. *Metrology* 2.1 (2022), S. 19–32.
- [P13] Gröschl, A.; Schaudé, J. und Hausotte, T. „Kontinuierliche laterale Abtastung von Oberflächen durch axiale Regelung des Arbeitsabstandes in einem Nanokoordinatenmessgerät mit einem hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensor“. *tm - Tech. Mess.* 85.S1 (2018), S. 26–32.
- [P14] Schaudé, 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.
- [P15] Gröschl, A. C.; Schaudé, J. und Hausotte, T. „Evaluation of the optical performance of a novel high-speed focal-distance-modulated fibre-coupled confocal sensor“. *Proc. SPIE.* Bd. 11056. 110560N. 2019.
- [P16] Gröschl, A. C.; Schaudé, J. und Hausotte, T. „Evaluation und Justierung eines neuartigen, hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensors für axial geregelte Oberflächenmessungen mit einem Nanokoordinatenmessgerät“. *tm - Tech. Mess.* 86.4 (2019), S. 216–226.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S₁] Schaude, J. „Ansteuerung und Auswertung eines hochfrequent abstandsmodulierten Konfokalsensors in einem Nanokoordinatensystem“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S₂] Fimushkin, M. „Optimierung der Integration selbstsensierender Cantilever in die NMM-1 und Erweiterung des Systems um eine Höhenregelung des für die Anregung genutzten Piezoaktors“. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [S₃] Hornung, J. „Evaluation unterschiedlicher Algorithmen zur Bestimmung der Formabweichung einer Kugel“. Projektarbeit. Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg, 2019.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):
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
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
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 Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
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 Bruchverhaltens 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 Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
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 Biegeumformung 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-Laserstrahlbearbeitung 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 Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikiagnostik 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 Simulationsverfahrens 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 Bearbeitungsabläufe 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 durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

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

Band 40: Konrad Grampp

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

Band 41: Martin Koch

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

Band 42: Armin Gropp

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

Band 43: Werner Heckel

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

Band 44: Armin Rothhaupt

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

Band 45: Bernd Zöllner

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

Band 46: Bodo Vormann

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

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

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

Band 49: Wolfgang Greska

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

Band 50: Jörg Franke

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

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

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

Band 53: Robert Hopperdietzel

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

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)

FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln

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 Meßner

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 mechanischer 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

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage 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 wissensbasierter 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 Lebensdauer vorhersage 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
Wissensbasierte 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 Integration 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 Montagesystemen 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 Elektronikproduktion
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 Eßer
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 Anschlußkontakten 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 Einsatz 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 Steuerungssystemes für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck

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 - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, 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 produktbezogener 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 Magnesiumlegierungen 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 Produktstrukturen 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 Löten mit Diodenlaserstrahlung 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-Entwicklung 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 Kleinstteile 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 trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten 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 - Prozessanalyse 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 Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung 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 Prechtel
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 blei-freie 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 Mikrojustier-technik 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 Schal-tungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer 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 Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplati-nen
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit 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 prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen 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 wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen 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 Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen 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 Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen 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 Rührreißschweißen 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 Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen 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 Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahltiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

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

Band 206: Steffen Polster

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

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

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

Band 209: Till Laumann

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

Band 210: Alexander Diehl

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

Band 211: Detlev Staud

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

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen 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 Innenhochdruck-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 Laserstrahl-sintern 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 Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation 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 Laserstrahlhärtings mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - 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 Berücksichtigung 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 Entwicklung 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 Laserstrahl-löten 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 Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidlinchverfahrens

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 Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
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 Karosseriebauteile 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 Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage 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 Metallampffackelposition
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
LPT, 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 aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
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 Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten 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 Presshärteprozess 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 beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung 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 Zöllner

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 Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosserie-
bau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings 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
Großserientaugliche 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 montagefähiger Werkerinformationsysteme 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 unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten 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) / Experimentelle 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 Magnesiumlegierung 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 Blechmassivumformprozessen 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 artungleicher Werkstoffe mittels Schneidlinchverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen 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 Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge 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 Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer 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 Herstellung 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 schrägverzahnten 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 Heißschmelzprozesses
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 Aluminiumblechbauteile 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 Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen 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 Bauelemente
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 Geometrie-Modelle 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 Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahl-schweißen von flachleiterbasierten Formspulenkwicklungen 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-Supported 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 Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess 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 Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung 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 Werkzeugbau 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-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementenschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 8 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J.**Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiller, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramik
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel Lutz

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdehahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsi- cherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrande Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vor- wärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus

Grundlagenwissenschaftliche Un- tersuchungen zum Kaltfließpres- sen kleinster metallischer Pin- Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth

Assessment of microcirculation
by shifted position-diffuse
reflectance imaging (SP-DRI) LPT,
xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8 Tab.
2024.

ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke

Methode zur Auswahl eines alter-
nativen Blechwerkstoffes für flexi-
bel gewalzte und direkt warmum-
geformte Karosseriestrukturbau-
teile

LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder,
27 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur
Blechumformung von Hybridbau-
teilen

LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching

Numerische Optimierung von
sekundären, geschmierten Punkt-
und Ellipsenkontakten zur geziel-
ten Auslegung von Rollenlagern
KTmfk, xxv u. 206 Seiten,
70 Bilder, 16 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-
down automatisierter Produkti-
onssysteme

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder,
4 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm

Kombinierte Material- und
Energieflusssimulation gleich-
strombasierter, automatisierter
Produktionsanlagen

FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder,
13 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaude

Untersuchungen zur rasterkraft-
und konfokalmikroskopischen
Charakterisierung nanometrologi-
scher Referenzkörper

FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4
Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-776-0.

Abstract

Highly accurate manufacturing technologies pose an enormous challenge for dimensional metrology. Due to the lack of suitable sensor systems, measurements on complex geometries with target uncertainties in the nanometre-range are still a largely unresolved problem. This is mainly caused by a lack of highly accurate measurement procedures to calibrate micro-dimensional reference bodies in terms of their coarse and fine form.

This thesis presents and examines two procedures that might be applied for the nanometrological calibration of reference bodies. Firstly, a scanning force microscope with an adjustable probe direction to calibrate the fine form and secondly, the bidirectional confocal microscopy to calibrate the coarse form of nanometrological reference bodies.

Hochgenaue Fertigungstechnologien stellen die dimensionelle Messtechnik vor enorme Herausforderungen. In Ermangelung geeigneter Sensorsysteme sind Messungen an komplexen Geometrien mit einem Höchstwert der Messunsicherheit im Nanometerbereich ein größtenteils immer noch ungelöstes Problem. Hauptursächlich ist das Fehlen geeigneter Verfahren zur hochgenauen Kalibrierung mikrodimensionaler Referenzkörper sowohl hinsichtlich ihrer Grob- als auch ihrer Feingestalt.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei diesbezüglich potentiell geeignete Messmethoden präsentiert und untersucht. Dies ist zum einen ein Rasterkraftmikroskop mit einstellbarer Antastrichtung zur Kalibrierung der Feingestalt und zum anderen die bidirektionale Konfokalmikroskopie zur Kalibrierung der Grobgestalt nanometrologischer Referenzkörper.

