

# Heißprägen multifunktionaler Kalibriernormale für die optische 3D Mikroskopie

## Beurteilung gerätespezifischer Eigenschaften

Prof. Dr.-Ing. **E. Reithmeier**<sup>1</sup>, Prof. Dr. **Joachim Frühauf**<sup>2</sup>  
Dipl. Phys. **Maik Rahlves**<sup>1</sup>, Dr. **Arne Kraft**<sup>1</sup>, Dipl. Ing. **Mario Seifert**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Hannover

<sup>2</sup>Fachgruppe für Werkstoffe der Elektrotechnik/Elektronik, Universität Chemnitz

### Kurzfassung

Kernthema bei der Entwicklung günstiger multifunktionaler Kalibriernormale für die optische 3D Mikroskopie ist die Auswahl geeigneter Strukturen. Hierfür ist ein Verständnis des gerätespezifischen Abbildungsverhaltens und seiner Auswirkungen auf die gewonnenen Messergebnisse notwendig. In diesem Artikel wird zunächst ein einfaches Modell zur Beschreibung einzelner Einflussfaktoren aufgestellt. Die anhand dieses Modells gewonnenen Aussagen werden mit Messungen an speziell gefertigten Strukturen verglichen. Die Abformung solcher Silizium-Primärnormale mittels Heißprägen wird demonstriert.

### 1. Einleitung

Die optische 3D Messtechnik hat sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Hilfsmittel bei der Beurteilung von Fertigungsprozessen in der Mikro- und Nanotechnik entwickelt. Mikrostrukturierte Oberflächen, wie sie z. B. in Zylinderlaufbahnen [1] für ein verbessertes Gleitverhalten sorgen, müssen flächig charakterisiert werden. Messungen mit Tastschnittgeräten, wie sie weitestgehend üblich sind, geben im Normalfall nur Informationen über einen einzelnen Schnitt. Aussagen, die für die Charakterisierung von Mikrostrukturen wichtig sind, wie Orientierung, Verteilung und Ausprägung, können aus einem einzelnen Schnitt nicht gewonnen werden. Die Möglichkeit, mehrere parallele Schnitte zu vermessen, ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Abhängig vom Oberflächenmaterial kann es zu einer Beschädigung der Oberfläche kommen. Einen Ausweg bieten optische Messverfahren wie die Weißlichtinterferometrie (WLI) oder die konfokale Mikroskopie. Vorteile dieser Systeme sind schnelle, nicht-invasive Messungen. Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Mikroskoptypen wird auf weiterführende Literatur [1,2,3] verwiesen.

Sowohl taktile, als auch optische Messsysteme müssen kalibriert werden, um Rückführbarkeit zu gewährleisten. Optische Systeme unterliegen jedoch grundsätzlich anderen Beschränkungen als taktile Systeme. Für gerätespezifische Artefakte sind bei optischen und taktilen Geräten z. T. unterschiedliche Ursachen anzuführen. Bislang bestehen für optische Geräte keine einheitlichen Kalibrierstrategien und Kalibrierkörper.

Um Rückführbarkeit auch für optische Systeme zu gewährleisten, werden in Anlehnung an ISO 5436-1 multifunktionale (d. h. Normale, die unterschiedliche Geometrien auf einen Träger vereinen) Kalibriernormale entwickelt und mittels Heißprägen vervielfältigt. Diese Normale sind besonders auf die spezifischen Eigenschaften der konfokalen Mikroskopie und Interferenzmikroskopie zugeschnitten.

## **2. Abbildungseigenschaften optischer 3D-Mikroskope und Artefaktentstehung**

Bei der Entwicklung von Kalibriernormalen sind zwei verschiedene Ausrichtungen zu unterscheiden. Zum einen Normale, die eine Rückführung der gemessenen Größen ermöglichen und zum anderen Normale, welche die Grenzen des verwendeten Systems aufzeigen. Die Entwicklung eines geeigneten Kalibriernormaldesigns erfordert in einem ersten Schritt die Identifizierung von Strukturen, die aufgrund ihrer Geometrie nicht oder verfälscht von den Mikroskopen abgebildet werden können. Hierzu ist die genaue Kenntnis der physikalischen Parameter, welche die Abbildungseigenschaften der unterschiedlichen Mikroskoptypen beeinflussen, erforderlich. Eine wichtige Rolle spielt hierbei u. a. der begrenzte Öffnungswinkel (numerische Apertur NA) des Objektivs. An einem einfachen geometrischen Modell ist in [2] verdeutlicht, dass eine begrenzte NA den maximal messbaren Flankenwinkel eines Untersuchungsobjektes einschränkt, da das vom Objekt zurückreflektierte Licht nicht mehr in das Mikroskop gelangt. Ein zu großer Oberflächengradient führt somit zu Fehlstellen im Messdatensatz, die bei der Kalibrierung berücksichtigt werden müssen. Hierzu bieten sich Strukturen mit einer definierten Krümmung (z.B. Kugel) an, die ein kontinuierliches Spektrum an Flankenwinkeln bieten. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 1 (folgende Seite) Messergebnisse einer Kugeloberflächenbestimmung dargestellt, die sowohl mit einem Weißlichtinterferometer (NA=0,55), als auch einem konfokalen Mikroskop (NA=0,8) aufgenommen wurden. Beide Messungen zeigen, dass der abgebildete Bereich vom Oberflächengradienten abhängt, wobei bei der WLI-Messung noch zusätzlich eine Richtungsabhängigkeit erkennbar ist, die ebenfalls bei der Kalibrierung berücksichtigt werden muss.

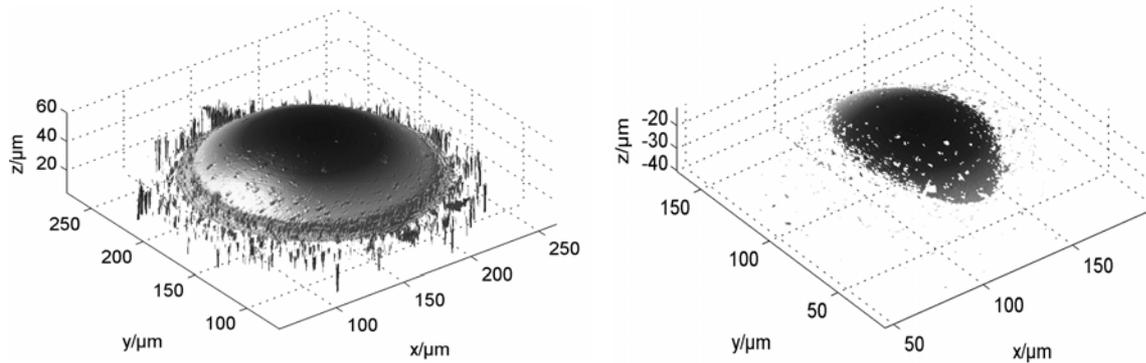


Abb. 1: 3D-Profile einer Glaskugel; links: Messung mit einem konfokalen Mikroskop (NA=0,8), rechts: Messung mit WLI (NA=0,55)

Die begrenzte NA schränkt auch das Frequenzübertragungsverhalten im Ortsraum ein. Zur Ermittlung des Frequenz-Cutoffs bieten sich in diesem Zusammenhang z. B. Sinusnormale mit unterschiedlichen Raumfrequenzen an [5].

Weiterhin sind die Kohärenzeigenschaften der verwendeten Lichtquelle zu berücksichtigen. Messungen mit einem WLI haben gezeigt, dass Stufen nicht richtig wiedergegeben werden wenn die Stufenhöhe kleiner ist als die Kohärenzlänge der verwendeten Weißlichtquelle. In [6] wurde durch eine numerische Simulation einer WLI-Messung an einer Stufe gezeigt, dass Interferenzeffekte des von der Ober- und Unterseite der Stufe reflektierten Lichts zu einer von der Stufenhöhe abhängigen Überlagerung und Verschiebung des Korrelogramms führen. Durch diese Interferenzeffekte entstehen Über- und Unterschwingern im gemessenen Profil einer Stufe.

Messungen an steilen Kanten mit einem konfokalen Mikroskop zeigen ebenfalls, dass Überschwingern an Stufen entstehen können. Basierend auf einer numerischen Simulation geben Aguilar und Mendez [7] als Grund für das Fehlverhalten eines idealen konfokalen Mikroskops mit monochromatischer Beleuchtung Phasensprünge innerhalb des Beleuchtungsflecks auf der gemessenen Oberfläche. Um den Einfluss von Phasensprüngen auf ein ideales konfokales Mikroskop näher zu untersuchen, wird im nächsten Abschnitt ein vereinfachtes analytisches Modell zur Untersuchung der physikalischen Parameter eingeführt, die am Fehlverhalten des Messgeräts beteiligt sind.

## 2.1 Einfaches Modell zur Beschreibung von Artefakten an steilen Kanten

Überschwinger lassen sich für das ideale konfokale Mikroskop nicht durch einen abrupten Frequenz-Cutoff im Sinne des Gibb'schen Phänomens erklären, da das konfokale Mikroskop im Gegensatz zu einem normalen Mikroskop keine kastenförmige [5], sondern eine dreiecksförmige optische Transferfunktion (OTF) besitzt [3]. Die OTF des konfokalen Mikroskops sorgt für eine Verrundung von scharfen Kanten, wie in [8] beschrieben wird. Diese Erklärung muss aber u. U. für reale konfokale Mikroskope nicht gelten, da je nach Bauart die OTF einen „scharfen Cutoff“ zeigen kann. Das Überschwingverhalten eines konfokalen Mikroskops wurde von Aguilar und Mendez [7] durch numerische Simulation untersucht, die auf rigoroser Beugung basieren. Sie schlugen vor, dass die Oszillationen im gemessenen Profil nahe einer Kante durch Phasenunterschiede innerhalb des Beleuchtungsflecks auf der Oberfläche entstehen. Um den Einfluss von Phasensprüngen auf die Konfokalkurve zu untersuchen, welche von einem Untersuchungsobjekt erzeugt werden, wird im Folgenden ein einfaches analytisches Modell eines Punktdetektors zur Messung einer Stufe vorgestellt.

Das Modell ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird von einem idealen Punktdetektor ausgegangen, d.h. ein infinitesimal kleines Pinhole wird von einer ebenen monochromatischen Welle der Wellenlänge  $\lambda$  (mit Wellenvektor  $k=2\pi/\lambda$ ) beleuchtet. Das Pinhole wird über die beugungsbegrenzte Linse L1 auf das Untersuchungsobjekt, welches sich im Abstand  $b+z$  von L1 befindet, abgebildet. Der Fokuspunkt der Linse L1 befindet sich in der ( $z=0$ )-Ebene. Das vom Untersuchungsobjekt reflektierte Licht wird zurück auf das Pinhole abgebildet. Die Intensität des Lichtes, welches das Pinhole erneut passiert, wird von der Linse L2 auf einen CCD-Chip abgebildet, der die Intensität detektiert. L2 wird als eine ideale (d.h. nicht-beugungsbegrenzte) Linse angenommen. Zur Bestimmung der

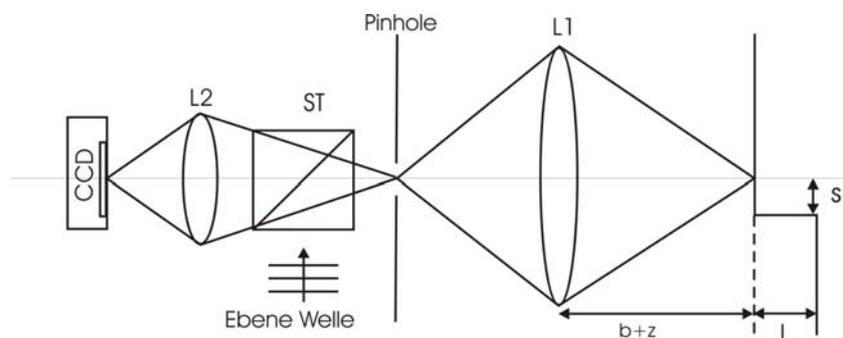


Abb. 2: Skizze des vereinfachten Punktsensors zur Untersuchung einer Stufe der Höhe  $L$ , die den Abstand  $s$  zu optischen Achse des Mikroskops hat.

Oberflächentopographie wird bei einer Messung die Intensität für verschieden Abstände  $z$  bestimmt. Im Idealfall ist die detektierte Intensität maximal, wenn sich die Oberfläche im Fokuspunkt von L1 befindet ( $z=0$ ).

Da im Rahmen des Modells Interferenzeffekte untersucht werden sollen, ist es ausreichend die Stufe als Phasenschirm zu modellieren, der bei gleichbleibender Höhe nur die Phase des reflektierten Lichtes ändert. Mit einem Abstand  $s$  der Stufe zur optischen Achse und einer Stufenhöhe  $L$  lässt sich der Reflektionskoeffizient des Phasenschirms durch die Heaviside-Stufenfunktion [10] darstellen als

$$r(x) = \exp[ikL] \cdot \begin{cases} 1 & , x \leq s \\ 0 & , x > s \end{cases} \quad (1)$$

wobei  $x$  die Koordinate auf dem Phasenschirm angibt. Die Heaviside'sche Stufenfunktion ist mathematisch problematisch, da sie an der Kante nicht stetig ist. Eine Beschreibung durch eine stetige Näherung der Heaviside-Funktion führt jedoch zu gleichen Ergebnissen. Um zu analytischen Ausdrücken zu gelangen, wird angenommen, dass die Pupillenfunktion der Linse L1 durch eine Gauß-Funktion beschrieben werden kann. Diese Annahme führt zu einem ebenfalls gaußförmigen Beleuchtungsfleck (Punktbildfunktion) auf der zu untersuchenden Oberfläche. Die vom Detektor aufgenommene Intensität  $I(z)$  wird durch

$$I(z) = \left| U_0 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} h(x, z) \cdot r(x) \cdot h(-x, z) dx \right|^2 \quad (2)$$

beschreiben, wobei  $h(x, z)$  die in [9] gegebene Transferfunktion der Linse in der paraxialen Näherung ist. Für kleine Werte von  $s$  kann Gleichung 1 um  $s=0$  entwickelt werden und es gilt

$$I(\xi) = \frac{2 + 2 \cos(kL)}{\sqrt{1 + \xi^2}} + (4 - 4 \cos(kL)) \cdot \frac{NA^2 k^2 s^2}{\pi(1 + \xi^2)} + \pi \cdot NAk \frac{\sin(kL) \cdot \sin(0,5 \arctan(\xi))}{(1 + \xi^2)^{3/4}} \cdot s \quad (3)$$

mit  $\xi = k \cdot z \cdot NA^2$ . Aus Gleichung 3 ist ersichtlich, dass drei Fälle unterschieden werden müssen:

1.  $L = n\lambda, n \in \mathbb{Z}$ : In diesem Fall sind die letzten beiden Terme aus Gleichung 3 gleich Null und unterschiedliche Messpositionen  $s$  haben keinen Einfluss auf die Messung, da das Licht konstruktiv interferiert.
2.  $L = (2n-1)\lambda/2, n \in \mathbb{Z}$ : Nur der mittlere Term aus Gleichung 3 ist nicht gleich Null. Eine Verschiebung der Stufe (Messposition) um  $s$  ändert nur die maximale Intensität von  $I(z)$ . Das Maximum bleibt aber bei  $z=0$  und die Phasenschirmhöhe wird richtig detektiert. Bei  $s=0$  ist  $I(z)=0$ , da das Licht, welches links und recht von der Phasenstufe reflektiert wird,

destruktiv interferiert. (Es ist zu beachten, dass Gleichung 3 nur eine Näherung für kleine  $s$  darstellt. Für große  $s$  strebt Gleichung 3 gegen unendlich.)

3. Für alle übrigen  $L$  hat  $I(z)$  nur noch das Maximum für  $s=0$  in der ( $z=0$ )-Ebene, da der dritte Term aus Gleichung 3 für eine Verschiebung des Intensitätspeaks sorgt. In Abbildung 3 ist die Intensitätsfunktion für verschiedene Messpositionen  $s$  über den Scanweg  $z$  aufgetragen, wobei sich der Peak von  $I(z)$  deutlich sichtbar verschiebt. Erfährt das von einer glatten Oberfläche reflektierte Licht einen Phasensprung, so wird die Lage der Oberfläche nicht mehr korrekt detektiert. Als Beispiel sei eine Oberfläche genannt, die mit einer optisch transparenten Schicht bedeckt ist, die für einen Phasensprung sorgt. Wird an einer Kante gemessen, wird die Kante durch die Verschiebung des konfokalen Peaks verrundet abgebildet, wie auch in [8] gezeigt ist und die OTF vermuten lässt. Allerdings muss nicht nur die Verschiebung des Peaks, sondern auch eine Verminderung der Intensität in Kantennähe berücksichtigt werden. In Abbildung 4 ist das Maximum der Intensitätsfunktion  $I$  über die Messposition  $s$  für verschiedene Werte von  $L$  aufgetragen (exakte Lösung von Gleichung 2). Die Intensitätsfunktion bricht (außer für Stufenhöhen die ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge sind) in der Nähe der Kante durch destruktive Interferenz ein. Da in realen Systemen die Intensitätsfunktion durch Rauschen gestört ist, wird in der Praxis nur die Intensitätsfunktion bis zu einem definierten Minimalwert ausgewertet. Bei zu kleiner Intensität entstehen Fehlstellen. Demnach treten durch den Phasensprung zwei Effekte auf. Zum einen entstehen durch Verringerung der Intensitätsfunktion Fehlstellen, zum anderen treten Kantenverrundungen auf. Es ist davon auszugehen, dass diese auf Interferenz beruhenden

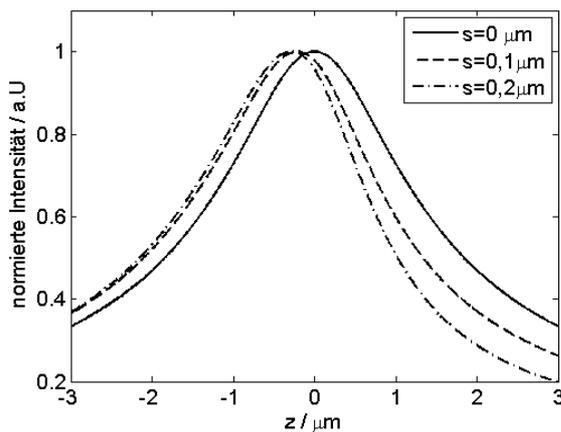


Abb.3: Normierte Intensitätsfunktion für verschiedene Messpositionen  $s$  ( $NA=0,3, L=\lambda/4$ )

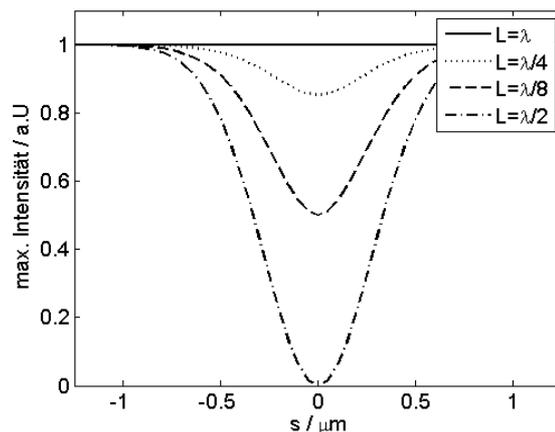


Abb. 4: Maximum der Intensitätsfunktion für der Messpositionen  $s$  für verschiedene Stufenhöhen  $L$

Effekte in Analogie zum WLI nur dann bei konfokalen Weißlichtmikroskopen auftreten, wenn die Stufenhöhe einer realen Stufe kleiner als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle ist.

## 2.2. Messungen an einer Kante mit kontinuierlich ansteigender Kantenhöhe

Zur experimentellen Verifikation der theoretisch gewonnenen Ergebnisse wird eine Rampenstruktur mit kontinuierlich ansteigender, annähernd senkrechter Flanke mit einem Steigungswinkel von ca.  $2,7^\circ$  gemessen. Diese Struktur soll später auf dem Kalibrierkörper zur Untersuchung der Abbildungseigenschaften des jeweiligen Gerätes bei unterschiedlichen Stufenhöhen dienen. Für die hier vorgestellten Messungen wurde das Silizium Primärnormal verwendet. Der kleine Steigungswinkel wurde durch anisotropes nasschemisches Ätzen eines fehlorientierten  $\{111\}$ -Silizium-Wafers realisiert. Die Herausforderungen bei der Herstellung der Rampe lagen in der Herstellung möglichst steiler und verrundungsfreier Kanten. Hinterschneidungen müssen unbedingt verhindert werden, da sie den zur Abformung notwendigen Heißprägevorgang behindern würden. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die zur Messung verwendete Rampe zunächst mit einer  $\text{SiO}_2$  Schutzschicht versehen, die beim Polieren die Verrundung aufnahm und vor der Messung entfernt wurde. Abbildung 5 (links) zeigt eine Draufsicht der Rampenstruktur. Der in Abbildung 5 (links) schwarz umrandete Bereich wurde mit einem WLI gemessen (Abb. 5, rechts). Im Flankenbereich sind bei der WLI-Messung Über- und Unterschwinger zu erkennen, so dass sich eine Modulation der Kante ergibt. Das Auftreten der Über- und Unterschwinger hängt,

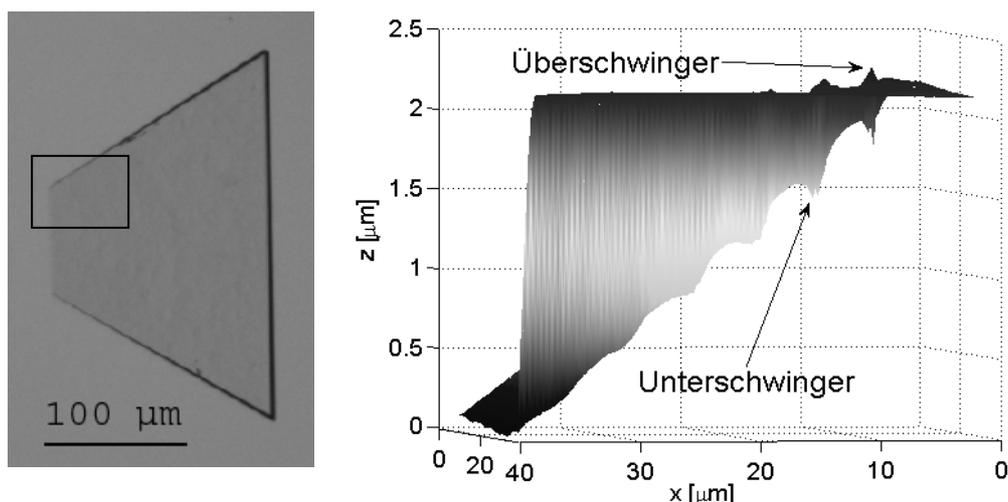


Abb. 5: links: Foto der Rampenstruktur mit kontinuierlich ansteigender Flanke; rechts: WLI-Messung des im Bild schwarz umrandeten Bereichs.

wie in [6] beschrieben, von der Höhe der Kante und damit von dem erzeugten Phasensprung ab. Die Stärke der Modulation nimmt mit zunehmender Stufenhöhe ab. Ist die Stufenhöhe größer als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle, sind keine Überschwinger zu erkennen.

In Abbildung 6 ist das Ergebnis einer Messung an derselben Rampenstruktur mit einem konfokalen Mikroskop dargestellt. Im Bereich der Rampenstruktur, der kleine Kantenhöhen enthält ist die im Modell prognostizierte Verrundung erkennbar. Zudem ließen die Konfokalkurven einen Einbruch der gemessenen Intensität in Kantennähe erkennen, wie im Modell berechnet wurde. Dies könnte allerdings auch durch eine nicht exakt senkrechte Flanke, die einen Teil des Lichtes nicht wieder ins Objektiv zurückreflektiert hat, entstanden sein. Weitere Messungen an

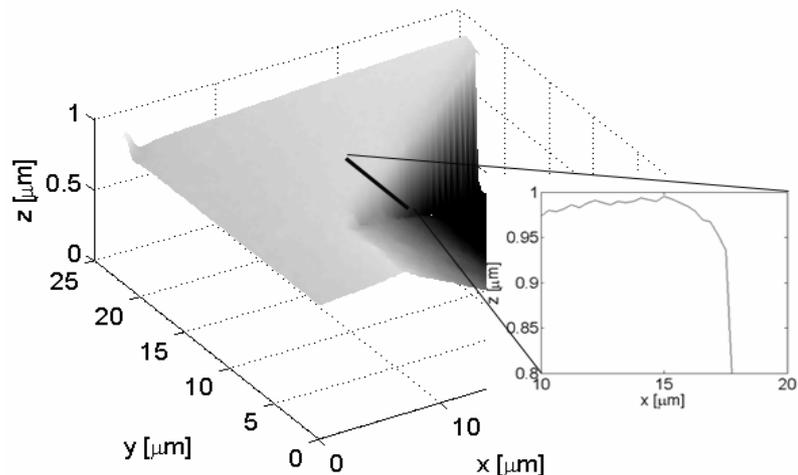


Abb.6: Messung an der in Abb. 7 gezeigten Rampenstruktur mit einem konfokalen Mikroskop. Das kleine Bild zeigt einen Profilschnitt des schwarz markierten Bereichs.

unterschiedlich orientierten bzw. geneigten Rampenstrukturen zeigten z. T. Überschwinger, die deutlich von der Lage der Rampenstrukturen unter dem Mikroskop abhängen. Die Überschwinger treten auch bei Stufenhöhen auf, die größer als die Kohärenzlänge der im Mikroskop verwendeten Lichtquelle sind. Im Verlauf der weiteren Projektarbeit soll das Verhalten des konfokalen Mikroskops auch strahlenoptisch untersucht werden, um den Einfluss von Reflektionen an den Seiten der Rampe zu untersuchen.

### 3. Weitere Entwürfe von Siliziumstrukturen

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt (Abbildung 1), zeigen die Messergebnisse bei einigen Proben eine Richtungsabhängigkeit. Zur Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit bei der Kalibrierung wurde eine Struktur entworfen, die Ringe mit einer Ringbreite von 10 μm in unterschiedlichen Tiefen (0,1 μm - 0,4 μm) enthält. Da die Herstellung von Ringstrukturen produktionsbedingt schwer möglich ist, werden die Ringe durch Polygone approximiert (36 Ecken). Zur Herstellung solcher Strukturen werden i.d.R.

mehrere kostenintensive Lithographiemasken benötigt, so dass eine Lithographiemaske hergestellt wurde, die in vier Quadranten aufgeteilt ist. Die Maske wird nach jedem Belichtungsschritt um 90° gedreht, so dass jeder Quadrant eine Strukturtiefe erzeugt. Auf diese Weise konnte die Anzahl der benötigten Masken und Belichtungsschritte reduziert werden, was zu einer kostengünstigeren Produktion führt. Die Ringstruktur befindet sich z. Zt. im Herstellungsprozess.

#### 4. Heißprägen

Eine wesentliche Aufgabe des Projekts ist, die aus den Vorüberlegungen gewonnenen Primärnormale sinnvoll auf einem Träger zu vereinen und kostengünstig zu vervielfältigen. Hierbei kommt die Heißprägetechnik zum Einsatz. Sie ermöglicht es, Strukturen mit hohem Aspektverhältnis mit Nanometergenauigkeit abzuformen. In mehreren Versuchsreihen wurden Siliziumstrukturen in unterschiedliche Materialien (u.a. PMMA, PSU, PC, POM) geprägt, wobei die Prozessparameter variiert wurden. Dabei stellte sich heraus, dass PMMA (Plexiglass) zum Prägen als besonders geeignet. Eine Prägetemperatur von 130°C und ein Prägedruck von 15 MPa führten zu den besten Ergebnissen. Um die Abweichungen zwischen Primärnormale und Prägung zu untersuchen, wurden beide Normale mit einem AFM gemessen. Unter Berücksichtigung der Tastspitzengeometrie wurde nach morphologischer Filterung der Messdaten bei optimalen Prägebedingungen Abweichungen von einigen Nanometer erreicht. Abbildung 7 zeigt exemplarisch ein Siliziumnormal und ein in PMMA abgeprägtes Normal. In einem nächsten Schritt sind sowohl die Auswirkungen von Temperatur und Feuchtigkeitsschwankungen als auch die Langzeitstabilität der Kunststoffnormale zu überprüfen.

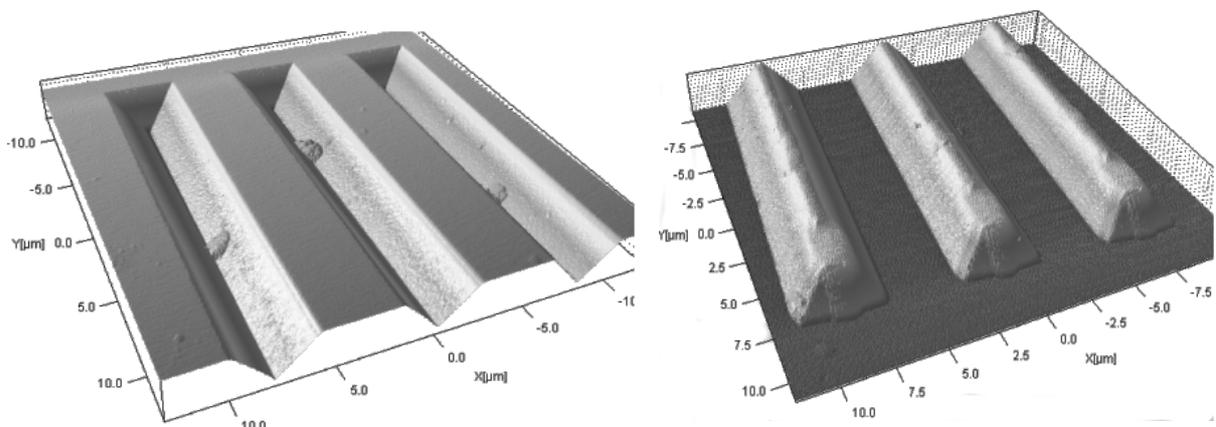


Abb. 7: Silizium Dreiecksstruktur (links) und PMMA-Prägung (rechts)

## 5. Zusammenfassung und Erweiterung

Optische 3D-Mikroskope sind für die flächenhafte Messung von mikrostrukturierten Oberflächen gut geeignet. Die gerätespezifischen Grenzen und kritischen Größen, die auf das Übertragungsverhalten Einfluss nehmen können, sind dabei zu beachten. Es wurde gezeigt, dass das Übertragungsverhalten der Mikroskope mit einem einfachen Modell simuliert werden kann. Das Modell muss schrittweise erweitert werden, um Effekte, wie z. B. Abschattung, simulieren zu können.

Zur Berücksichtigung der spezifischen Abbildungseigenschaften der Mikroskope bei der Entwicklung von Kalibriernormalen wurden neuartige Strukturen vorgestellt, die aus Silizium gefertigt werden können. Die Kalibrierkörper können mittels Heißprägen kostengünstig vervielfältigt werden. Unter Verwendung der Kalibrierkörper können Mikroskope kalibriert und gegebenenfalls die Strukturen ermittelt werden, die eine signifikante Messunsicherheit erzeugen.

## 6. Literatur

- [1] A. Weidner, J. Seewig, E. Reithmeier: *Structure oriented 3D roughness evaluation with optical profilers*. Meas. Sci. Technol. 17, 477-482 (2006)
- [2] A. Gräper, A. Kraft, J. Seewig, E. Reithmeier: *Entwicklung multifunktionaler Kalibriernormale für die optische 3D-Mikroskopie*. Tm 1, (2006)
- [3] T. Wilson: *Confocal Microscopy*. Academic Press, London (1990)
- [4] H.-J. Jordan: *Optische Mikrotopometrie und Rauheitsmessung an technischen Oberflächen*. Dissertation, Universität Stuttgart (1996)
- [5] J.W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, San Francisco, 2. Aufl. (1996)
- [6] A. Harasaki, J. Wyant: *Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometer*. Appl. Opt. 39(13), 2101-2106 (2000)
- [7] J.F. Aguilar, E.R. Mendez: *On the limitations of the confocal scanning optical microscope as a profiler*. J. Mod. Opt. 42(9), 1785-1794 (1995)
- [8] S.J. Hwelett, S.M. Barnett, T. Wilson: *Image intensity at the edge of a straight edge object*. J. Mod. Opt. 37(12), 2017-2024 (1990)
- [9] M. Born, E. Wolf: *Principles of Optic*. Cambridge, New York, 7. Aufl. (2001)
- [10] I.N. Bronstein, K.A. Semedjajew, G. Musiol, H. Mühlig: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch, Frankfurt a. M. (1997)