

Bachelorarbeit

Messtechnische Analyse eines neuartigen Topographiesensors auf Basis der Weißlichtinterferometrie

Measurement based analysis of a new topographic sensor using white light interferometry

angefertigt von

Aline Leun

aus Langenhagen

am II. Physikalischen Institut

Arbeitsnummer: II.Physik-UniGö-BSc-2015/03

Bearbeitungszeit: 21. November 2014 bis 27. Februar 2015

Betreuer/in: Dr. Karsten Roetmann

Erstgutachter/in: Prof. Dr. Arnulf Quadt

Zweitgutachter/in: Priv.Doz. Dr. Jörn Große-Knetter

Sperrvermerk

Diese Bachelorarbeit unterliegt einer Geheimhaltungsvereinbarung, da sie Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse der Mahr GmbH beinhaltet. Daher erklärt sich die Mahr GmbH nicht damit einverstanden, dass diese Arbeit gemäß §§16 und 17 UrhG vervielfältigt oder an Dritte weitergegeben wird.

25. April 2015

Aline Leun

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Prinzip der Weißlichtinterferometrie	3
2.2. Objektive	5
2.3. Auswertung des Signals	6
2.3.1. Hüllkurvenauswertung	7
2.3.2. Phasenauswertung	8
2.4. Modi	8
2.5. Phasensprünge	10
3. Charakterisierungsmessungen	11
3.1. Aufbau	12
3.2. Vorgehen	15
3.2.1. Statistische Messungen	15
3.2.2. Messungen bei Schräglage	15
3.3. Methoden zur Auswertung	15
3.3.1. Ebenenabzug	15
3.3.2. Unwrapping	16
4. Ergebnisse	17
4.1. Statistische Untersuchungen der Topographie	17
4.2. Phänomene	23
4.2.1. Offset-Topographie	24
4.2.2. Ripples	27
4.2.3. Kleine Sprunggrenzen	30
4.2.4. Ringstruktur	32
4.2.5. Phasensprünge	32
4.2.6. Langwellige Struktur	39

Inhaltsverzeichnis

4.3. Größenordnungen	40
4.3.1. System 1 mit Mirau-Objektiv	40
4.3.2. System 2 mit Mirau-Objektiv	41
4.3.3. System 2 mit $20\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv	42
4.3.4. System 2 mit $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv	43
4.3.5. System 2 mit $10\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv	44
4.4. Einordnung der Ergebnisse	44
5. Schlussbetrachtungen	47
A. Datenblatt der Lichtquelle	49

1. Einleitung

Durch das Michelson-Morley-Experiment im Jahr 1887, mit dem die Relativbewegung des Äthers zur Erde nachgewiesen werden sollte [1], erlangte das verwendete Michelson-Interferometer weltweite Berühmtheit. Daraufhin entwickelten sich schnell neue Anwendungen: So nutzte Albert A. Michelson das Interferometer bereits 1895 zur Längenmessung des Prototyps des internationalen Urmeters [2].

Eine weitere historische Realisierung eines Interferometers ist das 1892 vom Physiker Ernst Mach entworfene Mach-Zehnder-Interferometer [3]. Mach verwendete es zur Untersuchung von Strömungen, indem er zum Beispiel eine Kerzenflamme in den einen Arm des Interferometers brachte. Auf diese Weise konnte abhängig vom Ort der Brechungsindex des Gases über der Flamme gemessen werden [4].

Seitdem hat sich das Gebiet der Interferometrie immer weiter entwickelt: Inzwischen existieren viele verschiedene Realisierungen von Interferometern sowie unterschiedliche Algorithmen zur Auswertung des entstehenden Signals, dem sogenannten „Interferogramm“. Erreicht wurde dies aufgrund zahlreicher technischer Fortschritte, wie zum Beispiel der Entwicklung leistungsstarker, schneller Computer. Noch Michelson selbst arbeitete an der Nutzung des Interferometers zur Prüfung von Linsen und Spiegeln, die zum Beispiel für Teleskope verwendet wurden [5] und auch heutzutage ist eines der wichtigsten Einsatzgebiete interferometrischer Messverfahren in der Industrie die Qualitätsprüfung von Werkstücken. Gegenüber taktilen Verfahren hat die Interferometrie den Vorteil, dass sie berührungslos ist. Besteht eine Probe aus einem weichen Material und kann gleichzeitig die zur taktilen Messung aufgebrachte Tastkraft nicht weiter verringert werden, so bietet sich ein optisches Verfahren an, um eine Beschädigung der Probe zu vermeiden. Bei Proben, die starke relative Höhenänderungen aufweisen, ist zudem die Verwendung einer breitbandigen Lichtquelle, dem sogenannten „Weißlicht“, vorteilhaft. Aufgrund der speziellen Form des resultierenden Interferogramms kann für jeden Punkt der Probe eindeutig der absolute Höhenwert bestimmt werden, auch wenn die relative Höhenänderung zwischen zwei Punkten groß ist [6].

Verwendet man einen Kamerachip, der ein zweidimensionales Bildfeld erzeugt, so erhält

1. Einleitung

man für jeden Bildpunkt einen Höhenwert und somit die Topographie, d. h. das dreidimensionale Höhenprofil einer Probe. Ein solcher Aufbau ist Ausgangspunkt dieser Arbeit mit der Besonderheit, dass der verwendete Topographiesensor eine sehr schnelle Auswertung durchführt und das System somit potenziell echtzeitfähig ist.

Im Rahmen der Arbeit sollen unterschiedliche Systeme charakterisiert werden, die sich aus dem erwähnten Topographiesensor und wechselbaren interferometrischen Objektiven zusammensetzen. Da bisher keine Angaben über die erzielbaren Genauigkeiten gemacht werden können, werden die jeweiligen Systeme auf Messfehler und deren Zusammensetzung überprüft. Zudem soll herausgearbeitet werden, unter welchen Bedingungen Fehler auftreten und wie diese korrigiert werden können.

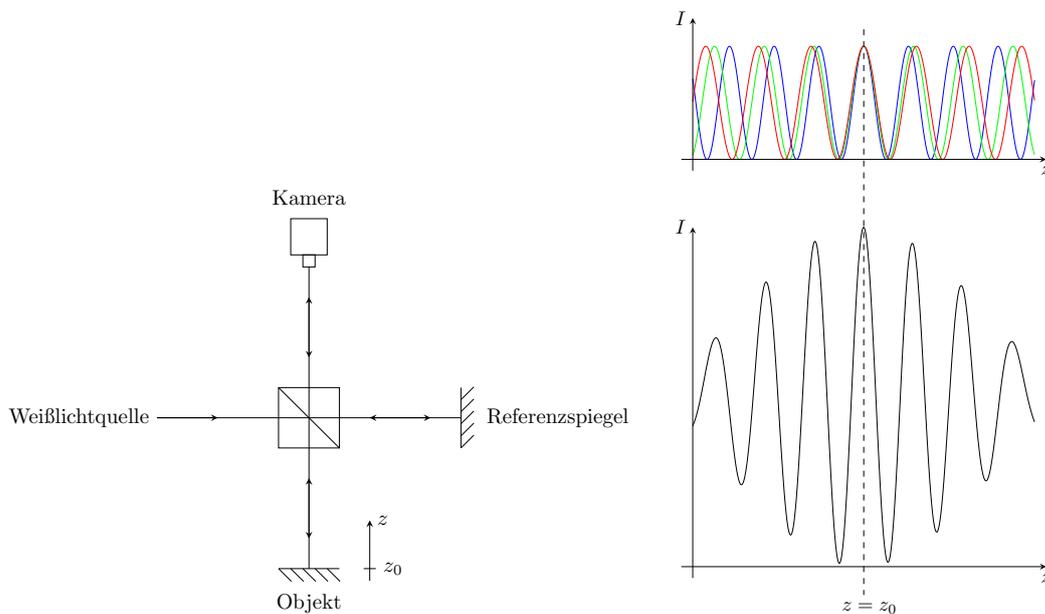
Weitere zu untersuchende Aspekte dabei sind unterschiedliche Methoden zur Auswertung des Signals und die Auswirkung verschiedener Achsen, mit deren Hilfe das Interferometer bewegt wird. Dieses Vorgehen soll schließlich eine Einordnung ermöglichen, die eine Aussage über die Messbarkeit einer bestimmten Probe erlaubt und zudem auch angibt, welche Parameterkombinationen sich zur Vermessung am besten eignen.

2. Grundlagen

2.1. Prinzip der Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie ist ein optisches Messverfahren, mit dem unter Ausnutzung von Interferenzeffekten das Höhenprofil einer Probe bestimmt werden kann. Zur Erläuterung der Grundlagen soll die Funktionsweise eines Michelson-Interferometers (siehe [7]) dargestellt werden, welches eine breitbandige Lichtquelle, auch Weißlicht genannt, verwendet [8].

Der schematische Aufbau eines Michelson-Interferometers ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Das einfallende Licht wird an einem halbdurchlässigen Spiegel in zwei Strahlengänge auf-



(a) Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers. (b) Interferogramm bei der Überlagerung unterschiedlicher Wellenlängenanteile im Weißlicht.

Abb. 2.1.: Funktionsprinzip eines Michelson-Interferometers mit Weißlichtquelle.

geteilt. Während der eine Strahl auf das Objekt trifft, wird der andere an einem Referenzspiegel reflektiert. Nach erneuter Reflexion bzw. Transmission am Spiegel treffen beide

2. Grundlagen

Strahlen wieder zusammen und interferieren. Wird das untersuchte Objekt in z -Richtung bewegt, so ändert sich je nach Weglängenunterschied Δs der beiden Strahlanteile die Amplitude des Interferenzsignals. Es entsteht ein sogenanntes Interferogramm, wie in Abbildung 2.1 (b) unten zu sehen. Eine Wellenlänge im Interferogramm, die sogenannte interferometrische Wellenlänge λ_i , entspricht der halben Wellenlänge λ des verwendeten Lichts, da der Gangunterschied zwischen den beiden Interferometerarmen zwei Mal durchlaufen wird.

Das Interferogramm zeigt die maximale Intensität, wenn sich das Objekt in der Interferenzebene bei $z = z_0$ befindet, was $\Delta s = 0$ entspricht. Wurde vorher eine bestimmte Position als Nullpunkt festgelegt, so kann hieraus die tatsächliche Höhe der Probe bestimmt werden. Bei Verschiebung der Probenoberfläche um Δz wird dementsprechend das gesamte Interferogramm auf der z -Achse um diesen Wert verschoben [9]. Die unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung des Maximums des Interferogramms werden im Abschnitt 2.3 genauer erläutert.

Die Einhüllende des Signals, auch Hüllkurve genannt, ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Sie beschreibt den gaußförmigen Verlauf der Amplituden und resultiert aus der zusätzlichen Überlagerung der im Weißlicht vorkommenden, unterschiedlichen Wellenlängenanteile, was in Abbildung 2.1 (b) dargestellt ist. Eine wichtige Größe in diesem Zusammenhang ist die Kohärenzlänge l_c : Sie gibt an, welchen Laufzeitunterschied die einzelnen Wellenzüge maximal haben dürfen, um noch ein stabiles Interferenzsignal zu bilden. Es gilt

$$l_c = c \cdot \frac{1}{\Delta\nu} \quad (2.1)$$

mit der spektralen Frequenzbreite des Lichts $\Delta\nu$ und Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [10]. Die Kohärenzlänge entspricht der Breite des Interferogramms, wenn die Summe aller Teilwellen auf $1/e$ der Anfangsamplitude bei z_0 abgeklungen ist und bestimmt somit den charakteristischen Verlauf in Abbildung 2.2 [10]. Gerade wegen der kurzkohärenten Eigenschaften des verwendeten Lichts bietet die Weißlichtinterferometrie einen Vorteil gegenüber konventioneller längenmessender Interferometrie. Aus dem entstehenden Interferogramm kann mithilfe des Maximums der Hüllkurve eindeutig das richtige Phasenmaximum und somit der zugehörige Höhenwert der Probe in Bezug auf den Nullpunkt des Systems bestimmt werden. Diese Eindeutigkeit ist bei Verwendung einer monochromatischen Lichtquelle aufgrund des periodischen Verlaufs der Amplitude nicht gegeben. Verschiebt sich das Signal zwischen zwei Messpunkten auf der Probe um mehr als eine Wellenlänge im Interferogramm, so kann der Bezug zwischen den beiden zugehörigen Höhenwerten nicht mehr bestimmt werden [6]. Grund für eine derartige Verschiebung kann

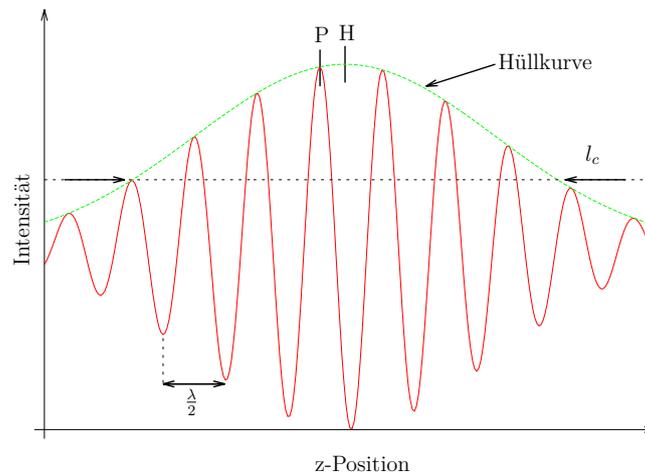


Abb. 2.2.: Interferogramm mit eingezeichneter Hüllkurve, Kohärenzlänge l_c und interferometrischer Wellenlänge $\lambda_i = \frac{\lambda}{2}$. Das Maximum der Hüllkurve ist durch H gekennzeichnet, das nächstgelegene Phasenmaximum durch P.

eine unstetige Höhenänderung auf der Probenoberfläche sein.

2.2. Objektive

Zur Untersuchung kleiner Bildfelder der Probe bietet es sich an, mikroskopische Objektive zu verwenden. Das Interferometer muss dabei in den Bereich des Objektivs verlegt werden, um dispersive Effekte bei Verwendung einer Weißlichtquelle zu minimieren.

Im Verlauf dieser Arbeit wurden Untersuchungen mit Mirau-Objektiven und Michelson-Objektiven durchgeführt, deren schematischer Aufbau in Abbildung 2.3 zu finden ist. Zwar unterscheiden sich die beiden Objektive in der Anordnung der optischen Komponenten, jedoch ist das generelle Funktionsprinzip gleich. In beiden Fällen wird das einfallende Licht an einem halbdurchlässigen Spiegel in Objekt- und Referenzstrahl aufgeteilt. Nach Reflexion am Objekt bzw. Spiegel treffen beide Strahlteile wieder zusammen und interferieren.

Das Mirau-Objektiv wird gegenüber dem Michelson-Objektiv für kleinere Bildfelder bevorzugt, da bei starken Vergrößerungen der Arbeitsabstand nicht mehr ausreichend ist, um einen Strahlteiler zwischen Abbildungsoptik und Probe zu platzieren [11]. Für die Erreichung großer Bildfelder ist die Bauweise des Mirau-Objektivs jedoch nicht geeignet, da in diesem Fall auch der Referenzspiegel entsprechend groß sein müsste und sich dieser an der Unterseite der Abbildungsoptik befindet. Überschreitet der Referenzspiegel eine gewisse Größe, so treten Abschattungseffekte auf.

2. Grundlagen

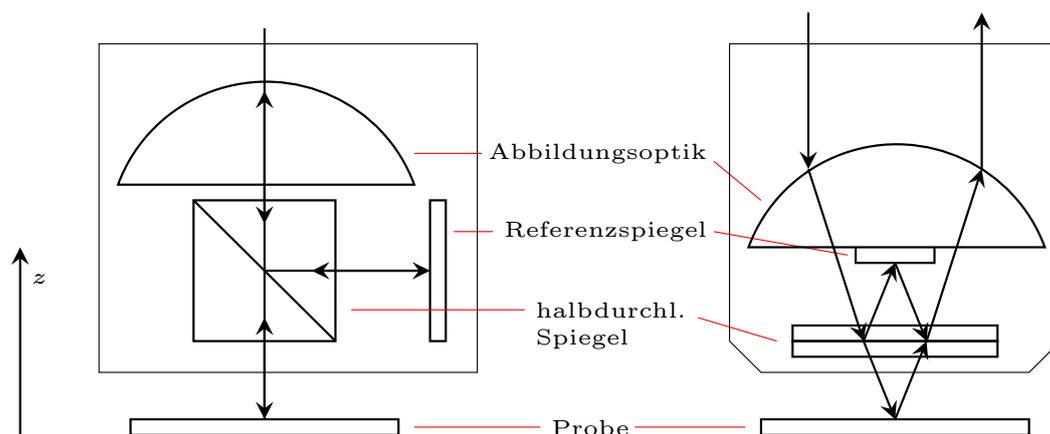


Abb. 2.3.: Schematischer Aufbau eines Michelson-Objektivs (links) und eines Mirau-Objektivs (rechts) im Vergleich.

Da das Mirau-Objektiv demnach für kleinere Bildfelder und somit für starke Vergrößerungen genutzt wird, weist es im Vergleich zum Michelson-Objektiv eine größere numerische Apertur auf. Ein weiterer Vorteil des Mirau-Objektivs ist, dass Objekt- und Referenzstrahl im allgemeinen Fall die gleichen optischen Elemente passieren, was zu einer geringeren Fehleranfälligkeit in Bezug auf die Justage führt.

Bei den verwendeten interferometrischen Objektiven fällt nach Konstruktion die Fokusebene mit der Interferenzebene zusammen [12].

Im Allgemeinen werden große Arbeitsabstände für die Objektive bevorzugt [11], da so eine Kollision mit der Probenoberfläche leichter vermieden werden kann.

2.3. Auswertung des Signals

Ein Interferogramm, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, erhält man für jedes Pixel der Kamera, wenn sich das Interferometer in z -Richtung bewegt. Um die Höhe der Probe an einem Punkt zu bestimmen, muss das Maximum des Interferogramms gefunden werden. Zur Auswertung des Signals stehen zwei Methoden zur Verfügung: Die Hüllkurvenauswertung und die Phasenauswertung. Dabei baut letztere auf dem Ergebnis der Hüllkurvenauswertung auf und liefert einen noch genaueren Wert für die Höhe der Probe.

Vor diesen beiden nachfolgend beschriebenen Methoden findet bereits der erste Schritt der Auswertung statt: Für eine Reduktion der Daten werden durch einen Hochpassfilter Bereiche abgeschnitten, in denen kein Nutzsignal vorliegt, sodass nur das eigentliche Interferogramm übrig bleibt. Hierdurch kann die Geschwindigkeit der anschließenden Aus-

wertung erhöht werden.

2.3.1. Hüllkurvenauswertung

Eine einfache Möglichkeit den gesuchten Höhenwert zu erhalten ist die Berechnung der zugehörigen Hüllkurve und die anschließende Bestimmung ihres Maximums.

Das zu Beginn der Auswertung vorliegende Interferenzsignal

$$A(t) = A_{DC} + A_m(t) \cdot \sin(\omega t + \delta)$$

setzt sich aus dem konstanten Gleichspannunganteil A_{DC} , der Einhüllenden $A_m(t)$ und dem schnell oszillierenden Anteil $\sin(\omega t + \delta)$, der die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und die Phase δ aufweist, zusammen. Die für die Hüllkurvenauswertung relevante Größe ist demnach die Einhüllende $A_m(t)$, zu deren Bestimmung die Werte I und Q berechnet werden. Diese sind durch eine Integration über n_c Perioden des Signals, multipliziert mit einer Sinus- bzw. Kosinusfunktion, definiert:

$$I(T) := \int_T^{T+n_c \frac{2\pi}{\omega}} A(t) \sin(\omega t) dt$$

$$Q(T) := \int_T^{T+n_c \frac{2\pi}{\omega}} A(t) \cos(\omega t) dt.$$

Die Funktionen $\sin(\omega t)$ und $\cos(\omega t)$ stellen dabei das Demodulationssignal mit der Frequenz $f_d = \frac{\omega}{2\pi}$ dar. Nach Ausführung der Integration ergibt sich für $I(T)$ und $Q(T)$:

$$I(T) = A_m(T) \frac{n_c}{\omega} \cos(\delta) \pi \tag{2.2}$$

$$Q(T) = A_m(T) \frac{n_c}{\omega} \sin(\delta) \pi. \tag{2.3}$$

Durch Quadrieren und anschließendes Addieren der Gleichungen 2.2 und 2.3 erhält man

$$A_m(T) = \frac{\omega}{\pi n_c} \sqrt{I(T)^2 + Q(T)^2}.$$

und kann somit aus den Werten $I(T)$ und $Q(T)$ die Einhüllende $A_m(T)$ bestimmen.

In der Praxis wird das Interferenzsignal von einem lokalen Oszillator multipliziert und über eine vorgegebene Anzahl von n_c Perioden integriert. Zur Vereinfachung und Beschleunigung dieser Berechnung, die für jeden Bildpunkt durchgeführt werden muss, wer-

2. Grundlagen

den $\sin(\omega t)$ bzw. $\cos(\omega t)$ durch einfache Stufenfunktionen ersetzt. Dieser Vorgang findet bereits auf der Analog-Elektronik des Kamerachips statt, wodurch die gesamte Auswertung sehr schnell ist.

Zur geeigneten Berechnung der Hüllkurve des Interferogramms müssen pro Periode vier Schaltzeitpunkte, im Folgenden *time quarter period* (TQP) genannt, eingehalten werden. Jede Integration über n_c Perioden liefert dann eine Stützstelle der Hüllkurve, deren Maximum anschließend bestimmt wird. Hierbei ist nicht die Höhe des Maximums, sondern die Lage des z -Wertes entscheidend. Diese entspricht dem gesuchten Höhenwert der Probe für einen Bildpunkt [13].

2.3.2. Phasenauswertung

Noch genauer wird die Auswertung, wenn man nicht nur das Maximum der Hüllkurve bestimmt, sondern die z -Position des dem Hüllkurvenmaximum nächstgelegenen Phasenmaximums (siehe Abb. 2.2). Teilt man Gleichung 2.3 durch Gleichung 2.2, so kann aus den Werten $I(T)$ und $Q(T)$ die Phase $\delta(T)$ bestimmt werden über [13]:

$$\delta(T) = \arctan\left(\frac{Q(T)}{I(T)}\right).$$

Mit dieser Information und dem zuvor berechneten Maximum der Hüllkurve kann die exakte Position des gesuchten Phasenmaximums berechnet werden. Der zugehörige z -Wert entspricht erneut dem Höhenwert der Probe am betrachteten Punkt. Durch diese Kombination von Hüllkurven- und Phasendaten erhält man ein Verfahren, welches die Genauigkeit der Phase und die Eindeutigkeit der Hüllkurve vereint.

2.4. Modi

Wie bereits erwähnt müssen pro Periode vier Schaltzeitpunkte exakt vorgegeben werden, damit die beschriebenen Berechnungen hinreichend genau sind. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Motors spielt in diesem Zusammenhang eine Rolle, da sie das Aussehen des Interferogramms entscheidend bestimmt. Daher müssen Geschwindigkeit sowie mögliche Abweichungen bei der Erfassung der TQP's berücksichtigt werden [12].

Konstante Geschwindigkeit

Nimmt man an, dass die Achse mit konstanter Geschwindigkeit verfährt, so können die TQP's in äquidistanten Zeitschritten ΔT aufgenommen werden. Dies ist in Abbildung 2.4

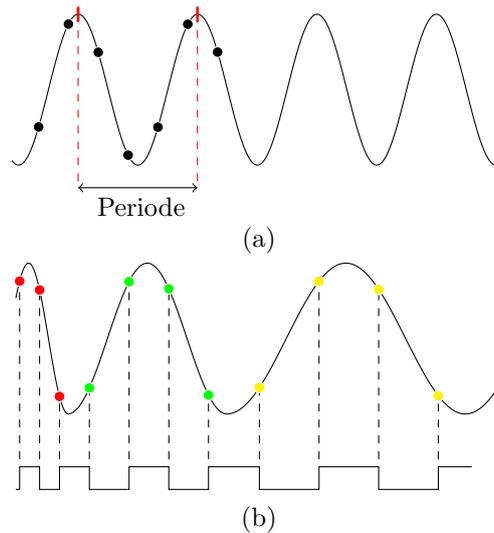


Abb. 2.4.: Veranschaulichung der TQP's für die Modi EXTTQP und konstante Geschwindigkeit.

(a) zu sehen. Für die Frequenz f_d des Demodulationssignals gilt in diesem Fall [12]:

$$f_d = \frac{1}{4\Delta T}.$$

In diesem Modus werden demnach Abweichungen von der vorgegebenen Geschwindigkeit nicht berücksichtigt.

EXTTQP

Verfährt die Achse des Interferometers nicht mit konstanter Geschwindigkeit, so ergibt sich ein Signal, wie es in Abbildung 2.4 (b) zu sehen ist. Eine äquidistante Aufnahme der TQP's würde in diesem Fall zu einer falschen Auswertung führen. Dies kann vermieden werden, indem die TQP's mithilfe eines externen Signals (Rechteckspannung) vorgegeben werden, wie es auch im unteren Teil von Abbildung 2.4 zu sehen ist [12]. Die externe Vorgabe der TQP's erklärt den Namen EXTTQP-Modus. Die Generierung der Rechteckspannung erfolgt über den Maßstab der Achse: Mithilfe der zurückgelegten Strecke und der benötigten Zeit kann die aktuelle Geschwindigkeit berechnet werden.

Dieser Modus ist theoretisch genauer als der Modus konstante Geschwindigkeit, da er auf Änderungen in der Geschwindigkeit reagieren kann. In der Praxis wird die Achse nie komplett gleichförmig verfahren und bei starken Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit müsste somit der EXTTQP-Modus überlegen sein.

2.5. Phasensprünge

In der Phasenauswertung kommt es unter bestimmten Umständen zu einem charakteristischen Fehler, den sogenannten Phasensprüngen. Auf dieses Phänomen wird in Abschnitt 4.2.5 ausführlich eingegangen, die theoretischen Grundlagen sollen jedoch vorab erklärt werden.

Bei Verwendung der Phasenauswertung wird, wie bereits beschrieben, das Phasenmaximum des schnell oszillierenden Interferogramms bestimmt, welches dem Hüllkurvenmaximum am nächsten liegt. Hat das Interferogramm die Form wie in Abbildung 2.5 dargestellt, so sind zwei Phasenmaxima gleichberechtigt, die genau eine interferometrische Wellenlänge unterscheidet. In diesem Fall würde in der Auswertung statistisch verteilt mal das eine und dann das andere Phasenmaximum ausgewählt. In der Topographie macht

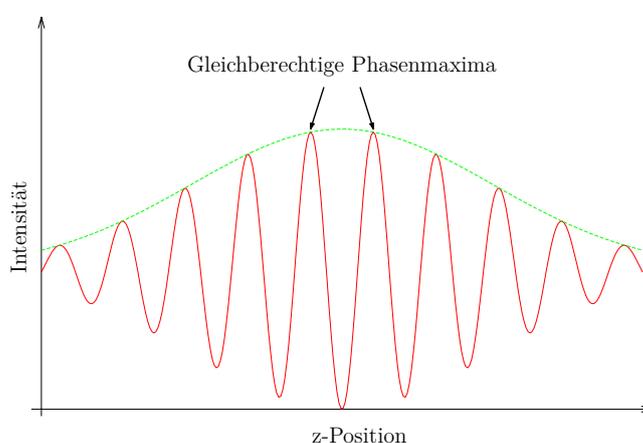


Abb. 2.5.: Interferogramm mit zwei gleichberechtigten Phasenmaxima.

sich dies durch abrupte Sprünge bemerkbar, die sich genau um diese Höhe, d. h. um eine interferometrische Wellenlänge von der zugrundeliegenden Ebene unterscheiden.

Bei guten Signalbedingungen handelt es sich im beschriebenen Fall um eine systematische Differenz zwischen Hüllkurven- und Phasenmaximum, die im Folgenden als Phasenoffset bezeichnet wird. Liegt jedoch zum Beispiel ein schwaches Signal in einigen Bereichen des Bildfeldes vor, so ist die zugehörige Hüllkurve stark abgeflacht, was ebenfalls dazu führt, dass die richtige Phase nur schwer bestimmt werden kann.

Durch die exakte Höhe der Phasensprünge können diese nachträglich durch einen Algorithmus korrigiert werden, der im Abschnitt 3.3.2 erläutert wird.

3. Charakterisierungsmessungen

Ausgangspunkt der Messungen in dieser Arbeit ist ein WLI in unterschiedlichen Ausführungen, dessen Messgenauigkeit unbekannt ist. Soll dieses System verwendet werden, um Messungen zum Beispiel an unbekanntem Proben oder auch an Werkstücken, die eine bestimmte Toleranz einhalten sollen, durchzuführen, so muss der vom System verursachte Fehler bekannt sein. Dies bedeutet auch, eine Eingrenzung vornehmen zu können: In welchen Fällen treten Fehler auf, wann führen sie dazu, dass ein Objekt nicht mehr vermessen werden kann und wo liegen somit die Grenzen des Systems?

Zudem muss untersucht werden, ob einzelne Fehler einer Systematik unterliegen oder ob sie zufällig, d. h. statistisch verteilt auftreten. Die Vorgehensweise bei der Untersuchung der Systeme teilt sich daher in zwei Schritte:

Statistische Untersuchungen Im ersten Schritt soll untersucht werden, welchen Schwankungen die einzelnen Messgrößen, vor allem die Topographie, von Messung zu Messung unterliegen, wenn dabei stets die gleichen Bedingungen gelten. Die Ergebnisse hierzu sind in Abschnitt 4.1 dargestellt.

Systematische Untersuchungen Im zweiten Schritt wird untersucht, welche Phänomene im einzelnen Bild konstant auftreten. Es soll vor allem herausgearbeitet werden, von welchen Bedingungen das Auftreten abhängt und was die Ursachen dafür sein könnten. Anschließend stellt sich die Frage, ob einzelne Phänomene behoben oder nachträglich korrigiert werden können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 4.2 beschrieben.

In diesem Kapitel sollen die verwendeten Systeme und experimentellen Methoden zur Durchführung der Charakterisierungsmessungen erläutert werden.

3.1. Aufbau

Der schematische Aufbau aller verwendeten Systeme ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Jedes Interferometer besteht aus einer Kamera und einem wechselbaren Objektiv, die an einer Achse angebracht sind. Die Kamera setzt sich im Wesentlichen aus dem Kamerachip und einem nachgeschalteten Field Programmable Gate Array (FPGA) zusammen. Vom FPGA gelangen die Topographiedaten zum angeschlossenen Computer und können dort aufgrund der schnellen Auswertung direkt im Anschluss an die Messung graphisch dargestellt werden. Zudem ist in der Kamera eine LED integriert, die als Lichtquelle dient.

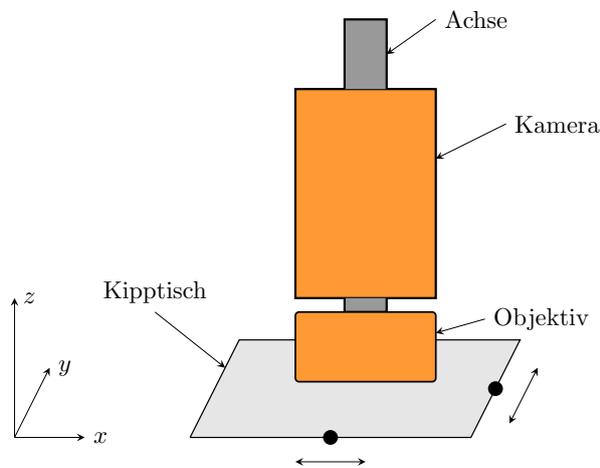


Abb. 3.1.: Darstellung des schematischen Aufbaus der Systeme.

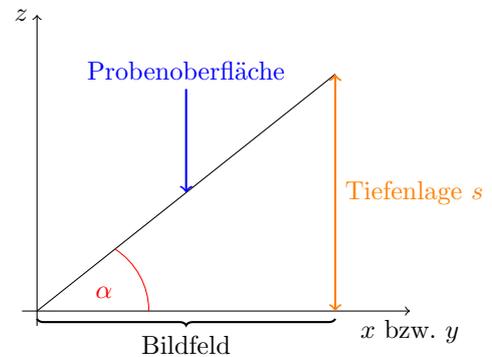


Abb. 3.2.: Definition von Tiefenlage s und Winkel α bei Schräglage.

Die mittlere Wellenlänge beträgt laut Datenblatt des Herstellers 632 nm, die spektrale Bandbreite 18 nm (siehe Anhang A). Aufgrund der Übertragungsfunktion der Optik wurde jedoch eine mittlere Wellenlänge von 652 nm für die Auswertung der Messungen angenommen.

Unter dem Interferometer befindet sich ein Tisch, der vier Freiheitsgrade bietet: Zum einen lässt sich eine Verschiebung in x - bzw. y -Richtung realisieren, zum anderen kann der Tisch mithilfe von zwei Schrauben entlang der x - bzw. y - Achse schräg gestellt werden. Die im Folgenden häufig verwendeten Größen Tiefenlage s und Winkel α sind dabei wie in Abbildung 3.2 dargestellt definiert.

Insgesamt wurden drei unterschiedliche Aufbauten verwendet, die in Abbildung 3.3 zu sehen sind und im Folgenden kurz beschrieben werden.



(a) System 1 mit Tauchspulenmotor und Mirau-Objektiv.



(b) System 2 mit Linearachse und wechselbarem Objektiv.



(c) System 3 mit Tauchspulenmotor und wechselbarem Objektiv.

Abb. 3.3.: Fotos der verschiedenen Systeme.

System 1 Beim ersten System befindet sich zwischen Kamera und Objektiv ein Tubus. In diesem Fall kann nur mit dem Mirau-Objektiv gearbeitet werden. Zur Ausführung eines Scanvorgangs in z -Richtung ist das Objektiv an einem von der Firma Mahr entwickelten Tauchspulenmotor befestigt und somit beweglich. Der Tauchspulenmotor wurde für ein sehr gleichmäßiges Verfahren der Achse konzipiert und es sind die beiden Modi EXTTQP und konstante Geschwindigkeit verfügbar. Das Bildfeld ist bei System 1 gegenüber den anderen Systemen gedreht, da der Kamerachip hier um 90° gedreht vorliegt.

System 2 Beim zweiten System kann das Objektiv durch ein einfaches Magnetsystem ausgewechselt werden. Zudem ist hier, im Gegensatz zu System 1, das gesamte WLI an einer Linearachse befestigt und somit beweglich. Dies hat den Vorteil, dass weniger leicht Schmutz in den Strahlengang gelangen kann, allerdings muss die Achse dafür mehr Gewicht tragen, was sich auf die Gleichmäßigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit auswirken kann. Die verwendete Linearachse kann nur im Modus konstante Geschwindigkeit betrieben werden.

3. Charakterisierungsmessungen

System 3 Das dritte System ist eine Kombination aus den beiden vorangegangenen: Es verwendet das Interferometer, d.h. Kamera und wechselbares Objektiv von System 2, jedoch als Antrieb den Tauchspulenmotor von System 1. Aus diesem Grund ist die Optik mit System 2 identisch. Für den Tauchspulenmotor stehen erneut die beiden Modi EXTTQP und konstante Geschwindigkeit zur Verfügung. Da der Tauchspulenmotor das Gewicht des ganzen Interferometers nicht tragen kann, ist nur das Objektiv beweglich.

Alle drei Systeme verwenden die gleiche Lichtquelle. Zusätzlich zu den drei beschriebenen Systemen wurde für einige Messungen ein weiteres System verwendet, dessen Aufbau jedoch mit dem von System 2 übereinstimmt. Daher wurden die dort erhaltenen Ergebnisse dem System 2 zugeordnet.

Es wurden Charakterisierungsmessungen mit vier unterschiedlichen Objektiven durchgeführt. Hierbei handelt es sich um drei Michelson-Objektive und ein Mirau-Objektiv,

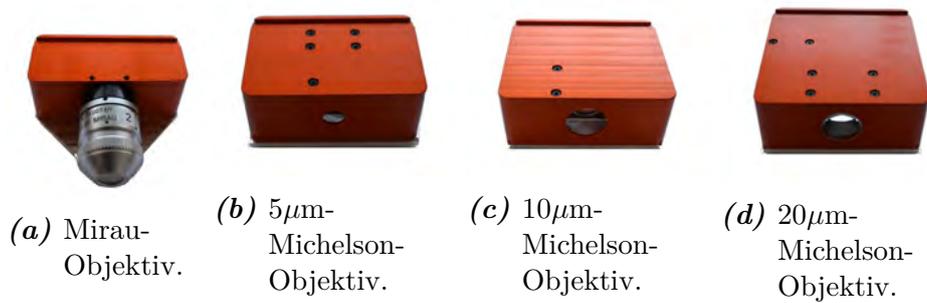


Abb. 3.4.: Fotos der verwendeten Objektive.

deren Eigenschaften in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind. Zudem sind Fotos der Objekti-

Bezeichnung	Vergrößerung	Bildfeld [mm ²]	Arbeitsabstand [mm]	Besonderheiten
Mirau-Objektiv	20-fach	0,562 x 0,586	3,57	
5 μ m-Michelson-Objektiv	10-fach	1,405 x 1,465	14,1	
10 μ m-Michelson-Objektiv	5-fach	2,81 x 2,93	55,8	gewölbter Referenzspiegel
20 μ m-Michelson-Objektiv	2,5-fach	5,62 x 5,86	56,6	

Tab. 3.1.: Übersicht der Eigenschaften der verwendeten Objektive.

ve in Abbildung 3.4 zu sehen. Eine wichtige Besonderheit stellt der im 10 μ m-Michelson-Objektiv verbaute gewölbte Referenzspiegel dar. Dieser bedingt einige Konsequenzen für die Messung, auf die im Abschnitt 4.3.5 noch genauer eingegangen wird.

3.2. Vorgehen

In diesem Abschnitt sollen Abläufe beschrieben werden, die bei vielen Messungen durchgeführt wurden. Im Allgemeinen sollten alle Optiken sowie die Probe vor Beginn der Messungen gereinigt werden.

3.2.1. Statistische Messungen

Zur Untersuchung von statistischen Fehlern der Topographie wurde als Probe stets ein Planglas verwendet. Mithilfe des Kipptisches wurde dieses so ausgerichtet, dass in der Topographie keine Schräglage mehr vorlag. Anschließend wurden 100 Messungen direkt hintereinander aufgenommen, ohne dabei Parameter des Systems zu verändern. Hierbei wurden die Topographiedaten von Hüllkurven- und Phasenauswertung gespeichert.

3.2.2. Messungen bei Schräglage

Die meisten systematischen Fehler des Systems treten bei Schräglage auf. Zur genaueren Untersuchung wurde daher die Probe zunächst mithilfe des Kipptisches gerade ausgerichtet. Anschließend wurde der Tiefenlage entlang einer Achse des Tisches systematisch erhöht. Es wurden jeweils 10 Messungen mit Tiefenlagen von $s \approx 0\mu\text{m}$ bis $s \approx 4\mu\text{m}$ aufgenommen. In Einzelfällen wurden auch höhere Schräglagen realisiert.

3.3. Methoden zur Auswertung

3.3.1. Ebenenabzug

Bei Untersuchungen unter Schräglage ist es für eine plane Probe sinnvoll, die Schrägstellung der Topographie nachträglich durch einen Ebenenabzug herauszurechnen. Dadurch kommen kleinere Strukturen zum Vorschein, die für die vorgenommenen Untersuchungen von Interesse waren. Mithilfe eines Python-Programmes wird an die Messdaten eine Ebene der Form $E(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c$ eingepasst. Die verwendete Methode der kleinsten Quadrate wurde dabei aus einem bereits bestehenden Programm übernommen. Da die Schrägstellung des Tisches nicht an den zugehörigen Schrauben abgelesen werden kann, dient dieses Verfahren auch zur nachträglichen Bestimmung von Tiefenlage und Winkel, indem man sich nach der Einpassung die Parameter a bzw. b ausgeben lässt. Liegt zum Beispiel eine Schrägstellung entlang der x-Achse vor, so können über $s = a \cdot x$ und $\alpha = \arctan(a)$ die gesuchten Größen bestimmt werden, da die Größe des Bildfeldes in

3. Charakterisierungsmessungen

x-Richtung bekannt ist (siehe Tabelle 3.1). Bei einer Schrägstellung in y-Richtung geht man analog vor.

3.3.2. Unwrapping

Durch die exakt definierte Höhe der Phasensprünge ist es möglich, sie im Nachhinein durch einen Algorithmus zu korrigieren. Dieser beginnt bei einem zufällig ausgewählten Pixel, dem sogenannten „seed pixel“ und überprüft von dort aus, ob die Nachbapixel um $\frac{\lambda}{2}$ höher liegen. Ist dies bei einem der Pixel der Fall, so wird der zugehörige Höhenwert um $\frac{\lambda}{2}$ verschoben. Bei einer planen Probe liegen somit nach dem Unwrapping alle Höhenwerte in der selben Phase.

Da die Entwicklung des Unwrapping-Algorithmus nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Genauere Beschreibungen finden sich beispielsweise in [14], [15].

Dieses Korrekturverfahren funktioniert sehr gut bei glatten Proben, wenn nur wenige Phasensprünge auftreten. Aufgrund der Ebenheit ist es kaum möglich, dass zufällig ein Höhenunterschied auftritt, der die Höhe der interferometrischen Wellenlänge aufweist. Durch die wenigen Phasensprünge ist es zudem unwahrscheinlich, dass ein Pixel mit einem Phasensprung als seed pixel ausgewählt wird und somit fälschlicherweise die ganze Ebene um $\frac{\lambda}{2}$ verschoben wird. In diesem Fall würde gerade ein Vorteil der Weißlichtinterferometrie, nämlich die Eindeutigkeit der Höhenwerte, verloren gehen.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der in Kapitel 3 beschriebenen Messungen sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

4.1. Statistische Untersuchungen der Topographie

Zur Abschätzung der statistischen Messabweichung des Systems wurden Messreihen mit einer hohen Zahl wiederholter Einzelmessungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgten diese Untersuchungen mit dem Mirau-Objektiv und dem $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv an den Systemen 2 und 3.

Hierzu wurden, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, aus 100 Einzelmessungen jeweils für die mit Hüllkurven- und Phasenauswertung erhaltene Topographie Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung σ über

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

berechnet. Dies muss für jeden Bildpunkt durchgeführt werden. Man erhält somit ein dreidimensionales Ergebnis, bei dem in x - bzw. y -Richtung die Größe des Bildfeldes, in z -Richtung der zugehörige Mittelwert bzw. die zugehörige Standardabweichung aufgetragen sind. Die Darstellung wurde mithilfe einer Falschfarbenskala realisiert und ist exemplarisch für das System 2 mit $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv und Phasenauswertung in Abbildung 4.1 zu sehen. Mittelwert und Standardabweichung der zugehörigen Amplitude sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Größe des Bildfeldes auf der x - bzw. y -Achse in Millimetern angegeben ist, die Größen auf der z -Achse im Allgemeinen in Mikrometern. Für die Amplitude ist auf der z -Achse keine Einheit angegeben, da der Absolutwert nicht aussagekräftig ist. Lediglich der Vergleich unterschiedlicher Bereiche in einem Bild ist hier sinnvoll.

4. Ergebnisse

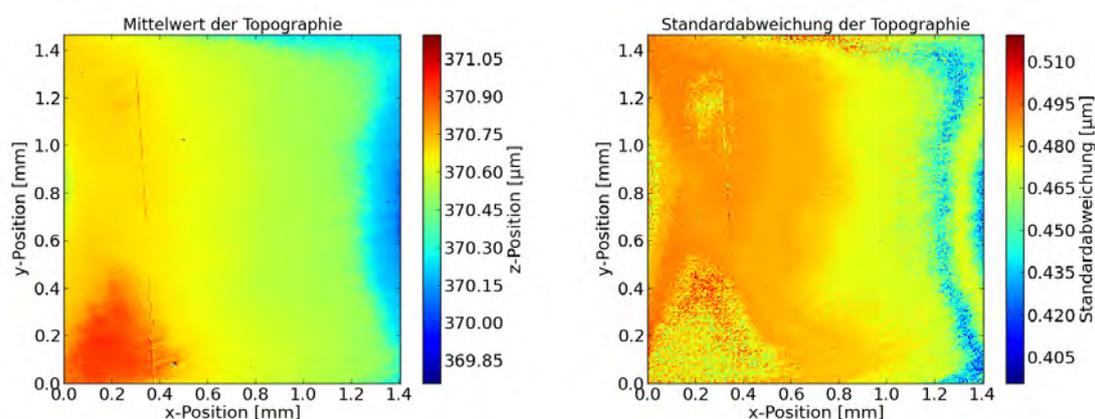


Abb. 4.1.: Mittelwert (links) und Standardabweichung (rechts) der Topographie aus einer Messreihe mit 100 Einzelmessungen.
Messbedingungen: System 2, $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung.

Betrachtet man die mittlere Topographie, so fällt auf, dass diese zwar glatte Übergänge zeigt, sich einzelne Bereiche jedoch um mindestens $0,5\ \mu\text{m}$ voneinander unterscheiden, obwohl ein gerade ausgerichtetes Planglas als Probe verwendet wurde. Im rechten Teil

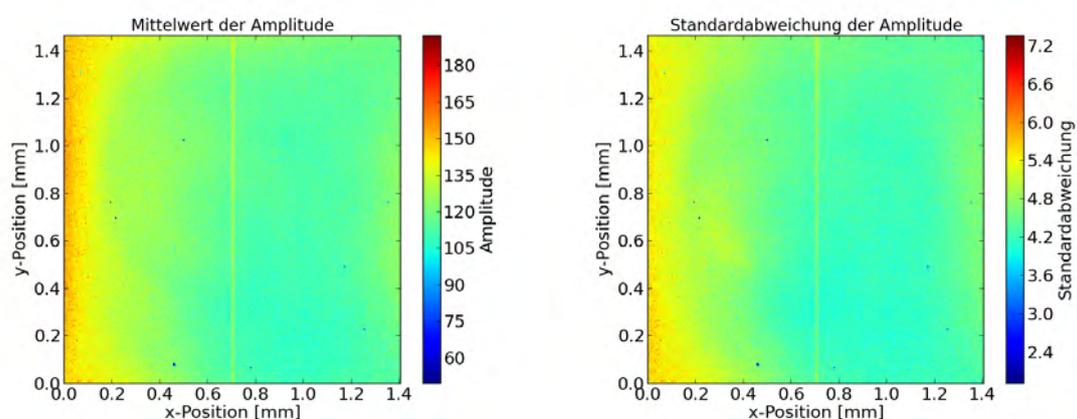


Abb. 4.2.: Mittelwert (links) und Standardabweichung (rechts) der Amplitude aus einer Messreihe mit 100 Einzelmessungen.
Messbedingungen: System 2, $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung.

von Abbildung 4.1 wurde für jeden Bildpunkt die Standardabweichung auf der z -Achse aufgetragen. Hier fällt zunächst auf, dass diese mit knapp $0,5\ \mu\text{m}$ im Allgemeinen sehr hoch liegt. Dies würde bedeuten, dass die absoluten Messwerte nur im Rahmen dieser geringen Genauigkeit reproduzierbar wären. Zudem ist die Standardabweichung über das Bildfeld nicht gleichmäßig hoch, was an einer Überlagerung mit einem systematischen

4.1. Statistische Untersuchungen der Topographie

Fehler, den Phasensprüngen, liegt, auf den in Kapitel 4.2 genauer eingegangen wird. Wichtig für die weitere statistische Auswertung war es deshalb, einen Bildpunkt aus einem Bereich auszuwählen, der eine geringe Standardabweichung aufweist. Für diesen manuell bestimmten Bildpunkt wurde dann die zeitliche Änderung der Höhenwerte der Topographie über die Messreihe dargestellt. Da die Einzelmessungen fortlaufend in einem Zeitraum von insgesamt ca. 10 Minuten aufgenommen wurden, entspricht dies der zeitlichen Schwankung der Topographie.

Die Ergebnisse für alle Systeme, Antriebsarten und Objektive sind in Abbildung 4.3 zu sehen. Auf der x -Achse ist jeweils die Nummer des Bildes, auf der y -Achse der zugehörige Höhenwert in Mikrometern aufgetragen. Die Skalierung ist dabei für jedes Bild gleich gewählt, sodass relative Veränderungen der erhaltenen Kurven direkt vergleichbar sind. Zudem sind für jeden der betrachteten Fälle die aus Hüllkurven- und Phasenauswertung erhaltenen Daten zusammen dargestellt.

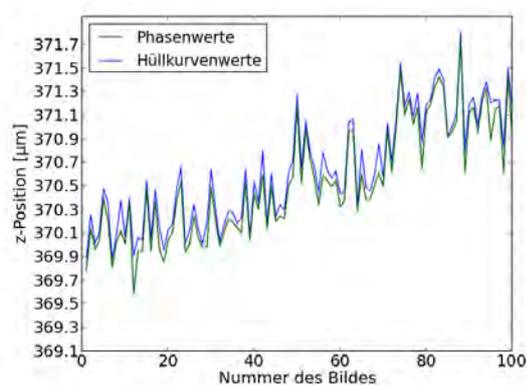
Die Daten in Abbildung 4.3a gehören zu einem ausgewählten Bildpunkt aus der erläuterten Topographie in Abbildung 4.1. Es ist eine Überlagerung von zwei Effekten erkennbar. Zum einen schwankt die Topographie um einen Mittelwert, zum anderen scheint dieser zu „driften“ d. h. er verschiebt sich mit der Zeit zu höheren Werten. Diese Drift scheint damit die Ursache der hohen Standardabweichung in Abbildung 4.1 zu sein.

Betrachtet man allein die Schwankungen, so liegen diese für System 2 und 3 im Modus konstanter Geschwindigkeit für beide Objektive in einer ähnlichen Größenordnung, was in den Abbildungen 4.3a - 4.3d zu sehen ist. Lediglich im EXTTQP-Modus von System 3 ist ein deutlicher Unterschied erkennbar: Die Topographie schwankt kaum, abgesehen von einzelnen starken Ausreißern beim $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv in Abbildung 4.3e.

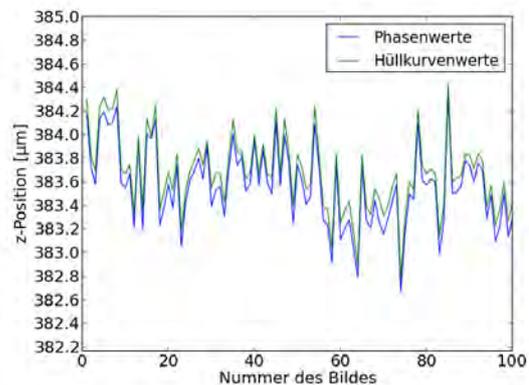
Der verwendete Antrieb sowie der genutzte Modus scheinen demnach einen Einfluss auf die beobachteten Schwankungen zu haben. Da der in System 3 verwendete Tauchspulenmotor für ein möglichst gleichmäßiges Verfahren der Achse konstruiert wurde, lassen die Beobachtungen vermuten, dass die Schwankungen der Topographie aus Unregelmäßigkeiten der Verfahrgeschwindigkeit resultieren. Der EXTTQP-Modus liefert das beste Ergebnis, was dazu passt, dass hier nicht von einer konstanten Geschwindigkeit ausgegangen wird und diese Art der Messwertaufnahme zu den genauesten Ergebnissen führen müsste (vgl. Kapitel 2.4).

Die starken Ausreißer beim EXTTQP-Modus für das $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv finden sich auch in der zugehörigen Amplitude (siehe Abbildung 4.4) wieder, weshalb eine schlechte Signalbedingung der Grund für einen fehlerhaften Höhenwert an diesen Punkten zu sein

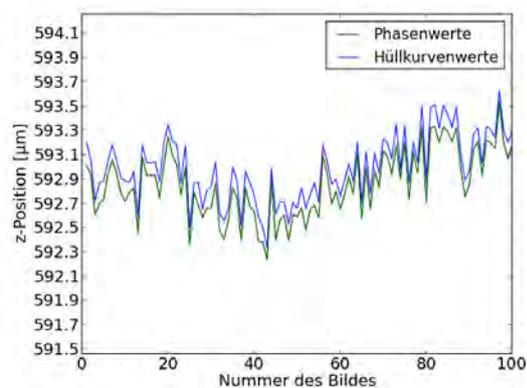
4. Ergebnisse



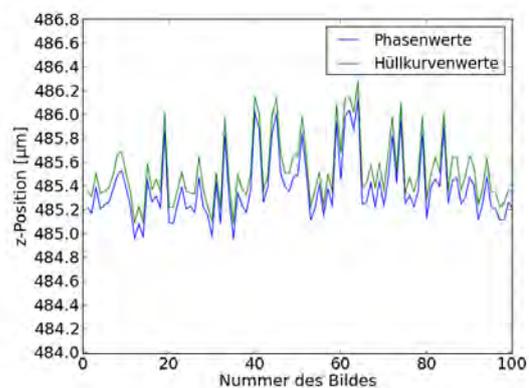
(a)



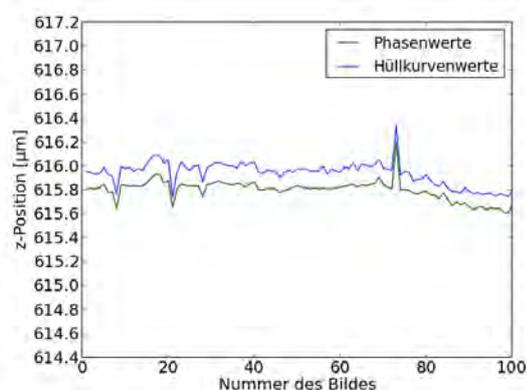
(b)



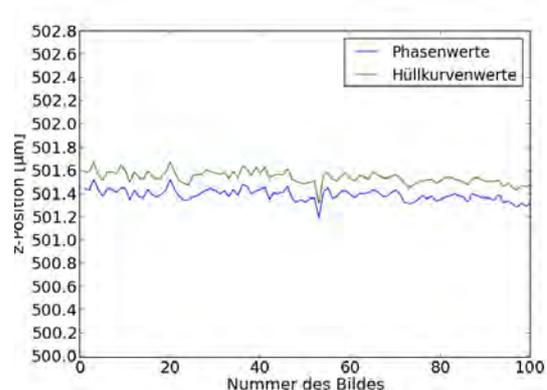
(c)



(d)



(e)



(f)

Abb. 4.3.: Zeitliche Änderung der Höhenwerte für einen ausgewählten Bildpunkt. In Abbildung (a), (c) und (e) sind die Ergebnisse für das $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv dargestellt, in Abbildung (b), (d) und (f) für das Mirau-Objektiv. Die erste Zeile (a,b) zeigt die Ergebnisse, die mit System 2 im Modus konstante Geschwindigkeit erzielt wurden. In der zweiten Zeile (c,d) sieht man die Ergebnisse von System 3 im Modus konstante Geschwindigkeit, in der dritten Zeile (e,f) im Modus EXTTPQ.

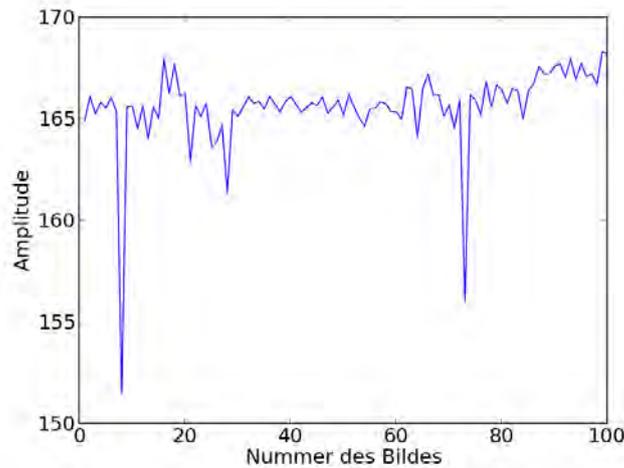


Abb. 4.4.: Zeitliche Änderung der Amplitude für das System 3 mit $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, Phasenauswertung und EXTTPQ-Modus.

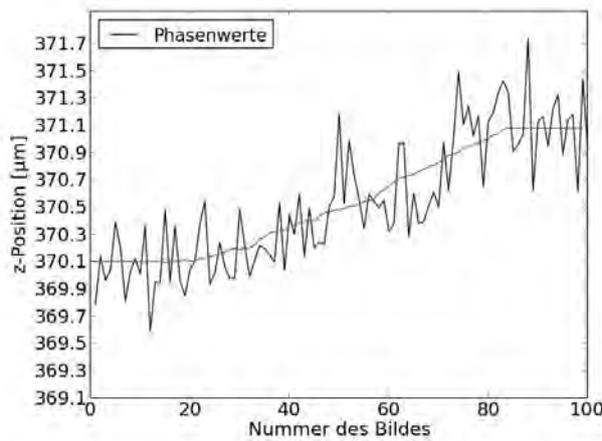
scheint. Für die Ursache der plötzlichen Abnahme der Amplitude an diesen Stellen existieren mögliche Erklärungsansätze, denen aber bisher nicht nachgegangen wurde.

Zur quantitativen Beurteilung der beschriebenen Schwankungen, sollten diese von der Drift isoliert werden. Vermutlich beruht die Drift nicht auf einem Systemfehler, sondern darauf, dass sich der Tisch kurz nach Verstellung der Schräglage noch leicht „verzieht“. Zur Trennung dieser beiden Effekte wurde die Drift mithilfe eines in Python realisierten Tiefpassfilters von der Kurve abgezogen. Anschließend wurde die Standardabweichung σ des gefilterten Signals berechnet. Exemplarisch ist dies für System 2 mit der Phasenauswertung und dem $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv in Abbildung 4.5 zu sehen.

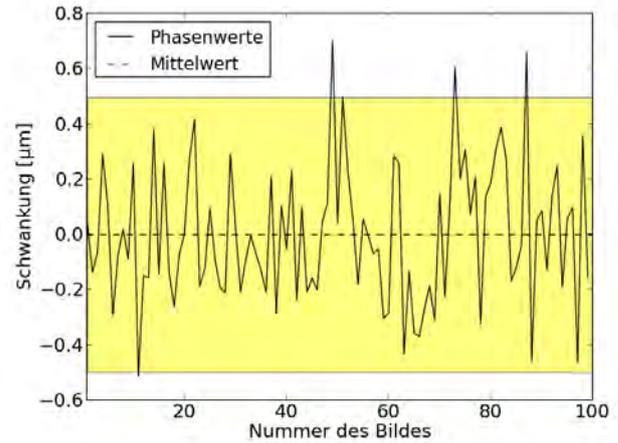
Die der zeitlichen Änderung der Höhenwerte zugrundeliegende Drift ist in Abbildung 4.5a in grün eingezeichnet. Sie wurde mithilfe einer Faltung berechnet und entspricht einem gleitenden Mittelwert. Zieht man die grüne Kurve nun von der ursprünglichen ab, so erhält man eine Schwankung wie in Abbildung 4.5b dargestellt. Die gestrichelte Linie gibt dabei den Mittelwert an, der gelbe Bereich kennzeichnet die 2σ -Umgebung, die als Maß der statistischen Messwertabweichung dient. Es wurde die 2σ -Umgebung gewählt, damit eine hohe Anzahl an Werten tatsächlich in diesem Bereich liegt. Zudem geht es vor allem um die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Systemen und Antriebsarten, weshalb es wichtig ist, in jedem Fall die gleiche Umgebung zu wählen.

Dieses exemplarisch demonstrierte Verfahren wurde für alle Systeme, Objektive, Auswertungsmethoden und Modi durchgeführt. Die erhaltenen statistischen Fehler sind für das $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv in Tabelle 4.1, für das Mirau-Objektiv in Tabelle 4.2 zusammen-

4. Ergebnisse



(a) Zeitliche Änderung der Höhenwerte und zugrundeliegende Drift (grün).



(b) Kurve nach Abzug der zugrundeliegenden Drift. Der gelbe Bereich kennzeichnet die 2σ -Umgebung um den Mittelwert (gestrichelte Linie).

Abb. 4.5.: Filterung für die Messung an System 2. Messbedingungen: $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung.

gefasst.

Wie schon an der Abbildung 4.3 erkennbar, treten im EXTTQP-Modus für beide Systeme

		Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
System 2	Konst.Geschw	497 nm	482 nm
System 3	Konst.Geschw	374 nm	376 nm
	EXTTQP	125 nm	140 nm

Tab. 4.1.: Statistische Fehler für das $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv.

die geringsten Schwankungen auf. Den minimalen Wert erreicht das Mirau-Objektiv mit 89 nm in der Phasenauswertung. Bei System 3 ist der Fehler für beide Objektive in der Phasenauswertung kleiner, bei System 2 hingegen in der Hüllkurvenauswertung.

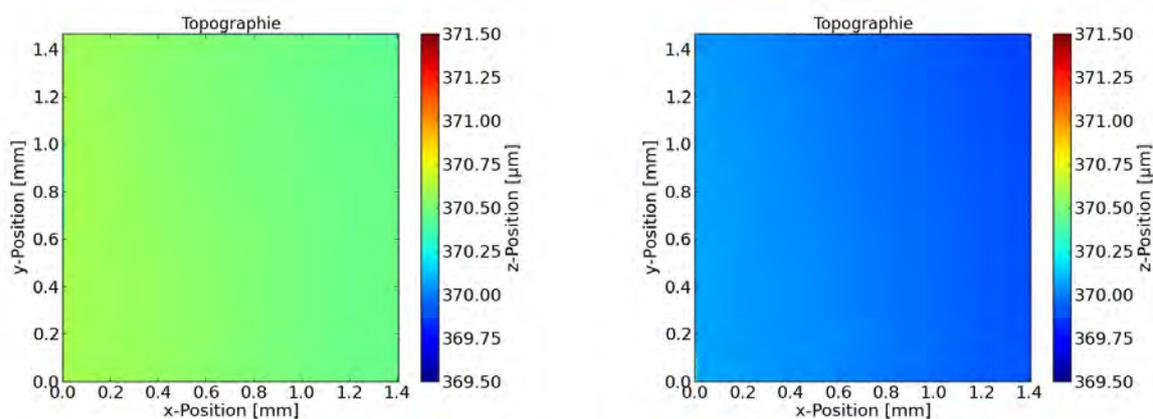
Die maximale Schwankung von 593 nm tritt bei Verwendung des Mirau-Objektivs am System 2 mit Phasenauswertung auf, was die Messung mit diesem Aufbau sehr ungenau macht. Sollen jedoch nur Messgrößen innerhalb eines Bildes, wie zum Beispiel die Oberflächenstruktur einer Probe betrachtet werden, so haben diese statistischen Schwankungen keinen Einfluss auf das Messergebnis.

Im Bezug auf die erhaltenen Fehler ist es wichtig, dass zwar ein Bildpunkt mit einer geringen Standardabweichung ausgewählt wurde, die beobachteten Schwankungen der To-

		Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
System 2	Konst.Geschw	593 nm	576 nm
System 3	Konst.Geschw	501 nm	515 nm
	EXTTQP	89 nm	91 nm

Tab. 4.2.: Statistische Fehler für das Mirau-Objektiv.

pographie jedoch repräsentativ für das ganze Bildfeld sind. Die Auswahl erfolgte lediglich aufgrund der inhomogenen Verteilung der Standardabweichung, die aus vermehrten Phasensprüngen in einigen Bereichen der Topographie resultiert. Exemplarisch ist die Schwankung der Topographie zwischen zwei Bildern für System 2 mit $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv in Abbildung 4.6 gezeigt. Zur Veranschaulichung wurde hier bereits ein Unwrapping durchgeführt, d. h. die Phasensprünge, die die Auswahl eines Bildpunktes erforderlich machten, wurden nachträglich behoben. Zwischen Bild 15 und Bild 16 liegt ein Höhenunterschied von ca. 500 nm, der sich an der entsprechende Stelle in Abbildung 4.3a wiederfindet.



(a) Bild Nummer 15 in einer Reihe von 100 Messungen unter gleichen Bedingungen.

(b) Bild Nummer 16 in einer Reihe von 100 Messungen unter gleichen Bedingungen.

Abb. 4.6.: Schwankungen der Topographie zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern in Abbildung 4.3a. Messbedingungen: System 2, $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung.

4.2. Phänomene

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die Beobachtung, dass eine plane Probe unter bestimmten Bedingungen nicht eben erscheint, wenn sie mit den verwendeten Systemen vermessen wird. Da die beobachteten Strukturen nicht auf der Probenoberfläche existieren,

4. Ergebnisse

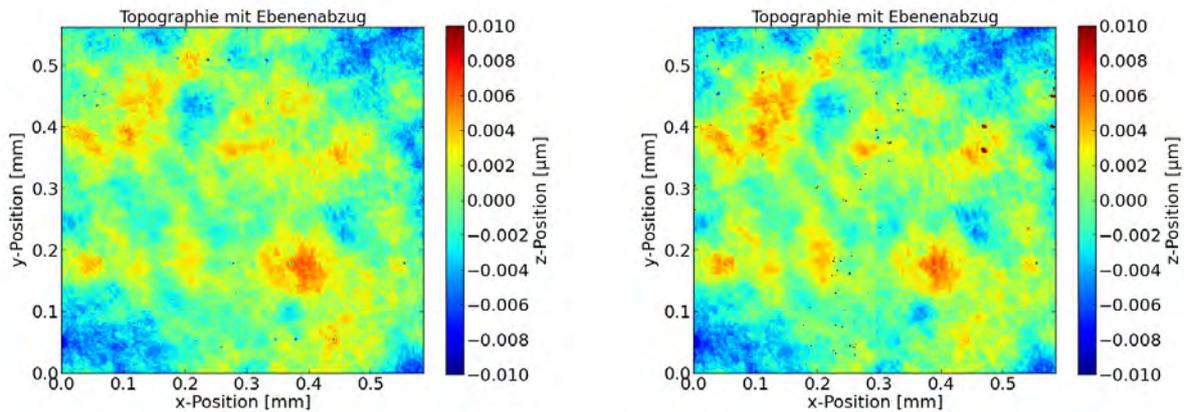
muss es sich um systematische Fehler handeln, deren Eigenschaften genauer untersucht wurden. Nach Durchführung mehrerer Messungen mit unterschiedlichen Objektiven konnten die auftretenden Effekte in Kategorien zusammengefasst werden. Anschließend wurden für einige der Phänomene weiterführende Untersuchungen durchgeführt, um mögliche Ursachen oder Korrekturansätze ausfindig zu machen. Die einzelnen Phänomene treten teilweise überlagert auf und die Unterscheidung ist nicht immer eindeutig. Die Charakterisierung der Phänomene wurde nur für System 1 und System 2 durchgeführt, da System 3 zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht zur Verfügung stand.

4.2.1. Offset-Topographie

Richtet man eine plane Probe gerade aus, so erwartet man als Topographie eine nahezu glatte, unverkippte Ebene. Bei allen verwendeten Systemen und Objektiven ist dies jedoch nicht der Fall: Die erwartete Ebene ist mit einer unregelmäßigen Struktur überlagert, die in der Topographie ortsfest bleibt, auch wenn man die Probe in der Ebene des Tisches verschiebt. Dies deutet darauf hin, dass die Struktur nicht auf der Oberfläche der Probe zu finden ist, sondern aus den Objektiven bzw. der Optik der Interferometer resultiert. Im Folgenden wird die Struktur als Offset-Topographie bezeichnet.

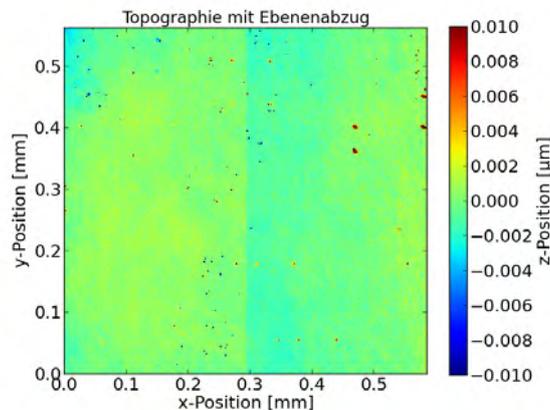
Der oben beschriebenen Vermutung wurde mit unterschiedlichen Messungen nachgegangen. Zunächst wurde am System 1 eine Vergleichsmessung mit dem Mirau-Objektiv durchgeführt, bei der die Offset-Topographie hintereinander unter gleichen Bedingungen mit einem Spiegel und einem Planglas gemessen wurde. Damit mögliche Defekte oder Verunreinigungen auf der Oberfläche der Probe nicht ins Gewicht fallen, wurde die Offset-Topographie jeweils aus einer Mittelung über fünf Einzelmessungen berechnet, wobei die Probe zwischen jeder Einzelmessung mithilfe des Tisches in der x - y -Ebene verschoben wurde. Als Auswertungsmethode wurde die Phasenauswertung verwendet. Die Ergebnisse für die beiden Offset-Topographien sowie deren Differenz sind in Abbildung 4.7 zu sehen. Da die Probe vor der Messung nicht vollständig gerade ausgerichtet werden kann, wurde nachträglich ein algorithmischer Abzug einer mittleren Ebene durchgeführt, um die Struktur der Offset-Topographie hervorzuheben. Auf der x - bzw. y -Achse ist erneut das Bildfeld in Millimetern angegeben, während auf der z -Achse die zugehörigen Höhenwerte in Mikrometern aufgetragen sind. Diese Darstellung wurde bei allen nachfolgenden Topographien einheitlich gewählt. Zudem ist die Skalierung der Bilder für Spiegel und Planglas gleich, weshalb die Höhe der Strukturen direkt über die Farbe der Falschfarbenskala vergleichbar ist.

Die erhaltenen Strukturen ähneln sich bei Planglas und Spiegel sehr stark. Beim Spiegel



(a) Offset-Topographie mit einem Planglas als Probe.

(b) Offset-Topographie mit einem Spiegel als Probe.



(c) Differenz der beiden Offset-Topographien mit Planglas und Spiegel.

Abb. 4.7.: Vergleich der Offset-Topographien bei Planglas und Spiegel.

Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, EXTTQP, Phasenauswertung.

sind zusätzlich noch einige starke Ausreißer zu beobachten, die auf Defekten auf dessen Oberfläche beruhen. Die Eliminierung durch eine Mittelung war in diesem Fall nicht möglich, da die Spiegeloberfläche an vielen Stellen leicht zerkratzt war. Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass es sich nicht um eine Struktur auf der Oberfläche der Probe handeln kann.

Bei einer weiteren Untersuchung wurden Offset-Topographien zwischen dem System 1 und dem System 2 unter Verwendung desselben Mirau-Objektivs verglichen. Da die restliche Optik der beiden Systeme jedoch nicht vergleichbar ist, sollten diese Messungen Aufschluss darüber geben, ob der Fehler aus dem Objektiv oder aus der vorangehenden Optik resultiert. Zur Auswertung wurde erneut die Phasenauswertung genutzt, als Probe

4. Ergebnisse

diente in beiden Fällen ein Planglas. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.8 dargestellt. Dreht man die am System 2 gemessene Offset-Topographie, so fällt auf, dass

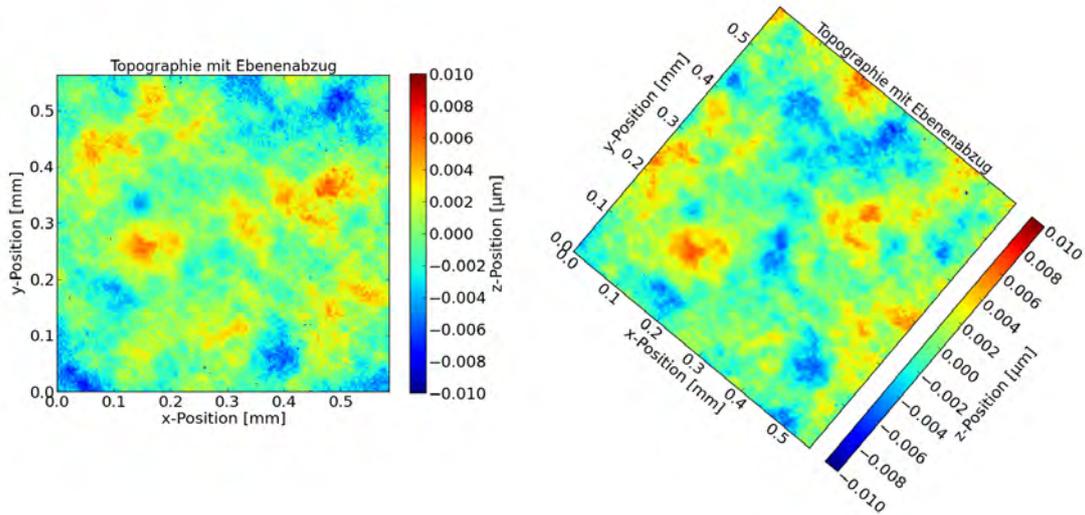


Abb. 4.8.: Offset-Topographie bei Messung am System 1 (links) und System 2 (rechts) mit Mirau-Objektiv im Vergleich.

Messbedingungen System 1: EXTTPQ, Phasenauswertung, Probe: Planglas.
Messbedingungen System 2: konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, Probe: Planglas.

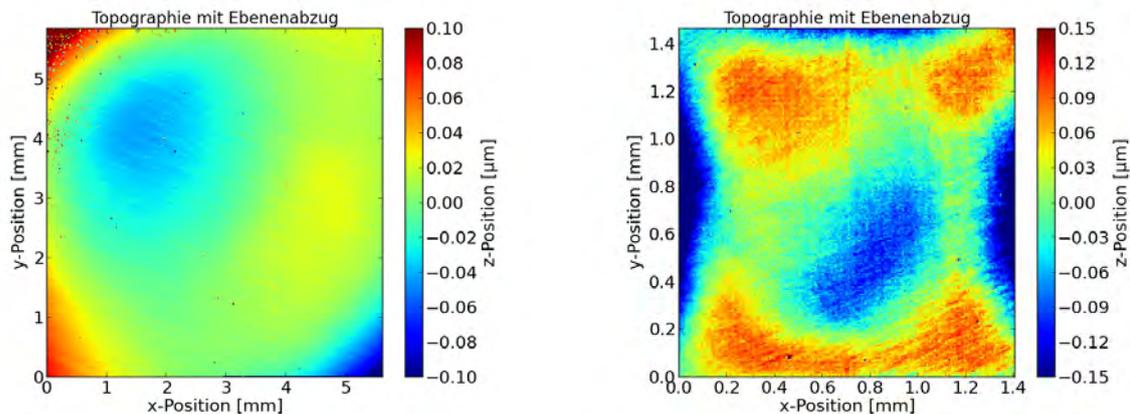
große Bereiche mit der Offset-Topographie vom System 1 übereinstimmen. Da das Mirau-Objektiv zwischen den beiden Messungen herausgeschraubt und in das andere System eingeschraubt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um einen Effekt handelt, der aus dem Objektiv resultiert. Grund hierfür könnte zum Beispiel eine Struktur auf dem eingebauten Referenzspiegel sein.

Eine einfache Methode zur Eliminierung dieses Einflusses ist die vorherige Einmessung einer Offset-Topographie. Dafür wird eine plane Probe gerade ausgerichtet und mindestens fünf Mal in der Ebene des Tisches verschoben, wobei vor jeder Verschiebung eine Messung aufgenommen wird. Die Mittelung über fünf Messungen wurde empirisch als beste Lösung bestimmt, da so zumindest kleine Fehler auf der Probenoberfläche eliminiert werden. Bei einer höheren Anzahl von Einzelmessungen verändert sich die Schräglage durch Verschiebung in der Ebene des Tisches zwischen den Messungen, wodurch ein neuer Fehler überlagert wird.

Aus den Einzelmessungen wird ein Mittelwert berechnet, der als Offset-Topographie hinterlegt wird. Für alle weiteren Messungen, zum Beispiel an unbekanntem Proben, kann diese Topographie einfach von den Messdaten abgezogen werden.

Dieser Offset-Abzug wurde mithilfe eines Python-Programms realisiert und bei allen folgenden Messungen durchgeführt.

Offset-Topographien wurden für alle Objektive und für beide Auswertungsmethoden beobachtet. Dabei variieren Aussehen und Höhe der Struktur zwischen den unterschiedlichen



(a) Messbedingungen: System 2, $20\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, Probe: Planglas.

(b) Messbedingungen: System 2, $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Hüllkurvenauswertung, Probe: Planglas.

Abb. 4.9.: Beispiele verschiedener Offset-Topographien.

Aufbauten. Weitere Beispiele für Offset-Topographien sind in der Abbildung 4.9 zu sehen. Hierbei ist vor allem auf die Skalierung der z -Achse zu achten: Im Vergleich zu den bisher betrachteten Offset-Topographien des Mirau-Objektivs sind die Strukturen für die dargestellten Michelson-Objektive deutlich höher. Zudem wurde hier nicht untersucht, ob die Struktur aus dem Objektiv resultiert. Die Methode des Offset-Abzugs funktioniert jedoch für alle Objektive, weshalb dieser Fehler in jedem Fall korrigiert werden kann.

4.2.2. Ripples

Verkippt man eine plane Probe in der Ebene des Tisches, so treten zeitlich konstante, periodische „Streifen“ in der Topographie auf, d. h. Bereiche, in denen der Höhenwert größer ist wechseln sich mit Bereichen, in denen der Höhenwert niedriger ist, ab. Dieses Phänomen soll im Folgenden als „Ripples“ bezeichnet werden. Diese Bezeichnung wurde in Anlehnung an vergleichbare Phänomene gewählt, die bereits in der Literatur beschrieben wurden [16]. Es konnte jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden, ob ein Zusammenhang besteht.

Für eine exemplarische Messung ist in Abbildung 4.10 die Veränderung der Ripples mit

4. Ergebnisse

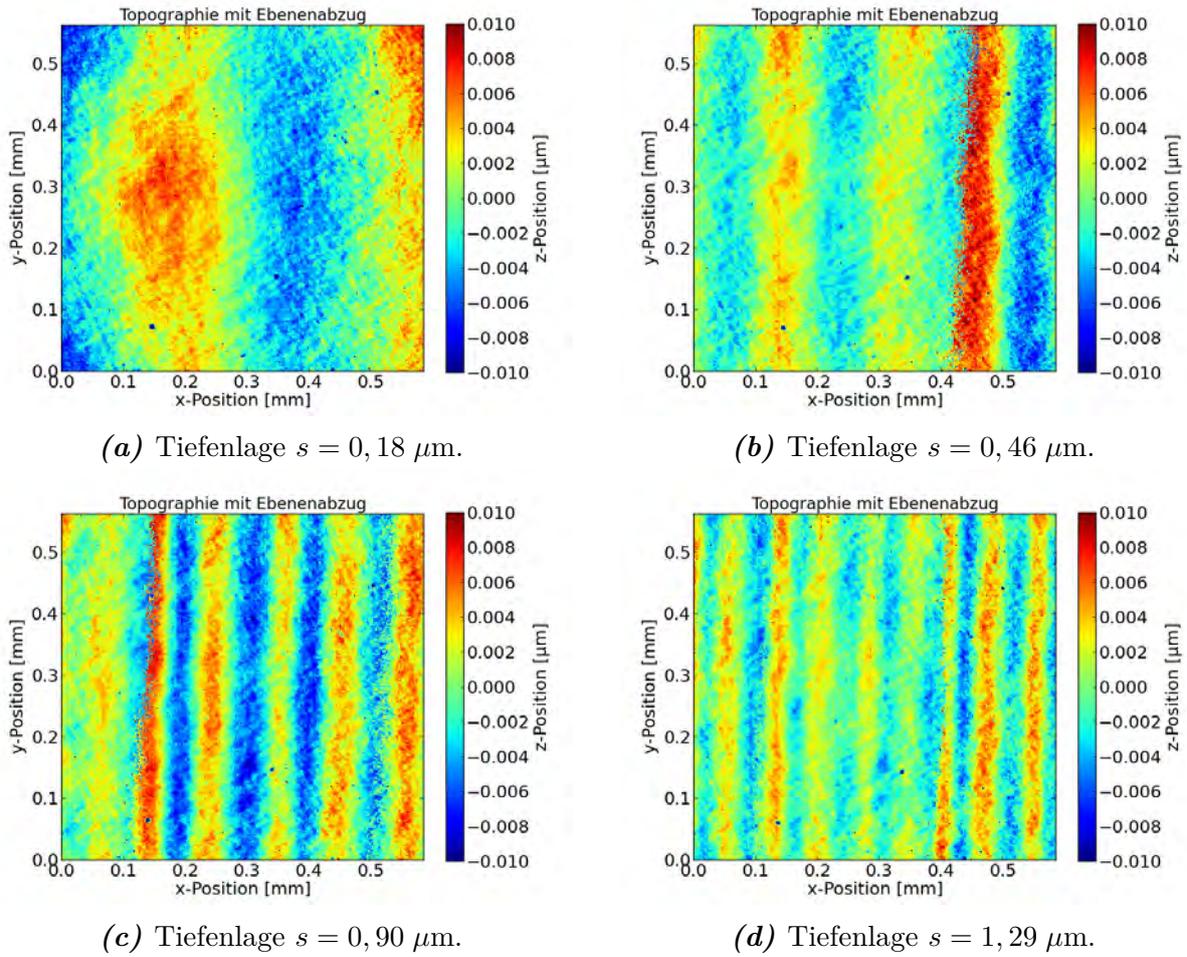


Abb. 4.10.: Zunahme der Anzahl der Ripples mit steigender Schräglage.

Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, konst. Geschw., Phasenauswertung, Probe: Planglas.

zunehmender Schräglage dargestellt. Die Skalierung der z -Achse wurde für eine gute Vergleichbarkeit bei allen vier Abbildungen identisch gewählt. Zunächst fällt auf, dass die Anzahl der Ripples im Bild mit der Schräglage steigt. In jedem Bild haben die Ripples jedoch eine feste Periode, was auch in anderen Messungen bestätigt wurde. Zudem finden sich an einigen Stellen steile Übergänge. Diese bilden ein eigenes Phänomen, auf das in Abschnitt 4.2.3 eingegangen wird.

Zur genauen Bestimmung eines Zusammenhangs zwischen Tiefenlage s und der Anzahl n der Perioden der Ripples im Bild, wurde der Quotient $\lambda_t = \frac{s}{n}$ berechnet. Da es sich um einen Tiefeneffekt handelt, kann auf diese Weise die zugehörige Wellenlänge λ_t in der Tiefe bestimmt werden. Dies wurde für die Messungen mit dem Mirau-Objektiv durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt das System 3 noch nicht verfügbar war und somit Vergleiche zwischen den beiden Antrieben nur mit dem Mirau-Objektiv möglich waren. Für die Anzahl

		Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
System 1	Konst. Geschw.	(148 ± 5) nm	(154 ± 7) nm
	EXTTQP	(153 ± 5) nm	(156 ± 5) nm
System 2	Konst. Geschw.	(140 ± 6) nm	(156 ± 7) nm

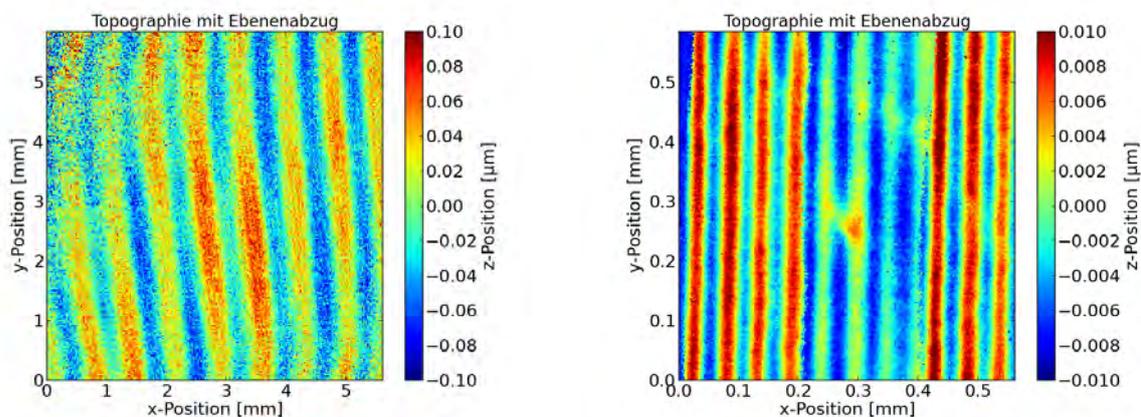
Tab. 4.3.: Wellenlänge λ_t in der Tiefe für die verschiedenen Systeme und Modi mit dem Mirau-Objektiv.

der Perioden n wurde ein Ablesefehler σ_n von 10 % angenommen, d. h. $\sigma_n = 0,1 \cdot n$. Ein Fehler für die aus der Ebeneneinpassung gewonnenen Schräglage s kann nicht angegeben werden. Der Fehler der bestimmten Wellenlänge in der Tiefe ergibt sich somit über das Gesetz der Fehlerfortpflanzung zu

$$\sigma_{\lambda_t} = \sqrt{\sigma_n^2 \left(\frac{\partial \lambda_t}{\partial n} \right)^2} = \sigma_n \cdot \frac{s}{n^2}.$$

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Die erhaltenen Werte sind im Rahmen der angegebenen Fehler nahezu identisch, schei-



(a) Messbedingungen: System 2, $20\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Hüllkurvenauswertung, Probe: Planglas, $s = 2,16 \mu\text{m}$.

(b) Messbedingungen: System 2, Mirau-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, Probe: Planglas, $s = 1,78 \mu\text{m}$.

Abb. 4.11.: Beispiele für Topographien mit Ripples bei unterschiedlicher Kombination von Variablen.

nen jedoch bei der Phasenauswertung tendenziell etwas kleiner zu sein. Ein Viertel der Wellenlänge des verwendeten Lichts beträgt 163 nm und liegt daher in einer ähnlichen

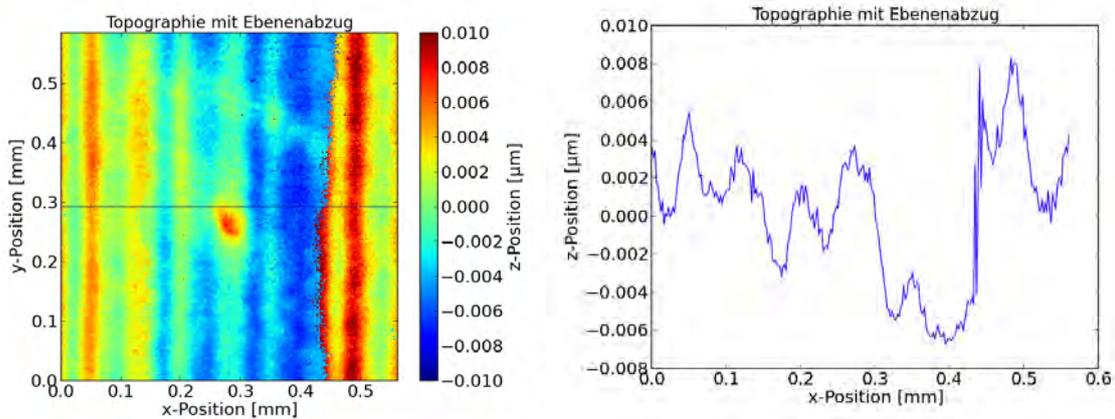
4. Ergebnisse

Größenordnung wie λ_t , weshalb ein Zusammenhang zwischen TQP's und Ripples vermutet wird. Dieser konnte im Rahmen der Arbeit nicht weiter untersucht werden.

Das Phänomen tritt bei allen Objektiven und in Phasen- sowie Hüllkurvenauswertung auf. Beispielbilder von Ripples unter verschiedenen Messbedingungen sind in der Abbildung 4.11 zu sehen. Bei der linken Topographie ist erneut die Skalierung der Achse zu beachten, weshalb die Struktur in diesem Fall deutlich höher ist als bei den bisher beschriebenen Ripples. Ergänzend sei erwähnt, dass man generell zwischen den Systemen Unterschiede in der Amplitude der Ripples beobachtet, worauf jedoch in Abschnitt 4.3 genauer eingegangen wird.

4.2.3. Kleine Sprunggrenzen

Ein weiteres bei Schräglage auftretendes Phänomen sind abrupte Sprünge in der Topographie, die eine Höhe von ca. 10 – 20 nm aufweisen. Beobachtet wurde dieser Effekt nur bei der Phasenauswertung mit dem Modus konstante Geschwindigkeit. Beispiele sind in den

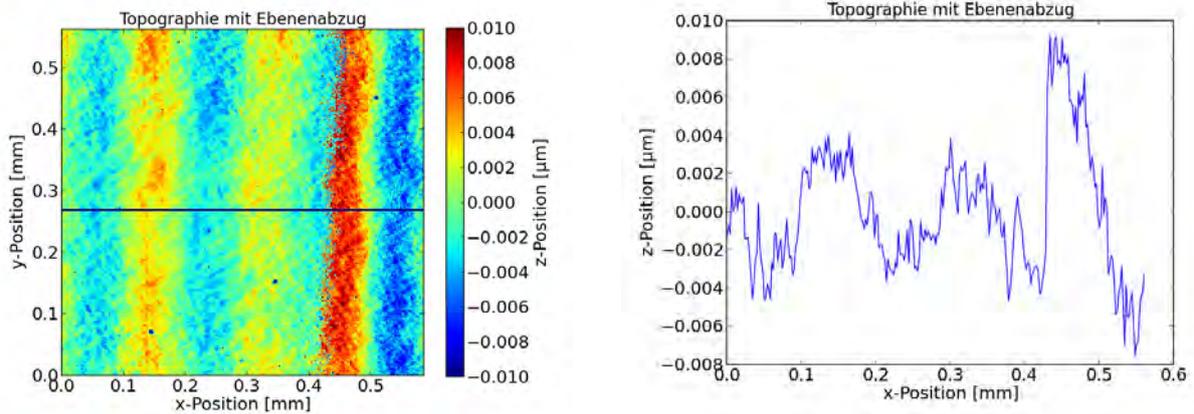


(a) Topographie mit eingezeichnetem Schnitt. (b) Schnitt durch die Topographie.

Abb. 4.12.: Kleine Sprunggrenzen, Messbedingungen: System 2, Mirau-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, $s = 1, 20 \mu\text{m}$.

Abbildungen 4.12 und 4.13 dargestellt, wobei jeweils noch der zugehörige Schnitt durch die Topographie abgebildet ist. Bei $x \approx 0,45$ mm ist in Abbildung 4.12 ein deutlicher Höhenunterschied in der Topographie erkennbar. Das Gleiche gilt für Abbildung 4.13, wobei die Skalierung vergleichbar gewählt wurde.

Dieses Phänomen wurde im Rahmen der Arbeit nicht genauer untersucht, da der verursachte Fehler mit 10 – 20 nm sehr klein ist.



(a) Topographie mit eingezeichnetem Schnitt. (b) Schnitt durch die Topographie.

Abb. 4.13.: Kleine Sprunggrenzen, Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, $s = 0,46 \mu\text{m}$.

Ein Ansatz zur weiteren Untersuchung ist die Vermutung, dass die kleinen Sprunggrenzen aus einer falschen Wellenlänge bei der Auswertung resultieren. Zwar ist die mittlere Wellenlänge der Weißlichtquelle bekannt, jedoch kann diese aufgrund der Übertragungsfunktion der Optik von der Wellenlänge abweichen, die im detektierten Interferenzsignal beobachtet wird. Die zur Auswertung verwendete Wellenlänge von 652 nm ist lediglich ein empirisch ermittelter Wert und wurde nicht durch die Analyse des Spektrums des Lichts nach Passieren der Optik nachgewiesen.

Mit der interferometrischen Wellenlänge λ_i kann die absolute z -Position im Bezug auf den Nullpunkt z_0 des Systems dargestellt werden durch

$$z = z_0 + k \cdot \lambda_i + \varphi$$

mit der Phasenverschiebung φ des Signals und der Anzahl an ganzzahligen Vielfachen k der Wellenlänge. Ist nun die tatsächliche Wellenlänge größer als die angenommene, so findet der Wechsel von k zu $k+1$ zu früh statt und der Höhenwert an dieser Stelle springt abrupt um die Differenz aus tatsächlicher und angenommener Wellenlänge. Bei Annahme einer zu großen Wellenlänge würde der gleiche Effekt, nur mit umgekehrtem Vorzeichen auftreten.

Um dieser Vermutung nachzugehen müsste für jeden Bildpunkt der zugehörige k -Wert ausgegeben werden. Anschließend könnte man vergleichen, ob die Sprunggrenze in der Topographie dem Übergang $k \rightarrow k+1$ entspricht. Dieser Ansatz würde auch erklären,

4. Ergebnisse

warum das Phänomen ausschließlich bei der Phasenauswertung auftritt.

4.2.4. Ringstruktur

Beim System 1 treten bei Verwendung der Hüllkurvenauswertung mit Mirau-Objektiv ab einer Tiefenlage von $s \approx 1,4 \mu\text{m}$ ringförmige Strukturen auf, die in Abbildung 4.14 dargestellt sind. Mit zunehmender Schräglage treten die Strukturen deutlicher hervor.

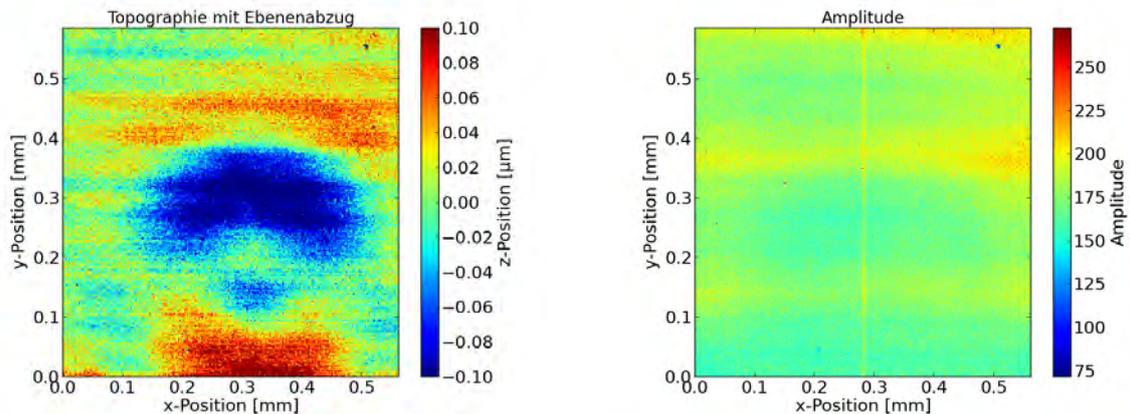


Abb. 4.14.: Topographie und zugehörige Amplitude bei einer Tiefenlage von $s = 3,27 \mu\text{m}$.

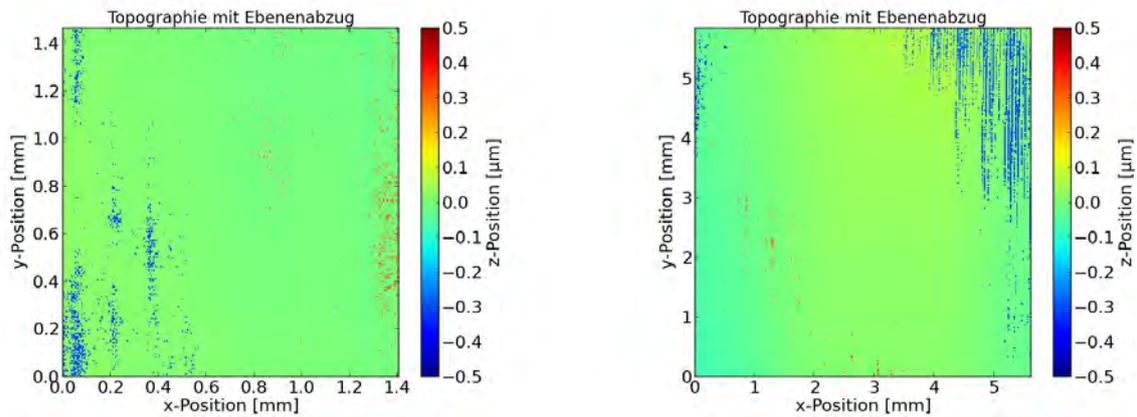
Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, konst. Geschw., Hüllkurvenauswertung, Probe: Planglas.

Da das Phänomen beim System 2 mit dem gleichen Objektiv nicht auftritt, wird davon ausgegangen, dass es sich um einen Justagefehler der Optik handelt. Unter Schräglage scheint sich die Hüllkurve in einigen Bereichen des Bildfeldes zu deformieren. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, hängt Form und Breite der Hüllkurve vom Spektrum der verwendeten Lichtquelle ab, was darauf schließen lässt, dass bei diesem Phänomen unter Schräglage dispersive Effekte in der Optik eine Rolle spielen, die das Spektrum des Lichts verändern. Darauf deutet auch die schwächere Amplitude des Signals in den Bereichen, in denen die Ringstruktur auftritt, hin.

Dieses Phänomen lässt sich daher vermutlich durch eine korrekte Justage der Optik vermeiden.

4.2.5. Phasensprünge

Phasensprünge sind deutliche Ausreißer in der Topographie, deren Höhe sich genau um $\pm \frac{\lambda}{2}$ von der umgebenden Topographie unterscheidet. Beispielbilder von Topographien mit



- (a) Messbedingungen: System 2, $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, $s = 2,89 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,118^\circ$.
- (b) Messbedingungen: System 2, $20\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, $s = 72,64 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,741^\circ$.

Abb. 4.15.: Beispiele für Topographien mit Phasensprüngen bei unterschiedlicher Kombination von Variablen.

Phasensprüngen sind in Abbildung 4.15 dargestellt.

Die Skalierungen wurden mit $\pm 500 \text{ nm}$ so gewählt, dass die Höhe der Phasensprünge mit $\pm 326 \text{ nm}$ gut sichtbar ist. Es ist deutlich erkennbar, dass die Phasensprünge beim $20\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv vermehrt in der rechten oberen Ecke des Bildfeldes auftreten, was an schlechten Signalbedingungen in diesem Bereich liegen könnte. Zudem liegt in diesem Fall mit $s = 72,64 \mu\text{m}$ eine extrem hohe Schräglage vor.

Beim $5\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv treten im rechten Teil des Bildfeldes vermehrt Phasensprünge auf, die unterhalb der mittleren Ebene liegen, während die Phasensprünge im linken Teil des Bildes darüber liegen.

Die Differenz zwischen Hüllkurven- und Phasenmaximum wird, wie bereits erwähnt, als Phasenoffset bezeichnet. Zur Korrektur einer systematisch bedingten Veränderung des bestimmten Phasenmaximums über das Bildfeld kann vor einer Messung auf einer planen, gerade ausgerichteten Probe ein Phasenoffset eingemessen werden. Hierzu speichert man die Differenz von Hüllkurvenmaximum und Phasenmaximum für jeden Bildpunkt ab und führt anschließend ein Unwrapping durch, um Phasensprünge zu korrigieren. Der so erhaltenen Phasenoffset wird hinterlegt und bei Messungen vor Bestimmung des Phasenmaximums vom jeweiligen Wert abgezogen, wodurch die systematische Verschiebung des Phasenoffsets eliminiert wird.

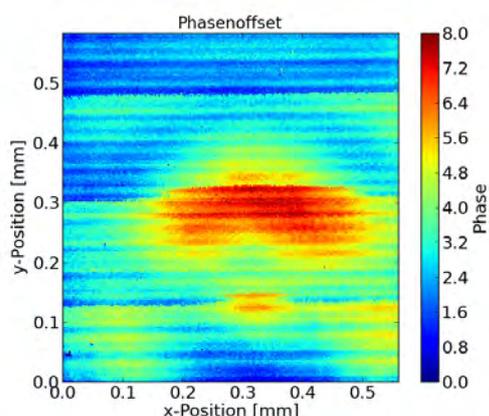
Dieses Verfahren funktioniert jedoch nur, wenn man von einem konstanten Phasenoffset

4. Ergebnisse

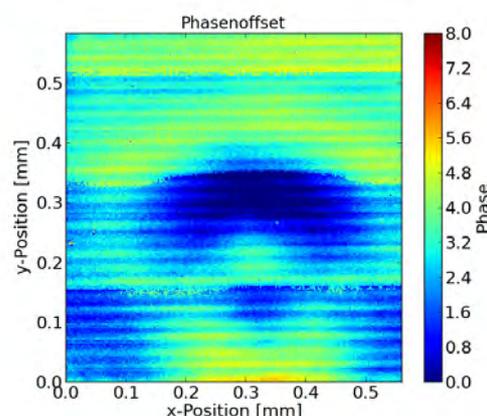
ausgeht, der sich weder unter bestimmten Bedingungen, noch zeitlich ändert. Zur Bestimmung der Grenzen dieser Vorgehensweise, sowie zur Unterscheidung zwischen statistischen und systematischen Änderungen des Phasenoffsets wurden einige Untersuchungen durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden.

Systematische Änderung des Phasenoffsets

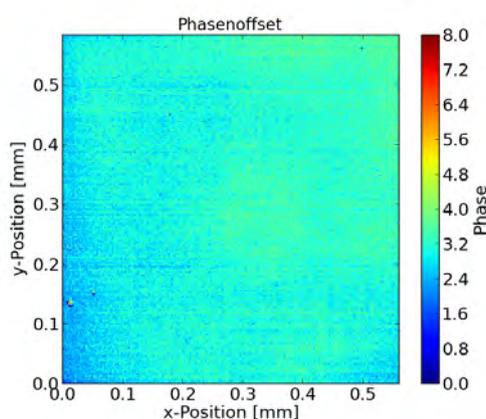
In diesem Zusammenhang war eine erste Beobachtung, dass Phasensprünge vermehrt bei Schräglage einer planen Probe auftreten, wenn der Phasenoffset zuvor bei gerader Ausrichtung eingemessen und anschließend hinterlegt worden war. Zur genaueren Untersuchung wurde am System 1 eine Messung mit dem Mirau-Objektiv durchgeführt, bei der unter verschiedenen Tiefenlagen ein Phasenoffset eingemessen wurde. Hierzu wurde



(a) Phasenoffset bei einer Tiefenlage von $s = 3,98 \mu\text{m}$.



(b) Phasenoffset bei einer Tiefenlage von $s = -3,77 \mu\text{m}$.



(c) Phasenoffset bei gerader Ausrichtung.

Abb. 4.16.: Phasenoffset eines Planglases bei unterschiedlichen Tiefenlagen. Messbedingungen: System 1, EXTTQP, Probe: Planglas.

die Tiefenlage eines Planglases entlang einer Achse des Kipptisches zwischen $s \approx +4 \mu\text{m}$ und $s \approx -4 \mu\text{m}$ variiert. Anschließend wurde für alle Messdaten ein Unwrapping durchgeführt. Die erhaltenen Daten für die Änderung des Phasenoffsets mit der Tiefenlage sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Hierbei ist auf der z -Achse die jeweilige Phase des Signals aufgetragen. Unter den maximal erreichten Tiefenlagen ist eine kreisförmige Struktur zu erkennen, die nicht ganz zentral im Bild liegt und der Ringstruktur in Abschnitt 4.2.4 sehr ähnelt. Die Ringstruktur wurde ebenfalls beim System 1 mit Mirau-Objektiv und unter Schräglage beobachtet. Außerdem scheint es, als habe sich die Struktur mit einer Kippung um 180° entlang einer Achse auch um 180° gedreht. Der Phasenoffset ist somit unter Änderung der Schräglage nicht mehr konstant.

Diese Beobachtung sollte in einer weiteren Messung genauer untersucht werden, bei der die Probe mithilfe eines Drehtisches bei Schräglage um 360° gedreht wurde. Hierzu wur-



Abb. 4.17.: Veränderter Aufbau von System 1 mit Drehtisch.

de der Aufbau wie in Abbildung 4.17 dargestellt verändert. Diese Messung konnte nur an einem Spiegel durchgeführt werden, da das Planglas nicht zwischen Objektiv und Drehtisch passt. Der Spiegel wurde auf den beiden Tischen gerade ausgerichtet und anschließend mithilfe eines Stück Papiers auf dem Drehtisch in einer Richtung schräg gestellt ($s = 4,13 \mu\text{m}$), um bei Drehung eine konstante Schrägstellung zu gewährleisten. Anschließend wurde die Probe in Schritten von 30° um insgesamt 360° gedreht, wobei an jeder Position ein Phasenoffset eingemessen und gespeichert wurde. Für alle Messdaten wurde erneut ein Unwrapping durchgeführt, um Phasensprünge zu korrigieren. In Abbildung 4.18 ist eine Auswahl der Phasenoffsets nach dem Unwrapping zu sehen. Die Beobachtungen bestätigen, dass sich der Phasenoffset mit der Schräglage dreht. Da zudem

4. Ergebnisse

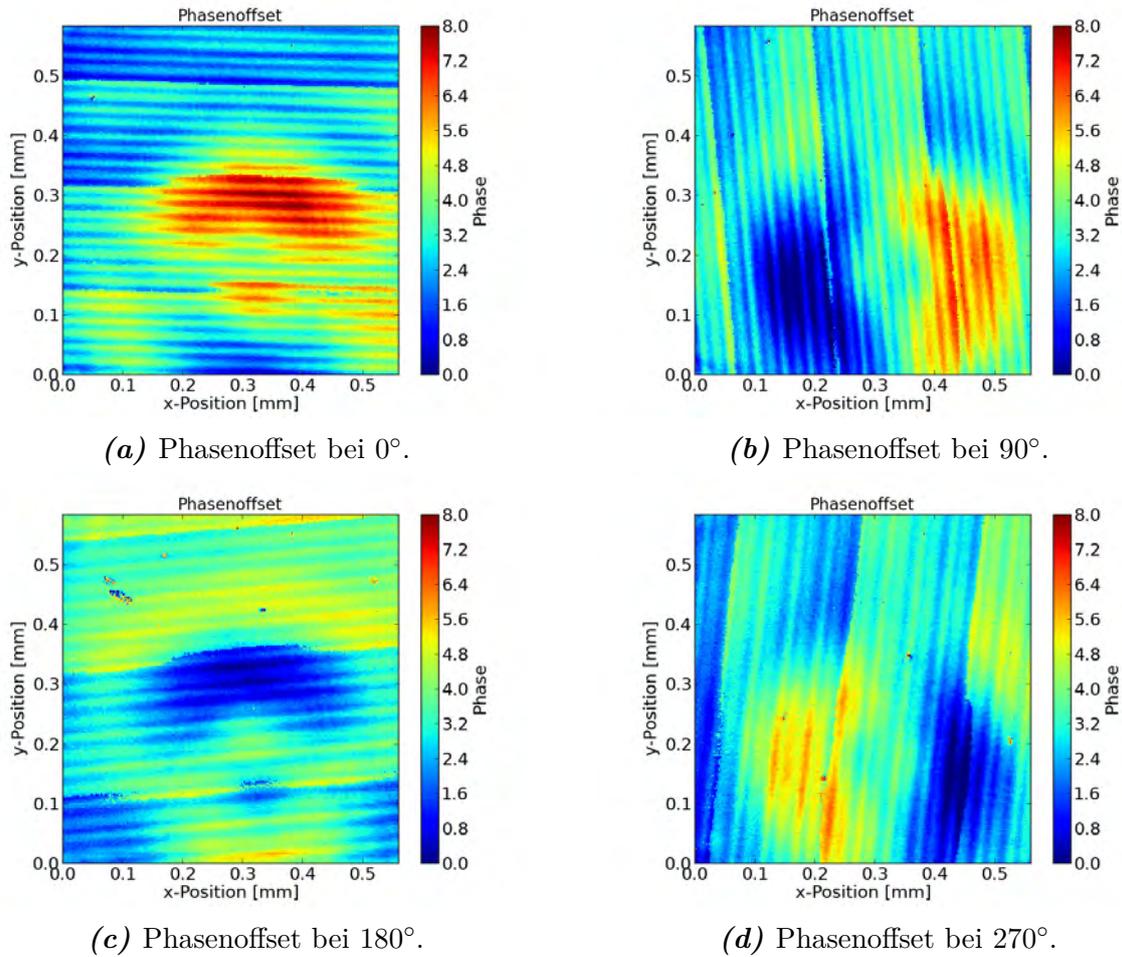


Abb. 4.18.: Phasenoffset unter einer Tiefenlage von $s = 4,13 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,404^\circ$.
Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, EXTTQP, Phasenauswertung, Probe: Spiegel.

vermehrt Phasensprünge in den Bereichen auftreten, in denen eine starke Änderung des Phasenoffsets vorliegt (ringförmige Struktur), kann genau dies als Ursache für die steigende Anzahl der Phasensprünge bei Schräglage identifiziert werden.

Die Übereinstimmung von Ringstruktur und Phasenoffset bei starker Schräglage lässt darauf schließen, dass die fehlerhafte Hüllkurvenauswertung im Bereich der Ringstruktur anschließend auch zu einer falschen Bestimmung des Phasenmaximums führt. In diesem Zusammenhang ist erneut der Vergleich mit dem System 2 interessant: Wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben, tritt bei Verwendung des gleichen Mirau-Objektivs keine vergleichbare Ringstruktur in der Hüllkurvenauswertung auf. Zusätzlich sind bei diesem System in der Phasenauswertung auch unter Schräglage keine Phasensprünge zu beobachten, wenn der Phasenoffset zuvor bei gerader Ausrichtung des Planglases eingemessen

wurde. Genauere Beschreibungen zu Phasensprüngen bei den einzelnen Objektiven finden sich im Kapitel 4.3.

Statistische Änderung des Phasenoffsets

Zur statistischen Betrachtung des Phasenoffsets dienen die in Kapitel 4.1 beschriebenen Daten zur Schwankung der Topographie. Da hier jeweils Hüllkurven- und Phasendaten betrachtet wurden, muss nur die Differenz dieser beiden Größen berechnet werden, was dem Phasenoffset entspricht. Somit ergibt sich eine zeitliche Änderung des Phasenoffsets, die in Abbildung 4.19 zu sehen ist.

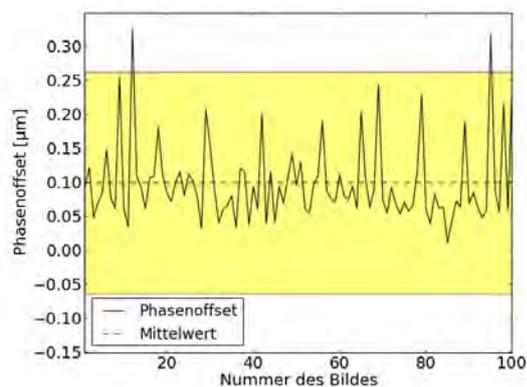
Es ist deutlich erkennbar, dass die Daten um einen konstanten Mittelwert schwanken, der als gestrichelte Linie eingezeichnet ist. Der gelbe Bereich kennzeichnet die Grenzen, bei deren Überschreitung es zu einem Phasensprung kommen würde: Geht man von der Situation in Abbildung 2.5 aus, die der schlechtesten, möglichen Signalbedingung entspricht, so kommt es zu einem Phasensprung, wenn der Phasenoffset um mehr als eine halbe interferometrische Wellenlänge ($= 163 \text{ nm}$) schwankt. Bei System 2 in Abbildung 4.19a sieht man, dass der Phasenoffset diese Grenzen zwei Mal überschreitet und es somit zu einem statistisch bedingten Phasensprung kommen würde. Bei System 3 liegt der Phasenoffset für beide Modi und Objektive im gekennzeichneten Bereich, wobei er für den EXTTQP-Modus insgesamt wieder die geringsten Schwankungen aufweist.

Beim Mirau-Objektiv sind die Schwankungen im Modus konstante Geschwindigkeit für System 2 (Abb. 4.19b) und System 3 (Abb. 4.19d) vergleichbar und liegen in der gleichen Größenordnung wie beim System 3 mit $5 \mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv im gleichen Modus. Die geringsten Schwankungen treten erneut im EXTTQP-Modus auf.

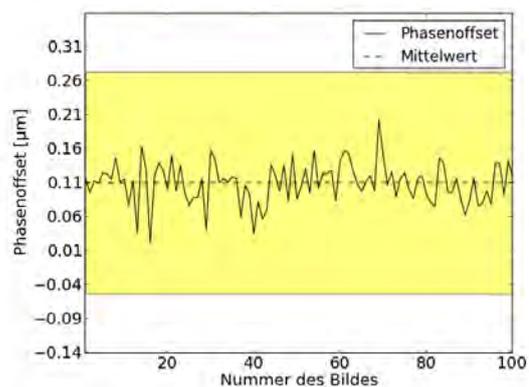
Diese Ergebnisse zeigen, wie bereits die statistischen Schwankungen der Topographie, eine Abhängigkeit vom verwendeten Antrieb. Mit dem EXTTQP-Modus des Tauchspulenmotors wird für beide Objektive der stabilste Phasenoffset erreicht.

Die oben beschriebene Methode des Einmessens eines Phasenoffsets beruht auf der Annahme, dass der Phasenoffset konstant ist. Es wurde bereits gezeigt, dass dies nicht immer der Fall ist, da sich der Phasenoffset zum Beispiel bei schlechter Justage der Optik mit der Schräglage ändert. Hier wird nun noch ein anderer Effekt deutlich. Der Phasenoffset schwankt auch zeitlich bei sonst gleichen Bedingungen. Ist diese statistische Schwankung klein, d. h. weit von den eingezeichneten Grenzen entfernt, so wie beim EXTTQP-Modus (Abb. 4.19e und 4.19f), dann wird mit einem zuvor eingemessenen Phasenoffset trotzdem noch die richtige Phase bei der Auswertung bestimmt. Überschreitet die Schwankung des Phasenoffsets jedoch die Grenzen oder ist kurz davor wie beim System 2 mit $5 \mu\text{m}$ -

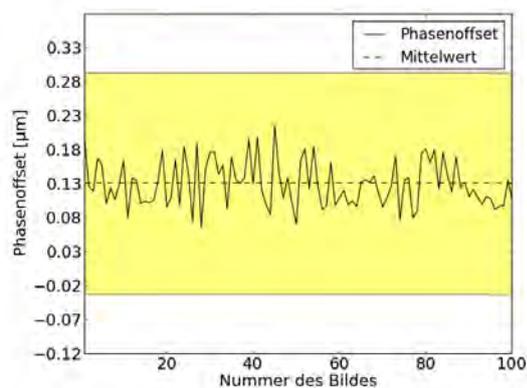
4. Ergebnisse



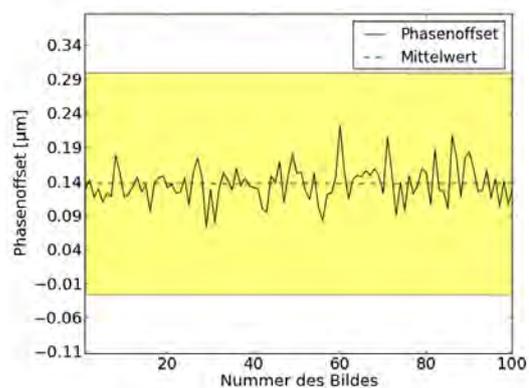
(a)



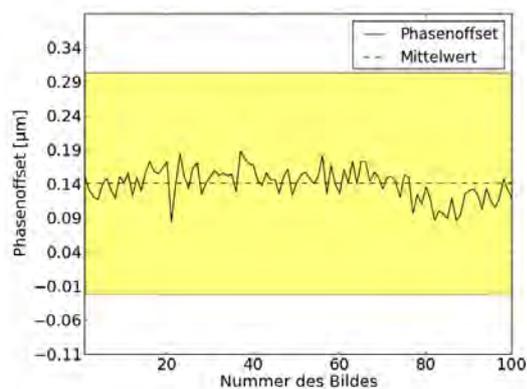
(b)



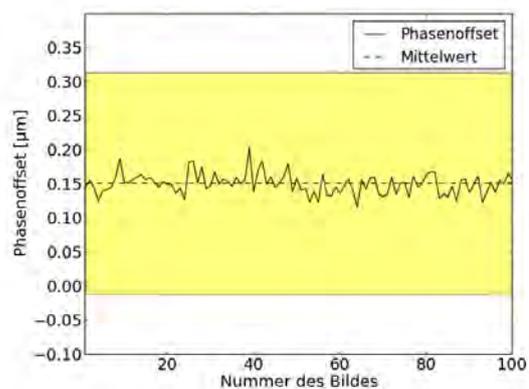
(c)



(d)



(e)



(f)

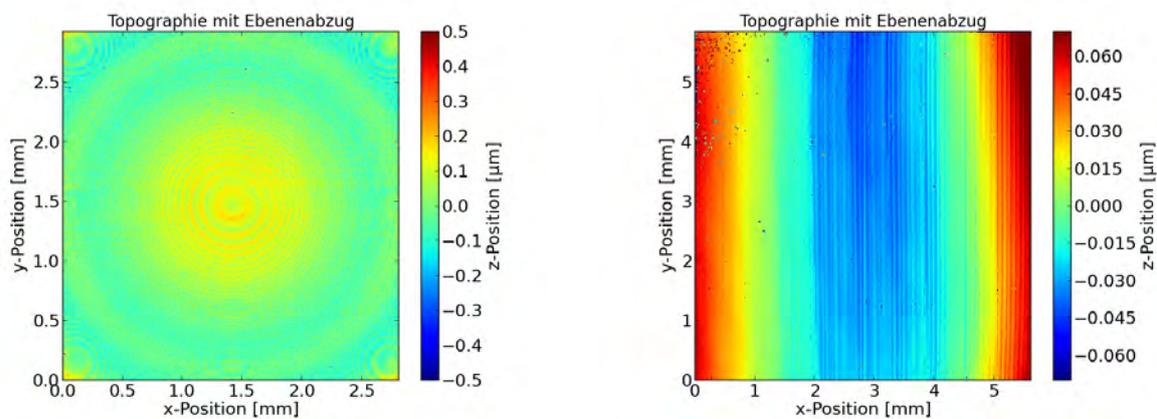
Abb. 4.19.: Zeitliche Änderung des Phasenoffsets für einen ausgewählten Bildpunkt. In Abbildung (a), (c) und (e) sind die Ergebnisse für das 5µm-Michelson-Objektiv dargestellt, in Abbildung (b), (d) und (f) für das Mirau-Objektiv. Die erste Zeile (a,b) zeigt die Ergebnisse, die mit System 2 im Modus konstante Geschwindigkeit erzielt wurden. In der zweiten Zeile (c,d) sieht man die Ergebnisse von System 3 im Modus konstante Geschwindigkeit, in der dritten Zeile (e,f) im Modus EXTTQP.

Michelson-Objektiv (Abb. 4.19a), so ist das Einmessen eines Phasenoffsets nicht mehr sinnvoll, da es trotzdem zu Phasensprüngen kommen wird.

4.2.6. Langwellige Struktur

Dieses Phänomen tritt erst bei größeren Tiefenlagen ($s \approx 11 \mu\text{m}$) auf, die im Rahmen dieser Arbeit nicht systematisch untersucht wurden. Zur Vervollständigung der Beobachtungen soll dieser Effekt trotzdem kurz dargestellt werden.

In Abbildung 4.20 sind zwei Beispiele der langwelligen Struktur zu sehen. Das erste Auftreten wurde beim $10\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv beobachtet, bei dem die benötigten, hohen Tiefenlagen schon durch die Krümmung des Referenzspiegels realisiert werden. Im Zen-



(a) Messbedingungen: System 2, $10\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Hüllkurvenauswertung, $s = 0,47 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,01^\circ$.

(b) Messbedingungen: System 2, $20\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv, konst. Geschwindigkeit, Phasenauswertung, $s = 26,91 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,274^\circ$.

Abb. 4.20.: Beispiele für die langwellige Struktur.

trum der zugehörigen Topographie in Abbildung 4.20a, liegt eine kleine Krümmung vor, wodurch die „kurzwellige“ Struktur der Ripples auftritt. Mit der Entfernung von der Bildmitte nimmt die Krümmung zu und man erkennt eine langwelligere, wellenförmige Struktur.

Ein vergleichbarer Effekt trat bei einer Messung mit dem $20 \mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv bei einer Tiefenlage von $s = 11,37 \mu\text{m}$ ($\alpha = 0,116^\circ$) auf und ist in Abbildung 4.20b zu sehen. Für die dargestellte Topographie wurde zunächst ein Unwrapping durchgeführt, bevor die langwellige Struktur sichtbar wurde.

Zur genaueren Einordnung dieses Phänomens müssten mit allen Systemen und Objektiv-

4. Ergebnisse

tiven systematische Messungen bei großen Tiefenlagen durchgeführt werden. Dies war im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

4.3. Größenordnungen

Zur besseren Einordnung von Auftreten und Auswirkungen der einzelnen Phänomene wurden deren Größenordnungen für die unterschiedlichen Systeme, Objektive, Auswertungsmethoden und Modi zusammengestellt.

Die Bestimmung der Fehlergröße wäre algorithmisch sehr schwer realisierbar gewesen, da Ausreißer nicht berücksichtigt werden sollen. Daher wurden die Fehler, die die einzelnen Phänomene verursachen, für jede Messreihe aus den Topographien abgelesen. Da es sich um die Abschätzung eines Fehlers handelt, wurde kein zusätzlicher Ablesefehler angegeben. Die Übersichtstabellen dienen einer ersten Einschätzung der Genauigkeiten, die mit dem jeweiligen Aufbau erreicht werden können. Bis auf starke Ausreißer wurde immer der maximal erreichte Wert als Fehler angenommen, um den maximalen Systemfehler zu bestimmen.

Der Gesamtfehler eines Systems mit einem bestimmten Objektiv ist die Summe von statistischem und systematischem Fehler. Möchte man diesen bestimmen, so müssen auch die Tabellen 4.1 und 4.2 aus Abschnitt 4.1 in Betracht gezogen werden.

4.3.1. System 1 mit Mirau-Objektiv

Bei System 1 ist nur das Mirau-Objektiv verfügbar, allerdings muss man zwischen den beiden Modi EXTTQP und konstante Geschwindigkeit unterscheiden. Die Größenordnungen der einzelnen Phänomene im Modus konstante Geschwindigkeit sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Bei der Phasenauswertung ist die Höhe der kleinen Sprunggrenzen bei steigender Schräglage in etwa konstant. Die Ringstruktur tritt nur bei der Hüllkurvenauswertung auf, bei der Phasenauswertung sind an der gleichen Stelle im Bild ab einer Tiefenlage von $s = 2,89 \mu\text{m}$ Phasensprünge zu beobachten. Diese sind einfach, d.h. haben maximal die Höhe einer interferometrischen Wellenlänge, treten jedoch oberhalb und unterhalb der mittleren Ebene der Topographie auf. Daher wurde als Fehler die doppelte Höhe eines Phasensprungs eingetragen.

Ein Erklärungsansatz dafür, dass hier auch keine kleinen Sprunggrenzen beobachtet werden, wurde bereits in Abschnitt 4.2.3 geliefert. Die Ringstruktur tritt ab einer Tiefenlage von $s = 1,39 \mu\text{m}$ und damit etwas früher als die zugehörigen Phasensprünge auf. Ihre Höhe nimmt mit steigender Schräglage zu.

	Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
Offset-Topographie [nm]	12	60
Ripples [nm]	14	100
Kl. Sprunggrenzen [nm]	11	Tritt nicht auf
Ringstruktur [nm]	Tritt nicht auf	280
Phasensprünge [nm]	652	Tritt nicht auf

Tab. 4.4.: Übersicht der durch die einzelnen Phänomene verursachten Fehler mit den Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, konstante Geschwindigkeit.

Der größte Fehler wird beim System 1 mit Mirau-Objektiv von den Phasensprüngen verursacht, die vermutlich durch die Ringstruktur bedingt sind. Geht man davon aus, dass dieser durch eine optimale Justage der Optik behoben werden kann und somit auch keine Phasensprünge in der Phasenauswertung auftreten würden, könnte man hier eine Genauigkeit von 14 nm erreichen.

Die Ergebnisse für den EXTTQP-Modus sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Insgesamt ist in Bezug auf die Phänomene kein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Modi erkennbar, was die Genauigkeit des Systems betrifft.

	Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
Offset-Topographie [nm]	12	60
Ripples [nm]	5	90
Kl. Sprunggrenzen [nm]	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf
Ringstruktur [nm]	Tritt nicht auf	300
Phasensprünge [nm]	652	Tritt nicht auf

Tab. 4.5.: Übersicht der durch die einzelnen Phänomene verursachten Fehler mit den Messbedingungen: System 1, Mirau-Objektiv, EXTTQP.

4.3.2. System 2 mit Mirau-Objektiv

Wie in den Abschnitten 4.2.4 und 4.2.5 erwähnt, treten beim System 2 mit Mirau-Objektiv Ringstruktur und Phasensprünge auch bei maximaler Tiefenlage von $s = 6, 12 \mu\text{m}$ nicht auf. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeiten für Phasen- und Hüllkurvenauswertung gegenüber System 1.

4. Ergebnisse

	Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
Offset-Topographie [nm]	10	90
Ripples [nm]	15	100
Kl. Sprunggrenzen [nm]	13	Tritt nicht auf
Ringstruktur [nm]	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf
Phasensprünge [nm]	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf

Tab. 4.6.: Übersicht der durch die einzelnen Phänomene verursachten Fehler mit den Messbedingungen: System 2, Mirau-Objektiv, konstante Geschwindigkeit.

Bei diesem Aufbau ist die Phasenauswertung fast um den Faktor 10 genauer als die Hüllkurvenauswertung, wie in Tabelle 4.6 dargestellt.

Insgesamt können mit diesem System demnach Genauigkeiten von bis zu 15 nm erreicht werden.

4.3.3. System 2 mit 20 μ m-Michelson-Objektiv

Bei der Phasenauswertung mit dem 20 μ m-Michelson-Objektiv fällt die Höhe der Offset-Struktur in Tabelle 4.7 im Vergleich zum Mirau-Objektiv auf. Da dieser Fehler jedoch mit dem Einmessen der Offset-Topographie behoben werden kann, wirkt er sich auf die zu erreichende Messgenauigkeit nicht aus. Es treten einfache Phasensprünge in beiden Richtungen ab einer Tiefenlage von $s = 2,16 \mu\text{m}$ auf, deren Anzahl stark schwankt. Die langwellige Struktur wurde für Phasen- und Hüllkurvenauswertung ab einer Tiefenlage von $s = 11,3 \mu\text{m}$ beobachtet. Die Höhe scheint dabei konstant zu sein, jedoch kann aufgrund der geringen Datenmenge, die für diesen Tiefenbereich vorliegt, keine eindeutige Aussage über die Größenordnung getroffen werden. Der zugehörige Eintrag in der Tabelle

	Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
Offset-Topographie [nm]	280	300
Ripples [nm]	8	100
Kl. Sprunggrenzen [nm]	14	Tritt nicht auf
Ringstruktur [nm]	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf
Phasensprünge [nm]	652	Tritt nicht auf
Langwellige Struktur [nm]	90	100

Tab. 4.7.: Übersicht der durch die einzelnen Phänomene verursachten Fehler mit den Messbedingungen: System 2, 20 μ m-Michelson-Objektiv, konstante Geschwindigkeit.

stellt daher nur eine erste Tendenz dar.

Nach Abzug der Offset-Topographie weist hier die Hüllkurvenauswertung mit ca. 100 nm einen deutlich geringeren Fehler auf als die Phasenauswertung mit ca. 652 nm. Auch nach Korrektur der Phasensprünge, zum Beispiel durch ein Unwrapping, beträgt der minimale Fehler beim System 2 mit 20 μ m-Michelson-Objektiv 90 nm.

4.3.4. System 2 mit 5 μ m-Michelson-Objektiv

Bei der Phasenauswertung sind Offset-Topographie, Höhe der Ripples und kleine Sprunggrenzen in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei den bereits beschriebenen Objektiven. Der durch die Phasensprünge verursachte Fehler ist jedoch höher als bisher, es kommen einfache Phasensprünge in einer Richtung und zweifache Phasensprünge, d.h. Sprünge über zwei Perioden im Interferogramm, in der anderen Richtung vor. Damit ergibt sich ein Fehler von $\frac{3}{2}\lambda$ (siehe Tabelle 4.8). Zudem treten bereits bei gerader Ausrichtung trotz Einmessung eines Phasenoffsets einige Phasensprünge auf. Grund hierfür

	Phasenauswertung	Hüllkurvenauswertung
Offset-Topographie [nm]	17	350
Ripples [nm]	4	100
Kl. Sprunggrenzen [nm]	16	Tritt nicht auf
Ringstruktur [nm]	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf
Phasensprünge [nm]	978	Tritt nicht auf
Langwellige Struktur [nm]	120	120

Tab. 4.8.: Übersicht der durch die einzelnen Phänomene verursachten Fehler mit den Messbedingungen: System 2, 5 μ m-Michelson-Objektiv, konstante Geschwindigkeit.

könnte die in Abschnitt 4.2.5 beschriebene, starke Schwankung des Phasenoffsets sein.

Die langwellige Struktur wurde bei Phasen- und Hüllkurvenauswertung nur in einer einzigen Topographie bei der maximal eingestellten Tiefenlage von $s = 12,4 \mu\text{m}$ beobachtet. Daher ist der angegebene Wert in der Tabelle wenig aussagekräftig.

Bei diesem Objektiv wäre ohne Korrektur der Phasensprünge die Hüllkurvenauswertung genauer. Mit einer Korrektur durch das Unwrapping könnte eine maximale Genauigkeit von 120 nm erreicht werden.

4.3.5. System 2 mit 10 μ m-Michelson-Objektiv

Das 10 μ m-Michelson-Objektiv ist aufgrund seines gewölbten Referenzspiegels nur schwer mit den anderen Objektiven vergleichbar. Erfolgt das Einmessen einer Offset-Topographie bei gerader Ausrichtung, so kann die Wölbung durch den Offset-Abzug nachträglich aus der Topographie eliminiert werden. Bei Schräglage wandert jedoch das Zentrum der Wölbung im Bildfeld und somit stimmt die Schräglage der Offset-Topographie an einem Bildpunkt nicht mehr mit der tatsächlichen Schräglage überein. Da sich, wie bereits gezeigt, auch der Phasenoffset mit der Schräglage ändert, kann die Phasenauswertung für dieses Objektiv nicht sinnvoll genutzt werden. Es sind daher nur Ergebnisse der Hüllkurvenauswertung in Tabelle 4.9 dargestellt. Für eine Beurteilung der zugrundeliegenden Struktur

	Hüllkurvenauswertung
Offset-Topographie [nm]	-
Ripples [nm]	150
Langwellige Struktur [nm]	170

Tab. 4.9.: Übersicht der durch die einzelnen Phänomene verursachten Fehler mit den Messbedingungen: System 2, 10 μ m-Michelson-Objektiv, konstante Geschwindigkeit.

der Offset-Topographie, müsste eine Kugel eingepasst und abgezogen werden. Dies wurde nicht durchgeführt, da der Fehler durch den Offset-Abzug ohnehin behoben wird. Für die Beurteilung der langwelligen Struktur liegt in diesem Fall eine ganze Messreihe vor, da sie aufgrund der Krümmung in jedem Bild auftritt. Die Höhe ist dabei gleichbleibend, allerdings ist die Struktur zeitlich nicht konstant. Allgemein eignet sich das Objektiv durch den gekrümmten Referenzspiegel nicht, um Proben hochgenau zu vermessen.

4.4. Einordnung der Ergebnisse

Zusammenfassend können einige allgemeine Aussagen getroffen werden. So treten Ripples und Phasensprüngen bei unterschiedlichen Objektiven unter ähnlichen Tiefenlagen und nicht unter ähnlichen Winkeln auf. Der Grund dafür ist, dass Ripples ein Tiefeneffekt sind und sich der Phasenoffset mit der Schräglage ändert.

Aus den Ergebnissen kann man schließen, dass die Kamera und die wechselbaren Objektive von System 2 vermutlich am besten zueinander ausgerichtet sind.

In Bezug auf die Objektive hat sich das Mirau-Objektiv als das genaueste erwiesen, da

hier am System 2 selbst unter Schräglage keine Phasensprünge auftreten. Somit können Genauigkeiten im zweistelligen Nanometerbereich erreicht werden, wenn nur relative Größen, wie zum Beispiel die Rauigkeit einer Oberfläche, vermessen werden sollen. Im Allgemeinen muss man jedoch je nach Probe und Messaufgabe abwägen, welches Bildfeld und somit welches Objektiv am geeignetsten ist. Das $10\mu\text{m}$ -Michelson-Objektiv eignet sich aufgrund des gewölbten Referenzspiegels kaum für praktische Zwecke und die Vermessung unbekannter Proben.

Möchte man eine absolute Höhe messen, so müssen die Einflüsse des Motors berücksichtigt werden, da dieser die zeitliche Schwankung der Topographie bestimmt. Hier hat sich der Tauchspulenmotor im EXTTQP-Modus mit einem Fehler von ca. 100 nm als die genaueste Lösung erwiesen. Verwendet man hingegen eine Linearachse wie bei System 2, so ist der durch die Schwankung verursachte Fehler mit ca. 500 nm fünf mal größer.

Bei der Entscheidung, welche Auswertungsmöglichkeit die besten Ergebnisse liefert, spielt erneut die zu vermessende Probe eine große Rolle. Werden die Phasensprünge nachträglich durch ein Unwrapping korrigiert, so ist in jedem Fall die Phasenauswertung genauer. Das Unwrapping funktioniert aber wie bereits erklärt nur bei Proben mit einem hinreichend stetigen Verlauf der Oberfläche zuverlässig. Möchte man eine Probe vermessen, die eine gröbere Struktur und Schräglagen, zum Beispiel durch Flanken, aufweist, so eignet sich die Hüllkurvenauswertung besser. Je nach Objektiv können Schräglagen ab einer bestimmten Größe gar nicht mehr vermessen werden.

Für viele Phänomene konnte bereits ein Verfahren zur Behebung entwickelt werden. Neben der nachträglichen Korrektur durch das Unwrapping können Phasensprünge durch das vorherige Einmessen eines Phasenoffsets vermieden werden, wenn dieser hinreichend konstant ist. Die Ringstruktur wird durch eine optimale Justage der Optik vermieden, während die Offset-Topographie durch den Offset-Abzug korrigiert werden kann. Der durch Ripples und kleine Sprünge verursachte Fehler ist derart klein, dass er keine großen Auswirkungen auf die Messgenauigkeit hat. Lediglich die langwellige Struktur müsste noch systematisch untersucht werden, da sie bei großen Schräglagen einen hohen Fehler bewirkt.

Nach Anwendung aller aufgeführten Korrekturverfahren können Genauigkeiten im zweistelligen Nanometerbereich erzielt werden.

5. Schlussbetrachtungen

Ziel der Arbeit war eine Genauigkeitsanalyse eines neuartigen, sehr schnellen Topographiesensors auf Basis der Weißlichtinterferometrie. Zu diesem Zweck wurde eine Charakterisierung von drei Systemen mit insgesamt vier unterschiedlichen Objektiven durchgeführt. Dabei sollte herausgearbeitet werden, welche Parameterkombination die besten Ergebnisse liefern. Des Weiteren standen die Bestimmung der Grenzen des jeweiligen Systems sowie der potenziell erreichbaren Messgenauigkeit im Fokus.

Für einige Kombinationen konnten im Rahmen dieser Arbeit statistische und systematische Fehler quantifiziert werden. Zudem konnte angegeben werden, unter welchen Bedingungen Fehler auftreten und welche Parameter somit für eine bestimmte Probe gewählt werden sollten.

Gerade bei kleineren Fehlern im zweistelligen Nanometerbereich stellt sich die Frage, ob diese nicht andere Genauigkeiten, wie beispielsweise die der Ablesemethode, unterschreiten. Wie bereits erwähnt, sollen die angegebenen Fehler jedoch nur einer Einschätzung der Größenordnung dienen. Zweck der Untersuchungen war somit nicht, die Höhe der Offset-Topographie auf Nanometer genau angeben zu können, sondern die einzelnen Phänomene nach Größe ihres Einflusses zu ordnen und dadurch zu bestimmen, welche von ihnen das Messverfahren erheblich beeinträchtigen. Für diese Phänomene wurden dann gezielt weitere Untersuchungen durchgeführt.

Bei den statistischen Untersuchungen wurde bewusst ein Bildpunkt mit einer geringen Standardabweichung betrachtet, um die Überlagerung mit Phasensprüngen auszuschließen und ein doppeltes Eingehen des hierdurch verursachten Fehlers zu vermeiden. Durch diese manuelle Auswahl kann jedoch nicht gewährleistet werden, dass der maximale statistische Fehler des jeweiligen Systems gefunden wurde. Im Allgemeinen war eine eindeutige Unterscheidung zwischen den einzelnen Phänomenen und dem jeweils verursachten Fehler nicht immer einfach.

Wie bereits in den Kapiteln zu den einzelnen Phänomenen aufgeführt, sind einige Fragestellungen offen geblieben. So konnte die Ursache für die Ripples nicht bestimmt werden.

5. Schlussbetrachtungen

Für die kleinen Sprunggrenzen hingegen liegt ein Ansatz für Entstehungsgründe und weitere Untersuchungen vor.

Zur Vervollständigung der Ergebnisse müssten systematische Untersuchungen bei höheren Schräglagen sowie statistische Untersuchungen für die restlichen Objekte durchgeführt werden. Zudem wären auch statistische Untersuchungen unter anderen Bedingungen, wie zum Beispiel Schräglage, von Interesse.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Linearität des Messbereichs. Erhält man stets das gleiche Ergebnis, wenn man die Probe im Messvolumen, d. h. in z-Richtung verschiebt? Aufgrund des zeitlichen Rahmens der Arbeit war die Betrachtung dieser Aspekte nicht mehr möglich.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die wichtigsten Fehler behoben werden konnten bzw. generell korrigierbar sind. Damit sind bereits jetzt hochgenaue Messungen möglich.

A. Datenblatt der Lichtquelle

LR W5SN, LA W5SN, LY W5SN

Kennwerte
Characteristics
($T_S = 25\text{ °C}$)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Werte Values			Einheit Unit
		red	amber	yellow	
Wellenlänge des emittierten Lichtes Wavelength at peak emission $I_F = 700\text{ mA}$	λ_{peak}	632	624	597	nm
Dominantwellenlänge ³⁾ Seite 20 Dominant wavelength ³⁾ page 20 $I_F = 700\text{ mA}$	(min.) λ_{dom} (typ.) λ_{dom} (max.) λ_{dom}	620 625 632	612 617* 624	583 590* 595	nm nm nm
Spektrale Bandbreite bei 50 % $\Phi_{\text{rel max}}$ Spectral bandwidth at 50 % $\Phi_{\text{rel max}}$ $I_F = 700\text{ mA}$	(typ.) $\Delta\lambda$	18	18	18	nm
Abstrahlwinkel bei 50 % I_V (Vollwinkel) Viewing angle at 50 % I_V	(typ.) 2ϕ	120	120	120	Grad deg.
Durchlassspannung ⁴⁾ Seite 20 Forward voltage ⁴⁾ page 20 $I_F = 700\text{ mA}$	(min.) V_F (typ.) V_F (max.) V_F	2.1 2.45 3.3	2.1 2.5 3.3	2.1 2.55 3.3	V V V
Sperrstrom Reverse current	(max.) I_R I_R	not designed for reverse operation			
Wärmewiderstand Thermal resistance Sperrschicht/Lötpad Junction/solder point	(typ.) $R_{\text{th JS}}$ (max.) $R_{\text{th JS}}$	6.5 11**	6.5 11**	6.5 11**	K/W K/W

* Einzelgruppen siehe Seite 5
Individual groups on page 5

** $R_{\text{th}}(\text{max})$ basiert auf statistischen Werten
 $R_{\text{th}}(\text{max})$ is based on statistic values

Literaturverzeichnis

- [1] A. A. Michelson, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science **34 (203)**, 333 (1887)
- [2] A. A. Michelson, *Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'ondes lumineuses*, Paris : Gauthier-Villars (1895)
- [3] L. Mach, *Ueber einen Interferenzrefraktor*, Zeitschrift für Instrumentenkunde **12**, 89 (1892)
- [4] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2*, pages 318–327, Springer, 5 edition (2009)
- [5] A. A. Michelson, *On the Correction of Optical Surfaces*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **4 (7)**, 210 (1918)
- [6] P. de Groot, et al., *Determination of fringe order in white-light interference microscopy*, Applied Optics **41 (22)**, 4571 (2001)
- [7] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2*, pages 313–315, Springer, 5 edition (2009)
- [8] B. S. Lee, et al., *Profilometry with a coherence scanning microscope*, Applied Optics **29 (26)**, 3784 (1990)
- [9] P. Hariharan, *Optical Interferometry*, pages 24–25, Elsevier Science, 2 edition (2003)
- [10] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2*, pages 307–308, Springer, 5 edition (2009)
- [11] P. de Groot, *Optical Measurement of Surface Topography*, chapter 8, R. Leach, Springer Verlag (2011)
- [12] Heliotis, *Manual: Helicam 3.0 Camera (Quelle nicht öffentlich zugänglich)*
- [13] P. Lambelet, *Parallel Optical Coherence Tomography (pOCT) for industrial 3D inspection (Quelle nicht öffentlich zugänglich)*, Proc. of SPIE **808** (2011)
- [14] A. Harasaki, et al., *Improved vertical-scanning interferometry*, Applied Optics **39 (13)**, 2107 (2000)

Literaturverzeichnis

- [15] R. Goldstein, et al., *Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping*, Radio Science **23** (4), 713 (1998)
- [16] P. de Groot, *Vibration in phase-shifting interferometry*, Optical Society of America **12** (2), 354 (1995)

Danksagung

Zunächst möchte ich mich ganz besonders bei meinem Betreuer Dr. Karsten Roetmann bedanken, der mich während der gesamten Zeit unterstützt hat. Durch seine Hinweise, Vorschläge und kritischen Fragen bezüglich der Bachelorarbeit konnte ich viel lernen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei der gesamten Abteilung Technik und Verfahren der Mahr GmbH Göttingen. Insbesondere möchte ich an dieser Stelle Nicolai Schäffer erwähnen, der mir bei experimentellen Fragen stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Allgemein wurde ich in der Arbeitsgruppe sehr freundlich aufgenommen und ich bin dankbar über die Möglichkeit, meine Bachelorarbeit bei der Firma Mahr schreiben zu können und somit einen Einblick in das Unternehmen zu erhalten.

In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank auch Prof. Dr. Arnulf Quadt, der sich dazu bereit erklärt hat diese externe Arbeit zu betreuen und sich dafür stets viel Zeit genommen hat.

Erklärung

nach §13(9) der Prüfungsordnung für den Bachelor-Studiengang Physik und den Master-Studiengang Physik an der Universität Göttingen:

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Darüberhinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, im Rahmen einer nichtbestandenen Prüfung an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Göttingen, den 25. April 2015

(Aline Leun)