

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:

Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik

Förderkennzeichen:

16SV1945 - μ geoMess

Vorhabensbezeichnung:

Verbundprojekt: Prüfung und Bewertung geometrischer Merkmale in der
Mikrosystemtechnik

Teilvorhaben: Verbesserung der 3D-Messgenauigkeit bei der Prüfung von MST-
Bauteilen mittels Weißlichtinterferometrie

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2005 – 30.06.2008

Institutsleiter:

Prof. Dr. W. Osten



Inhaltsverzeichnis

1	Messtechnik für MST-Bauteile	3
1.1	Merkmale bei 2D- und 3D-Messungen	3
1.2	Defizite der bestehenden optischen Messtechnik	3
1.3	Aufgabenstellung	4
2	Kombiniertes taktilen, optisches Messsystem	4
2.1	Aufbau	4
2.2	Optische Messprinzipien	4
2.3	Kombinierte Bauweise	5
2.4	Stitching von Messfeldern	6
2.5	Integration des Tasters	7
2.6	Beleuchtung und Beobachtung des Tastermessfeldes	8
3	Weißlichtinterferometrie	11
3.1	Spiegelnde, geneigte und gekrümmte Oberflächen	14
3.1.1	Messungen	14
3.1.2	Modellbildung	16
3.1.3	Simulationen	18
3.1.4	Lösungsansätze zur Verbesserung der 3D-Genauigkeit bei spiegelnden, geneigten und gekrümmten Oberflächen	19
3.2	Stufenobjekte	20
3.2.1	Messungen	20
3.2.2	Modellbildung	21
3.2.3	Simulationen	21
3.2.4	Lösungsansätze zur Verbesserung der 3D-Genauigkeit bei Stufenobjekten	22
4	Zusammenfassung	22
5	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	23
6	Literaturverzeichnis	24

1 Messtechnik für MST-Bauteile

1.1 Merkmale bei 2D- und 3D-Messungen

Mit der optischen Messtechnik sind insbesondere auch schnelle und flächige 2D- und 3D-Messungen möglich. Die Messaufgabe legt dabei fest, welche Merkmale des MST-Bauteils von Interesse sind. Für Objekte im statischen Zustand sind typische Merkmale in Tabelle 1 zusammengefasst.

Merkmale bei 2D-Messungen (Flächiges Bild des Objekts)	Merkmale bei 3D-Messungen (Oberflächenpunkte im Raum)
Abstände, Winkel, Radien, ...	Abstände, Winkel, Radien, ...
Abweichung von 2D-Formen (Kreis, Ellipse, Rechteck, ...)	Abweichung von 3D-Regelgeometrien (Kugel, Zylinder, Würfel, ...)
Farbverteilung	Rauheit
...	...

Tabelle 1: Typische Merkmale bei optischen 2D- und 3D-Messungen.

1.2 Defizite der bestehenden optischen Messtechnik

In der Mikrotechnik bestehen Defizite an Mess- und Prüftechnik hinsichtlich Flexibilität, Messgeschwindigkeit, Genauigkeit, Qualitätsbewertung der Messergebnisse und fertigungsnaher Einsetzbarkeit bei vertretbaren Gerätekosten. Geometrische Messaufgaben an Mikrosystemen werden, wenn sie überhaupt gelöst werden können, durch spezialisierte Messsysteme bewältigt, welche jeweils nur eine begrenzte Anzahl von Geometriemerkmale erfassen können.

Die schnelle Erfassung lateraler Dimensionen kann häufig auf der Grundlage der rechnergestützten Auswertung digitaler lichtmikroskopischer Aufnahmen erfolgen. Allerdings gibt es hier einen Bedarf an Verbesserungen hinsichtlich der lateralen Auflösung beispielsweise bei der Lokalisation von Kanten.

Soll zusätzlich die Tiefeninformation auch an gestuften Objekten erfasst werden, stellt die Weißlichtinterferometrie mit der vom Messfeld unabhängigen Tiefenauflösung eine ideale Ergänzung dar. Bei Testmessungen wurden jedoch systematische Abweichungen zwischen der Einhüllenden- und der Phasenauswertung festgestellt. Auffälligkeiten traten insbesondere bei der Messung an Kanten und bei spiegelnden, geneigten und gekrümmten Objekten auf.

1.3 Aufgabenstellung

Die Ziele des Teilvorhabens sind die Verringerung der in der MST bestehenden Defizite an Mess- und Prüftechnik hinsichtlich der Genauigkeit der Messergebnisse. Dazu muss die Messunsicherheit insbesondere bei der Messung von Kanten und geneigten, spiegelnden Oberflächen sowie deren Ursachen analysiert und unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten entwickelt werden. An zentraler Stelle stehen Modellierungen des bestehenden Weißlichtinterferometers zur Durchführung numerischer Simulationen.

2 Kombiniertes taktiles, optisches Messsystem

2.1 Aufbau

Während des Projekts wurden ein Lichtmikroskop, ein Weißlichtinterferometer und ein taktile Mikrotaster zu einem Gesamtmesssystem kombiniert. Neuartig sind dabei insbesondere das geringe Volumen der optischen Mikroskope für 2D- und 3D-Messungen und der Aufbau des Mikrotasters in Silizium-Technik. Die Kombination der beiden optischen Mikroskope erfolgt mit einem Spezialobjektiv, das innerhalb des Gesamtvorhabens entwickelt wurde.

2.2 Optische Messprinzipien

Dem Lichtmikroskop und dem Weißlichtinterferometer nach Mirau-Anordnung liegt jeweils ein mikroskopischer Strahlengang zugrunde (Abbildung 1). Das Licht einer ausgedehnten Quelle wird dabei über einen Strahlteiler in die Pupille des Messobjektivs abgebildet. Die Abbildung des Messfeldes erfolgt über das auf unendlich korrigierte Mikroskopobjektiv und eine Tubuslinse. Bei dem Detektor handelt es sich um eine CCD-Kamera mit 640 x 480 Pixel. Der Referenzarm des Weißlichtinterferometers ist im Mirau-Objektiv integriert, wodurch sich insgesamt eine sehr kompakte Bauweise ergibt. Im Teilvorhaben wurde ein 20x-Mirau-Objektiv mit einer numerischen Apertur von 0,4 verwendet.

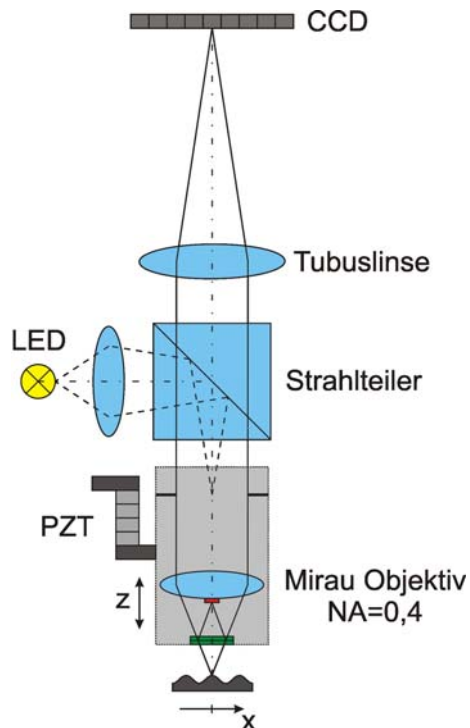


Abb. 1: Optischer Strahlengang des Weißlichtinterferometers mit Mirau-Objektiv.

2.3 Kombinierte Bauweise

Um auch beim Wechsel zwischen den beiden Messmodi (2D- und 3D-Messungen) dasselbe Mikroskopobjektiv verwenden zu können, wird eine spektrale Trennung vorgenommen. Dazu werden zwei Lichtquellen mit unterschiedlichen Spektralbereichen eingesetzt. Die Aufteilung erfolgt bei einer Wellenlänge von ca. 500 nm.

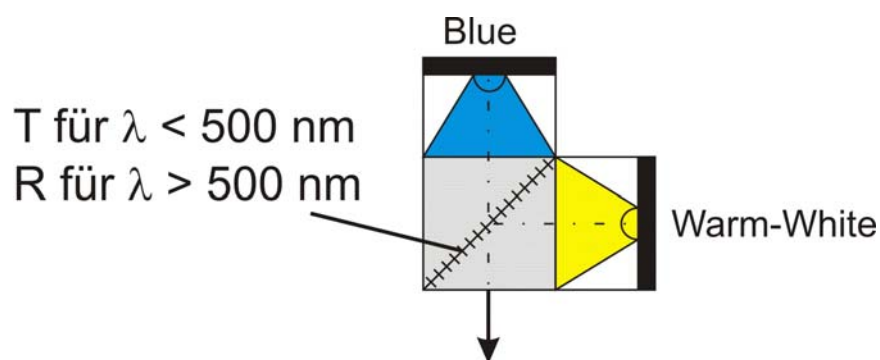


Abb. 2: Kombinierte LED-Beleuchtung.

Der Strahlteilerwürfel in Abbildung 2 weist eine wellenlängenselektive Schicht auf, so dass Licht unterhalb einer Wellenlänge von 500 nm transmittiert, während Licht oberhalb von 500 nm hauptsächlich reflektiert wird. Weitere FarbfILTER sind bei Einsatz dieses Strahlteilers im Beleuchtungsstrahlengang nicht notwendig.

Die Strahlteilerplatte im Mirau-Objektiv weist ebenfalls eine wellenlängenselektive Schicht auf, so dass dieses das Licht der blauen LED transmittiert. Bei Verwendung des weißen Lichts oberhalb von 500 nm wird das Licht – wie in einem konventionellen Mirau-Objektiv – in Objekt- und Referenzarm aufgespalten (Abbildung 3).

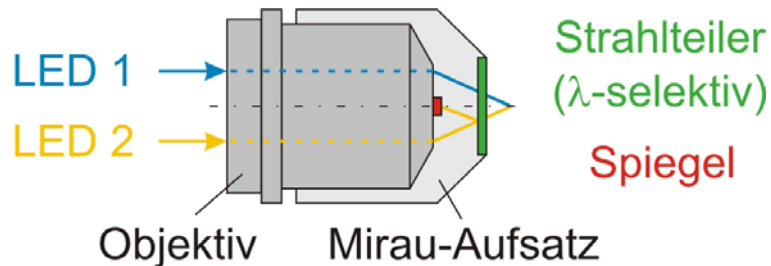


Abb. 3: Funktionsweise des Spezialobjektivs, welches innerhalb des Gesamtvorhabens durch die Projektpartner entwickelt und gebaut wurde.

2.4 Stitching von Messfeldern

Stitching bezeichnet das Zusammenfügen von Einzelmessfeldern zu einer größeren Topografie. Die Einzelmessfelder überlappen sich typischerweise um 10-20 %. Sind die Einzelmessfelder lateral versetzt, so können relativ einfache Algorithmen zum Zusammenfügen eingesetzt werden. In der Regel werden dazu die Positionen des x-y-Verfahrtes bei der Durchführung der Einzelmessungen verwendet. Je größer die Vergrößerung des Objektivs ist, umso höhere Anforderungen werden jedoch auch an den x-y-Verfahrtes gestellt. U.U. wird ein Versatz in der zusammengesetzten Messung sichtbar. Kann die Position der Linearachsen nicht ausgelesen werden, so kann auch ein Algorithmus mit Korrelation der Einzelmessfelder zum Einsatz kommen [1].

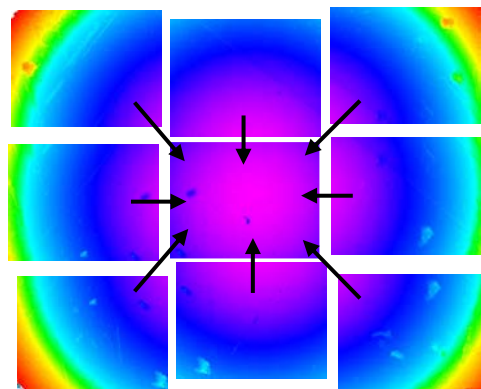


Abb. 4: Stitching von Einzelmessfeldern.

Wird das Objekt zwischen der Aufnahme der Einzelmessungen aus der Messebene herausbewegt – z.B. durch eine Rotation – so ist es zunächst nötig, die Punktwolken der Einzelmessungen in ein Polygonnetz zu überführen. Aus der Literatur sind Algorithmen bekannt, die anschließend die einzelnen Messungen zusammenführen. Auch für die Beseitigung von Lücken im Polygonnetz sind Algorithmen aus der Literatur bekannt [2-6].

2.5 Integration des Tasters

Es wurde eine Studie zur Integration des Tasters in das Gesamtmesssystem durchgeführt (Abbildung 4). Zur Beobachtung wird entweder eine zusätzliche Kamera eingesetzt oder die bereits im Messsystem vorhandene Kamera mit verwendet. Im Projekt wurde die Lösung 4.1 favorisiert. Dabei wird ein flexibles Endoskop eingesetzt, welches die Vorteile einer hohen Schärfentiefe und der Beobachtungsmöglichkeit in allen Tasterpositionen verknüpft. Für den Demonstrator wurde jedoch zunächst die kostengünstigere Alternative nach Lösung 1.1 umgesetzt.

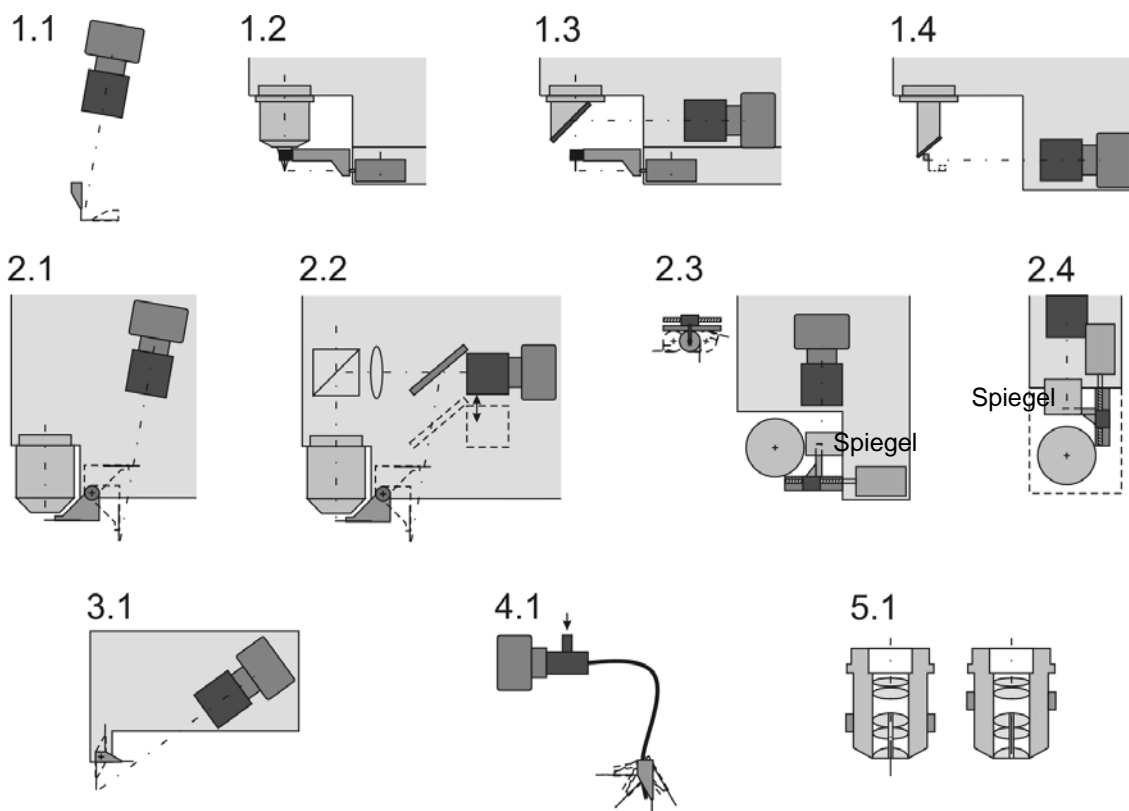


Abb. 5: Studie zur Integration des Mikrotasters in das Gesamtmesssystem. Die Abbildung des Tasters erfolgt bei verschiedenen Ausrichtungen zum Objekt.

Grundsätzlich muss der Taster beim Anmessen des Objekts in allen drei Raumrichtungen positioniert werden. Deshalb kann es sinnvoll sein, dass der Taster gleichzeitig sowohl aus der nahezu senkrechten als auch aus der nahezu waagerechten Richtung beobachtet wird. In Lösung 1.4, 2.3 und 2.4 der obigen Studie wird dies durch Integration eines Umlenkspiegels und durch eine numerische Aufteilung des Kamera-Chips in zwei Bereiche erreicht (Abbildung 6).

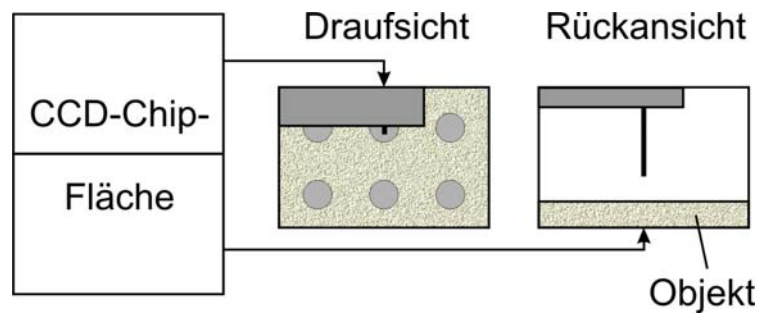


Abb. 6: Aufgeteilte Kamera-Chipfläche zur Beobachtung des Tasters aus zwei orthogonalen Richtungen (vgl. Lösung 1.4, 2.3, 2.4 der Studie zur Tasterintegration).

2.6 Beleuchtung und Beobachtung des Tastermessfeldes

In einer weiteren Studie wurden verschiedene Beobachtungsrichtungen für das Tastermessfeld analysiert (Abbildung 7).

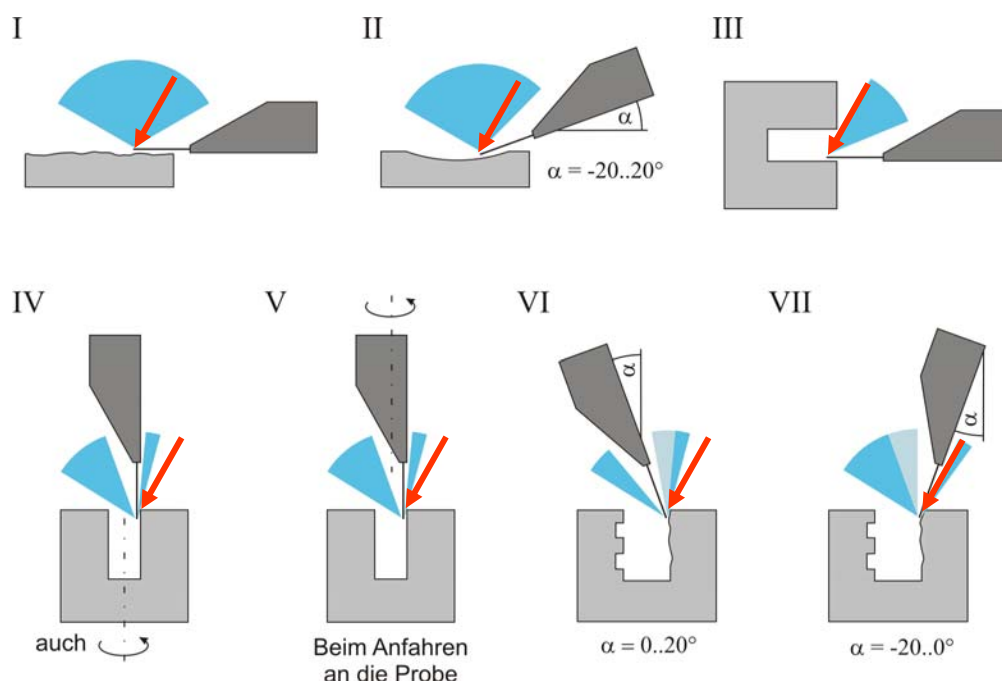


Abb. 7: Studie zu möglichen Beobachtungsrichtungen beim Anmessen verschiedener Objekte mit dem Mikrotaster.

Konventionelle Kamerasysteme mit Makroobjektiv weisen lediglich einen nur sehr begrenzten Schärfentiefebereich auf (Abbildung 8, links). Dadurch wird insbesondere die Positionierung des Tasters in senkrechter Stellung erschwert. Für das Projekt wurde deshalb eine Kamera mit erweitertem Schärfentiefebereich der Firma Gerwah Mikrotechnik vorgeschlagen. Weiterhin wurden erfolgreich Tests durchgeführt, um durch Generierung eines Schattenbildes die Positionierung des Tasters zu erleichtern. Abbildung 8 rechts zeigt den Mikrotaster in horizontaler Stellung beim Anmessen einer rauen Metalloberfläche mit Schattenbildgenerierung. Dabei werden der Mikrotaster und das Messobjekt unter einem Winkel von ca. 45° beleuchtet. Die Beobachtungsrichtung der Kamera ist senkrecht zum Messobjekt. Bei einer Änderung des Abstandes des Mikrotasters zur Oberfläche des Messobjekts ändert sich auch der Abstand des Schattenbildes zum Mikrotaster. Dadurch kann der Mikrotaster mit nur einer Beobachtungsrichtung in allen drei Raumrichtungen zum Messobjekt ausgerichtet werden, was insbesondere beim Antasten der Probe wichtig ist.

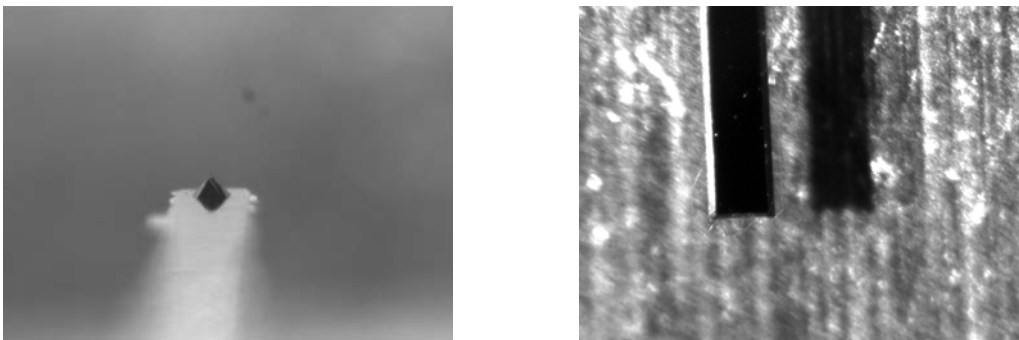


Abb. 8: Links: Aufnahme des Mikrotasters in senkrechter Position mit einem konventionellen Makroobjektiv; rechts: Generierung eines Schattens zur Unterstützung bei der Positionierung.

Basierend auf obigen Ergebnissen wurden mehrere Konzepte zur Beleuchtung und Beobachtung des Tasters entworfen (Abbildung 9). Außerdem wurde auch eine Marktrecherche zu kommerziell erhältlichen Komponenten durchgeführt.

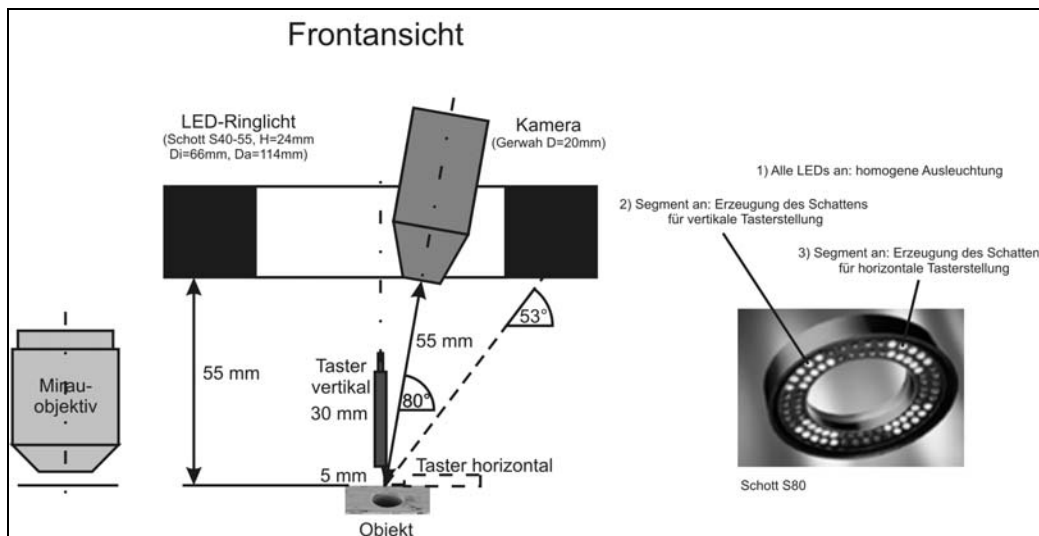
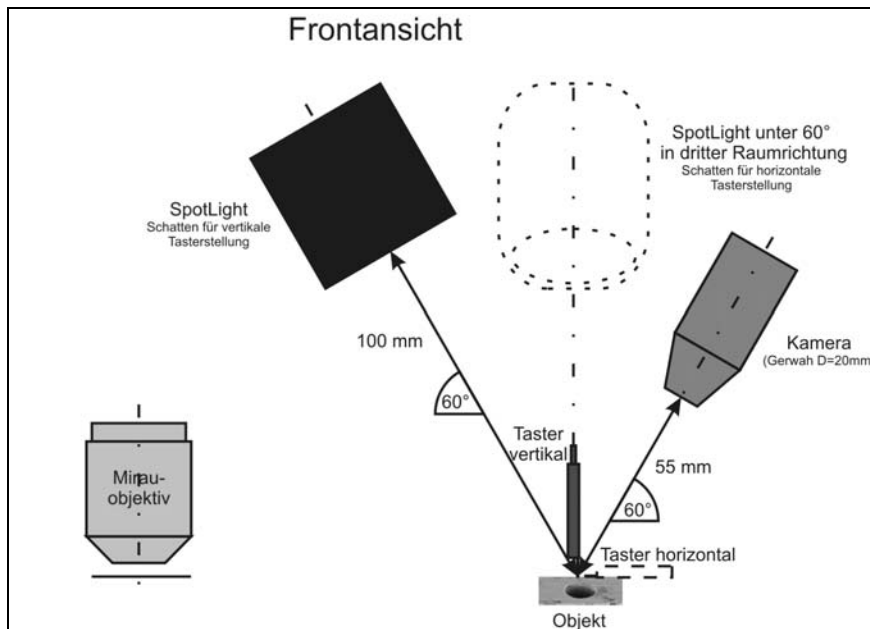
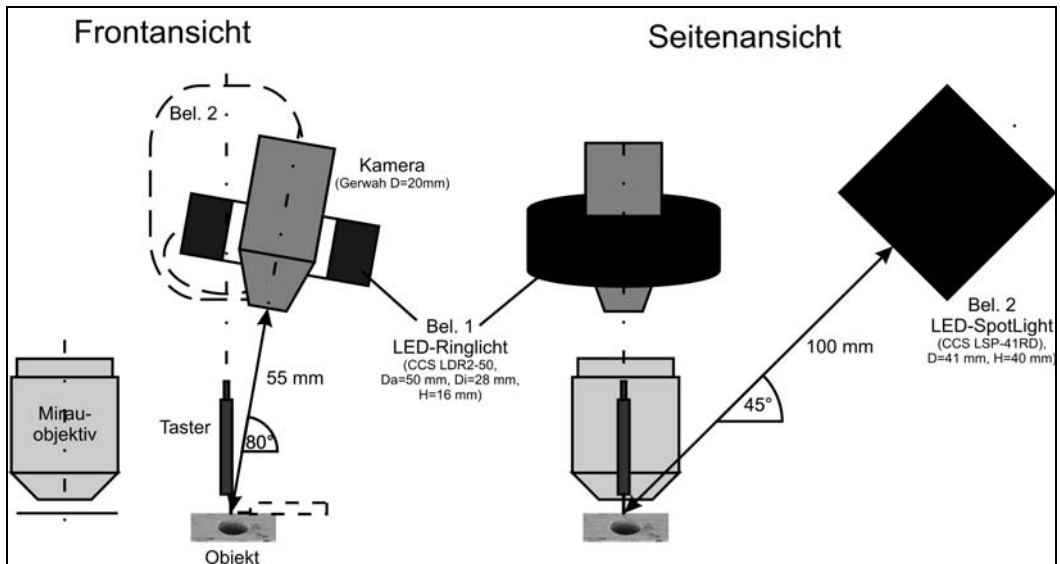


Abb. 9: Konzepte zur Beleuchtung und Beobachtung des Tasters.

3 Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie ist ein optisches 3D-Messverfahren für Messfelder in der mikroskopischen Skala, wobei vertikale Auflösungen von bis zu 0,1 nm erreicht werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass hierbei die vertikale Auflösung unabhängig von der numerischen Apertur des verwendeten Objektivs ist. Durch den Einsatz von kurzkohärentem Licht ergeben sich Messsignale, aus denen die Höhe jedes Objektpunktes absolut bestimmt werden kann. Die Messung von Stufenhöhen ist somit lediglich durch den Arbeitsabstand des Objektivs begrenzt und auch raue Oberflächen können mit der Weißlichtinterferometrie vermessen werden.

Im Projekt wurde ein Weißlichtinterferometer mit einem 20x-Mirau-Objektiv untersucht (Abbildung 10). Die numerische Apertur des Objektivs beträgt 0,4. Das Weißlichtinterferenz-Signal entsteht, wenn die Probe relativ zum Mirau-Objektiv bewegt wird.



Abb. 10: Experimentalaufbau des untersuchten Weißlichtinterferometers.

Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt eines Weißlichtinterferometers nach Michelson-Anordnung. Das Objekt weist eine Höhenstufe von 2 μm auf und besteht aus demselben Material wie der Referenzspiegel.

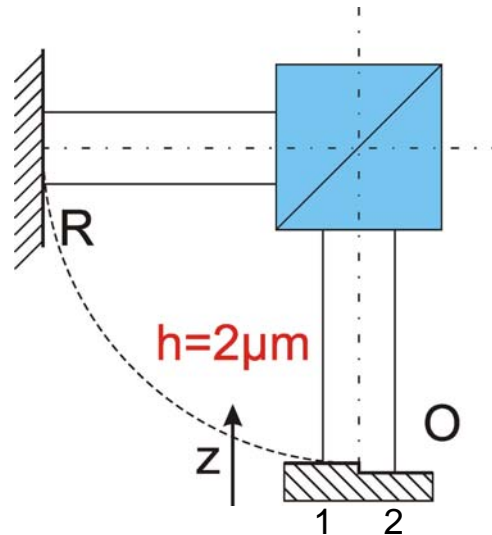


Abb. 11: Objekt- und Referenzarm eines Weißlichtinterferometers nach Michelson. Das Objekt besitzt eine Höhenstufe von $2\ \mu\text{m}$.

Bei einer idealen Signalentstehung treten an den Messstellen 1 und 2 folgende simulierte Signale auf.

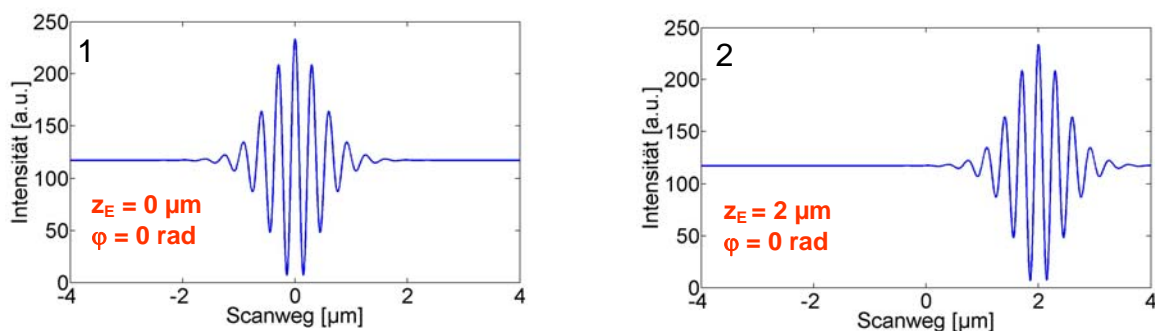


Abb. 12: Weißlichtinterferenz-Signale für die Objektpunkte 1 (links) und 2 (rechts). Die Phase am Einhüllendenmaximum beträgt in beiden Fällen null.

Die Auswertung der Weißlichtinterferenz-Signale kann zunächst auf Basis der Kohärenzinformation erfolgen, welche die Lage des Signals entlang des Scanwegs wiedergibt. Hier wurde ein Algorithmus angewendet, der die Position des Signals über dem Scanweg aus dem Schwerpunkt des Einhüllendensignals berechnet [7]. In einem weiteren Schritt kann auch die Phaseninformation mit verwendet werden. Bei den simulierten Signalen fällt auf, dass die Phase am Einhüllendenmaximum null beträgt, was generell für beliebige Stufenhöhen gilt.

Die Bestimmung der Signallage auf Basis der Kohärenzinformation ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Der bei der Auswertung berechnete Wert der Signallage kann folglich von der wahren Signallage abweichen. Die Phase am Einhüllendenmaximum ist somit ebenfalls von null verschieden und entspricht bei idealer Signalentstehung genau der Abweichung bei der Bestimmung der Signallage mittels Kohärenzinformation. Bei der Phasenauswertung können somit deutlich geringere Messunsicherheiten auftreten. Die Phasenauswertung bezeichnet die Berechnung der Objekthöhe bei Verwendung der Kohärenz- und der Phaseninformation:

$$z_p = z_c - \frac{\varphi}{k'} \quad (1)$$

z_p : Berechnete Objekthöhe unter Verwendung der Kohärenzinformation und der Phaseninformation

z_c : Berechnete Objekthöhe unter Verwendung der Kohärenzinformation

φ : Phasenwert am Einhüllendenmaximum

k' : Wellenzahl der feinperiodischen Sinusschwingung im Weißlichtinterferenz-Signal

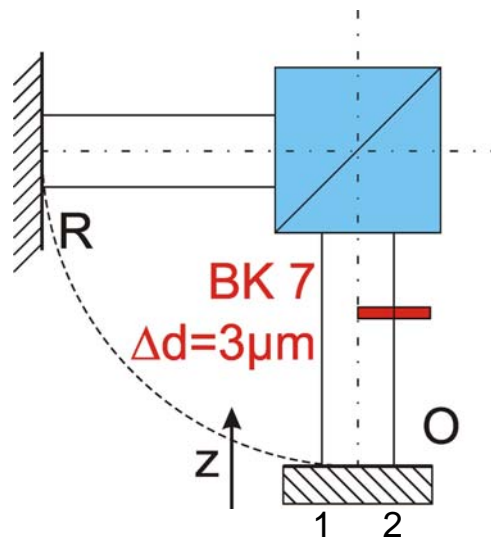


Abb. 13: Objekt- und Referenzarm eines Weißlichtinterferometers nach Michelson. Objekt ist ein Planspiegel und im Objektstrahlengang befindet sich teilweise ein Glasplättchen mit $3 \mu\text{m}$ Dicke.

In der Praxis kann das Weißlichtinterferometer bezüglich Dispersion asymmetrisch sein (Abbildung 13). Hier wurde im Strahlengang bei der Messstelle 2 ein dünnes

Glasplättchen eingebracht. Abbildung 14 zeigt die zugehörigen Weißlichtinterferenz-Signale. Im rechten Bild ist zu erkennen, dass nun am Einhüllendenmaximum eine Phase ungleich null auftritt. Dies hat zur Folge, dass sich die Ergebnisse der Einhüllenden- und der Phasenauswertung deutlich unterscheiden.

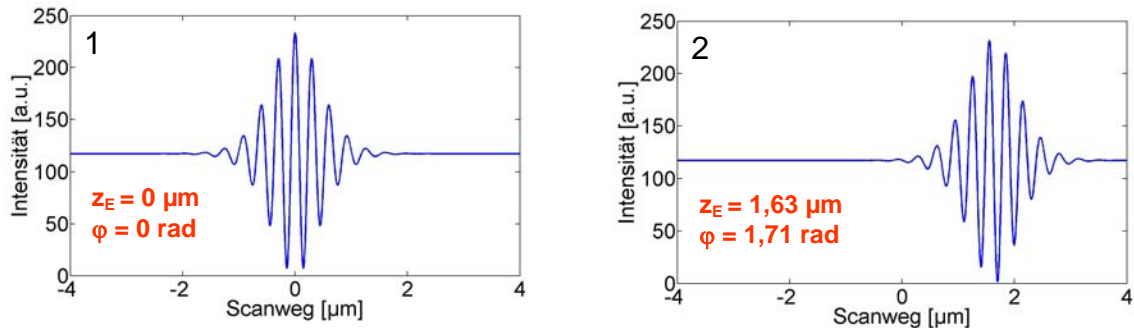


Abb. 14: Weißlichtinterferenz-Signale für die Objektpunkte 1 (links) und 2 (rechts). Für den Objektpunkt 2 ergeben sich eine virtuelle Höhe und eine Phase am Einhüllendenmaximum ungleich null.

3.1 Spiegelnde, geneigte und gekrümmte Oberflächen

3.1.1 Messungen

Mit dem im Projekt untersuchten Weißlichtinterferometer wurden Messungen an einem Metallspiegel mit unterschiedlichen Verkippungen durchgeführt. Abbildung 15 zeigt die Topografiemessung eines um 2° geneigten Spiegels. Im rechten Bild ist deutlich zu erkennen, dass dabei Phasenwerte ungleich null auftreten. Dies deutet auf eine Asymmetrie im optischen System hin.

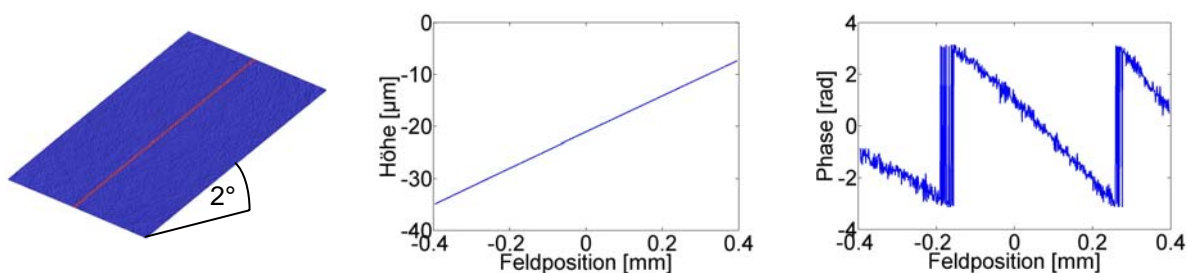


Abb. 15: Weißlichtinterferometrie-Messung an einem um 2° geneigten Spiegel. Links: die rote Linie repräsentiert die Lage des Profilschnitts; Mitte: Profilschnitt bei Einhüllendenauswertung; rechts: Phase am Einhüllendenmaximum.

Wird das Profil entlang der roten Linie mittels Phasenauswertung bestimmt, so ergeben sich Phasensprünge im Topografieverlauf (Abbildung 16).

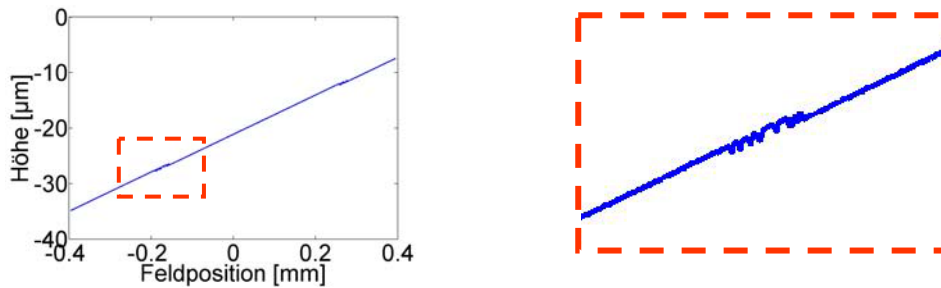


Abb. 16: Profilschnitt des gemessenen Spiegel bei Phasenauswertung; rechts: vergrößerter Ausschnitt.

Die Phase aus Abbildung 15 rechts kann verstetigt werden, so dass sich in erster Näherung eine Gerade ergibt. Mittels eines sehr präzisen Kipptisches wurden für verschiedene Neigungswinkel des Spiegels die Steigungen dieser Geraden bei den gemessenen Phasenwerten bestimmt (Abbildung 17). Dabei konnte festgestellt werden, dass die Phase eine Funktion der Spiegelneigung und der Feldposition ist.

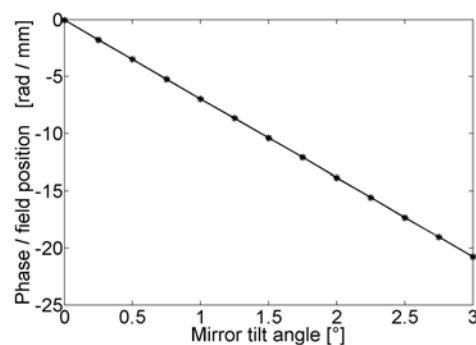


Abb. 17: Zusammenhang zwischen der Spiegelneigung und dem zugehörigen Phasenverlauf. Zur Ermittlung der Werte wurde der Phasenverlauf verstetigt.

Abbildung 18 zeigt mehrere Phasenverläufe bei der Weißlichtinterferometrie-Messung an weiteren Objekten. Nach einer Verstetigung der Phasenverläufe fällt auf, dass die Topografie und die Gesamtphase des Weißlichtinterferometrie-Signals korrelieren. Insbesondere bei der Messung des Sinusverlaufs ist auch die Feldabhängigkeit dieses systematischen Effekts deutlich zu erkennen.

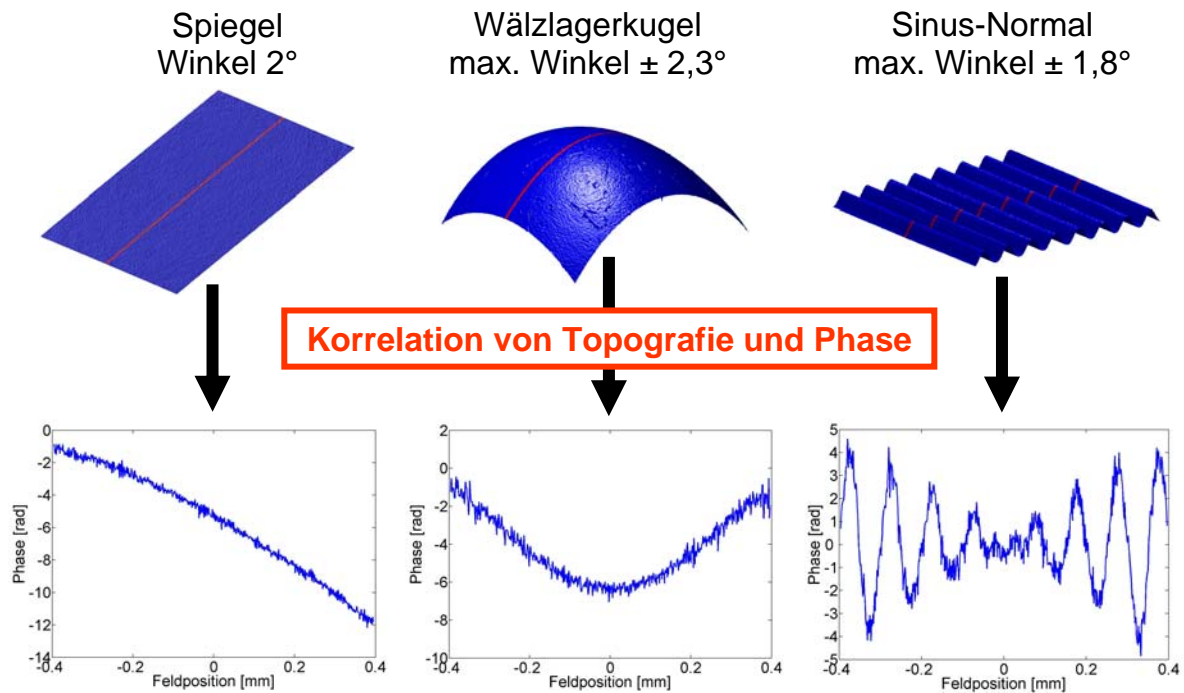


Abb. 18: Gemessene Phase mit Unwrapping bei verschiedenen spiegelnden Objekten. Es ist eine deutliche Korrelation der Topografie (oben) und der Gesamtphase des Weißlichtinterferometrie-Signals (unten) zu erkennen.

3.1.2 Modellbildung

Das entwickelte Modell zur Beschreibung dieser Effekte basiert auf einer asymmetrischen Ausnutzung des vorhandenen Weißlichtinterferometers und dem Vorhandensein von chromatischen Aberrationen im optischen Strahlengang.

Abbildung 19 zeigt die Pupillenausleuchtung im Objekt- und Referenzarm bei einem Objekt mit lokaler Neigung. Der vom Objekt rückreflektierte Lichtstrahl durchläuft das optische System entlang eines anderen Pfades als der zugehörige Lichtstrahl im Referenzarm.

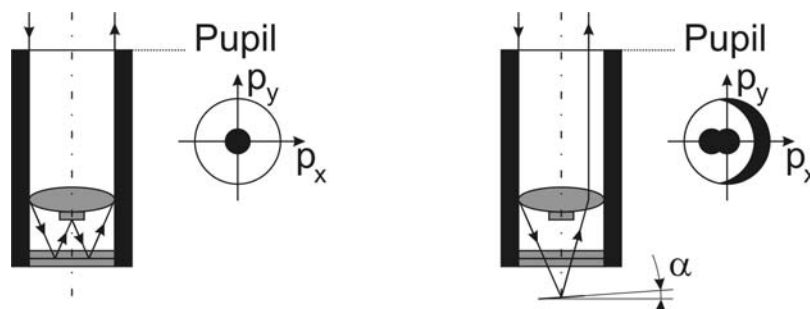


Abb. 19: Pupillenausleuchtung im Referenzarm (links) und Objektarm (rechts) bei geneigtem Objekt (Neigungswinkel α).

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Leica Microsystems wurden die chromatischen Aberrationen des realen optischen Systems ermittelt. Dazu wurden für verschiedene Feldpunkte und Wellenlängen die optischen Wege durch das Gesamtsystem berechnet. Wie Abbildung 20 zeigt, durchstoßen die einzelnen Strahlen die Pupille an unterschiedlichen Stellen.

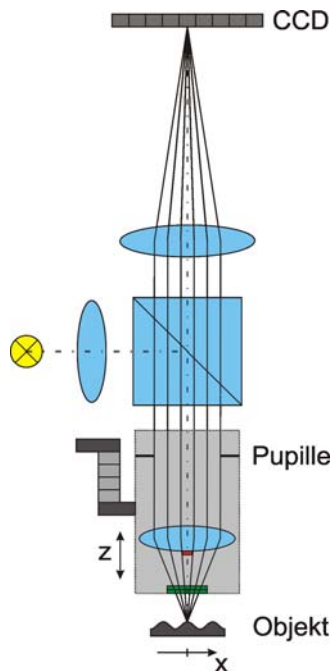


Abb. 20: Strahlverläufe bei der Berechnung der optischen Weglänge.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse der Berechnung mit ZEMAX. Die Daten wurden zur Darstellung so normiert, dass für den mittleren Pupillendurchstoßpunkt eine optische Weglänge von null auftritt. Für den Feldpunkt $x = 0$ mm ergibt sich ein sphärochromatischer Fehler. Mit zunehmendem Feld ist im optischen System ein Farbquerfehler zu verzeichnen. Anzumerken bleibt, dass diese Aberrationen für den Objekt- und Referenzarm gleich sind.

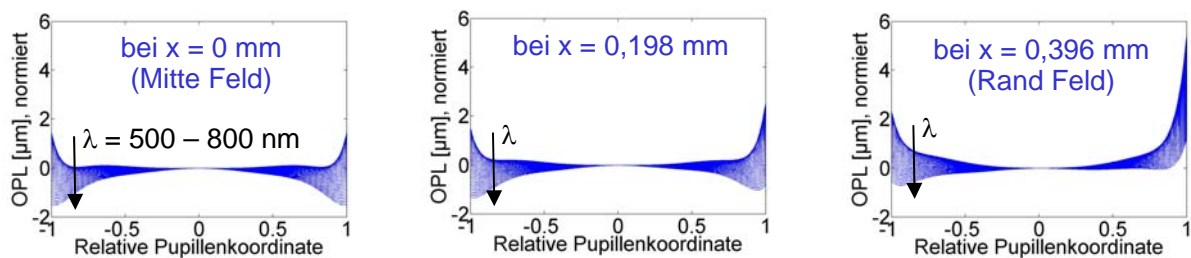


Abb. 21: Ergebnis der Strahldurchrechnung durch das optische System.

Während des Teilvorhabens konnte gezeigt werden, dass eine Kombination dieser chromatischen Abberationen und einer asymmetrischen Pupillenbeleuchtung bei lokaler Objektneigung zu den gemessenen systematischen Effekten führt [8].

3.1.3 Simulationen

Anhand des beschriebenen Modells wurden mehrere Simulationsrechnungen durchgeführt und mit den Messungen verglichen. Abbildung 22 zeigt die Phase am Einhüllendenmaximum bei der Vermessung eines Sinusnormals.

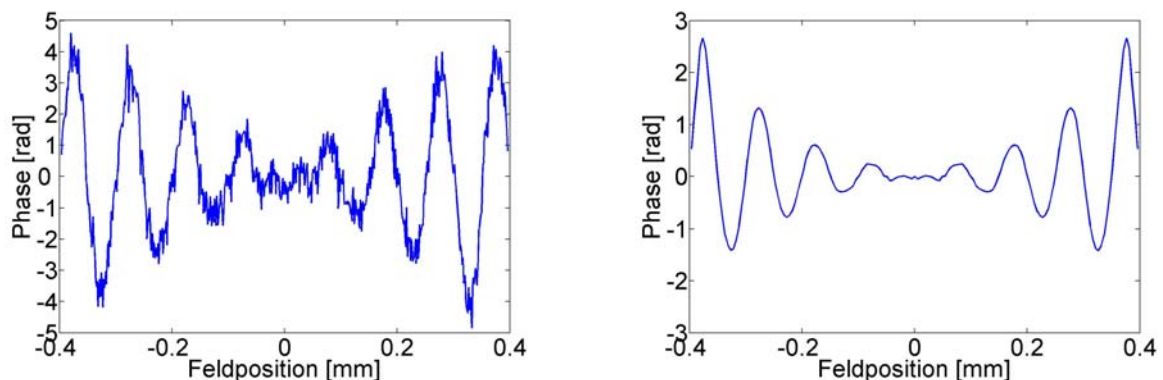


Abb. 22: Phase am Einhüllendenmaximum bei einem Sinusnormal (Rubert 531). Links: Messung; rechts: Simulation.

Zunächst kann aus dieser Berechnung noch keine Aussage getroffen werden, ob die Einhüllende- oder Phasenauswertung genauere Ergebnisse liefert. Deshalb wurden in weiteren Simulationen anhand des Sinusnormals die Messabweichungen für beide Auswertemethoden ermittelt. Abbildung 23 zeigt nun deutlich, dass mit der Phasenauswertung genauere Ergebnisse erzielt werden können.

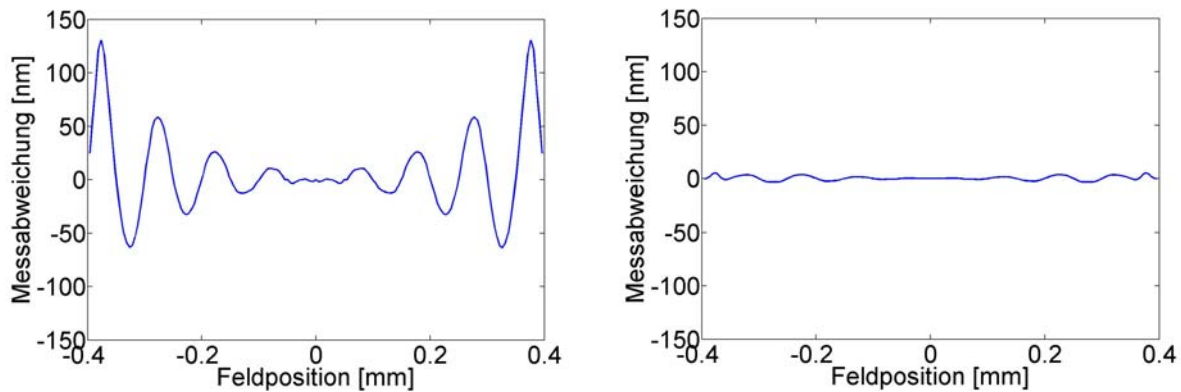


Abb. 23: Simulierte Messabweichung am Sinusnormal (Rubert 531) bei der Einhüllendenauswertung (links) und Phasenauswertung (rechts).

3.1.4 Lösungsansätze zur Verbesserung der 3D-Messgenauigkeit bei spiegelnden, geneigten und gekrümmten Oberflächen

Um nach Lösungen für die gemessene und simulierte Korrelation von Topografie und Phase (Gesamtphase des Weißlichtinterferometrie-Signals am Einhüllendenmaximum) zu suchen, wurden mittels weiteren Simulationen verschiedene Modifikationen des vorhandenen Weißlichtinterferometers analysiert. Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Fallstudie. Es hat sich gezeigt, dass durch ein Abblenden der Pupille um 20 % die systematischen Effekte reduziert werden können. Eine deutliche Verbesserung ergibt sich, wenn der Farbquerfehler vermieden wird und lediglich ein sphärochromatischer Fehler für alle Feldpunkte auftritt. Bei vollständiger Beseitigung der chromatischen Aberrationen tritt keine Korrelation zwischen Topografie und Gesamtphase des Weißlichtinterferometrie-Signals mehr auf. Diese Phase ist dann für alle Feldpunkte mit beliebiger Neigung idealerweise null [9].

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konnten die Farbquerfehler im bestehenden System und somit die untersuchten Effekte durch Ersetzen der ursprünglichen Tubuslinse durch eine chromatisch besser korrigierte Tubuslinse deutlich reduziert werden.

Bei der Vermessung von spiegelnden Objekten mit lokaler Neigung ist die Phasenauswertung zu bevorzugen, da hierbei im Vergleich zur Einhüllendenauswertung deutlich geringere Messabweichungen auftreten.

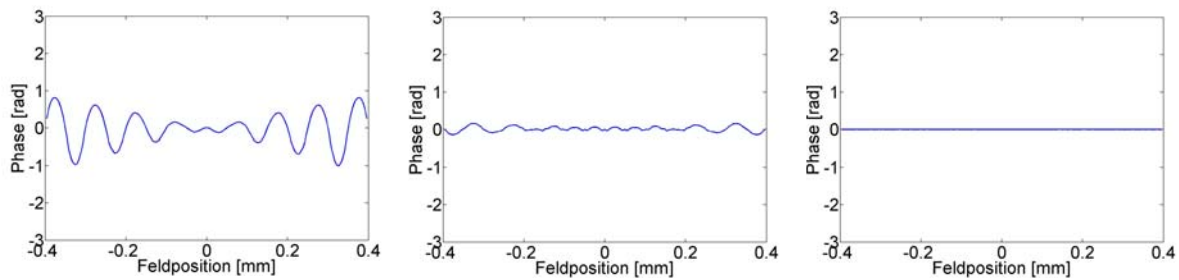


Abb. 24: Studie des simulierten Phasenverhaltens bei verschiedenen Modifikationen des vorhandenen Weißlichtinterferometers. Links: Abblenden der Pupille um 20 %; Mitte: Vorhandensein von der berechneten sphärochromatischer Aberration für alle Feldpunkte; rechts: ohne chromatischen Aberrationen.

3.2 Stufenobjekte

3.2.1 Messungen

Abbildung 25 zeigt, dass bei der Weißlichtinterferometrie-Messung von Kanten Überschwinger auftreten können.

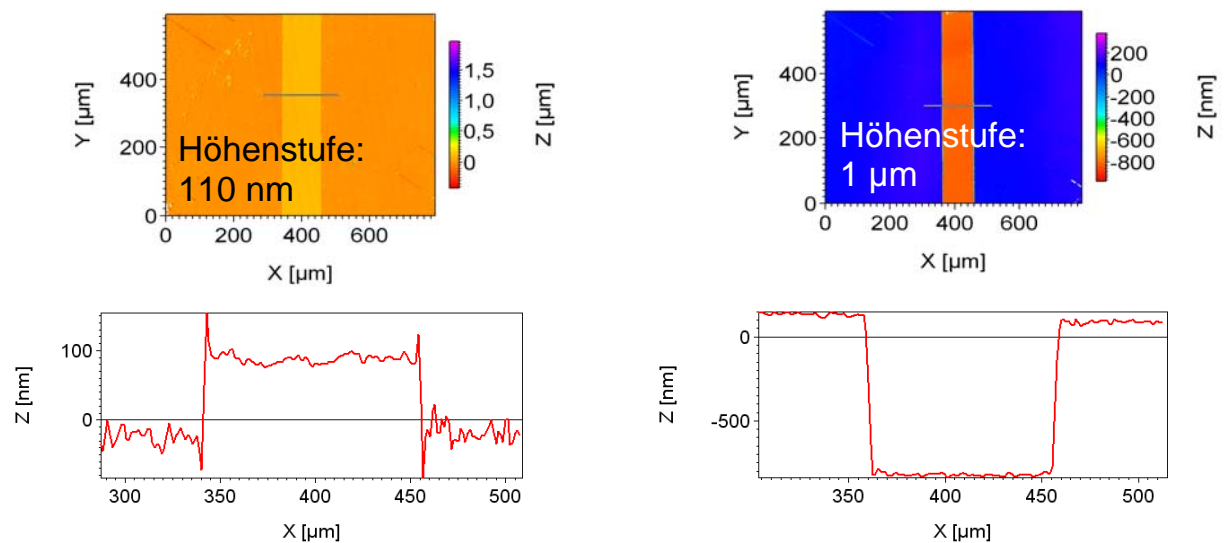


Abb. 25: Topografiemessungen an Kanten. Links: Chrom auf Glas mit einer nominellen Höhe von 110 nm zeigt deutliche Überschwinger; rechts: Graben in Metall mit einer nominellen Höhe von 1 μm zeigt keine Überschwinger.

Eine Literaturrecherche ergab, dass diese Effekte bereits bei anderen Weißlichtinterferometern beschrieben wurden [10, 11]. Die Größe der Überschwinger hängt demnach unter anderem von folgenden Parametern ab:

- Stufenhöhe
- Kohärenzlänge
- Zentralwellenlänge
- numerische Apertur
- Abbildungsmaßstab

3.2.2 Modellbildung

In der Literatur wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass Beugungseffekte hier eine wesentliche Rolle spielen. Zur Durchführung von Simulationen wurde deshalb das am ITO entwickelte Simulationstool ITO-MICROSIM™ verwendet. Dieses Programm beruht auf der RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) und eignet sich insbesondere zur Beugungsrechnung an Kantenstrukturen [12]. Bei der Modellierung wird von einem Weißlichtinterferometer mit idealen Eigenschaften ausgegangen.

3.2.3 Simulation

Da bei der Simulation die Rechenzeit mit der Gitterperiode der modellierten Struktur sehr stark zunimmt, wurde hier eine Struktur mit kleiner Gitterperiode gewählt. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Simulation, wobei zwischen einer Auswertung auf Basis der Kohärenzinformation (Einhüllendenauswertung) und der Phasenauswertung unterschieden wird. Bei der Einhüllendenauswertung zeigen sich deutlich Überschwinger, die bei der Phasenauswertung verschwinden.

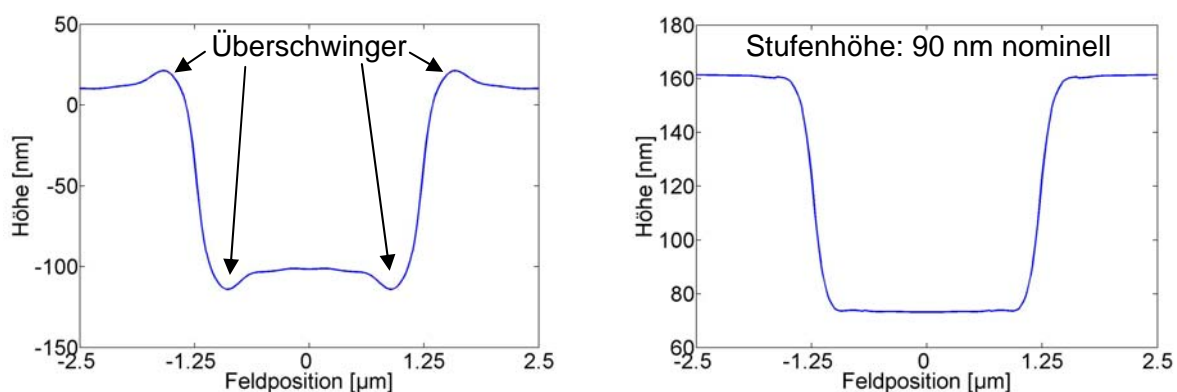


Abb. 26: Simulation einer Silizium-Grabenstruktur mit 2,5 µm Breite und 90 nm Höhe. Links: Einhüllendenauswertung; rechts: Phasenauswertung.

3.2.4 Lösungsansätze zur Verbesserung der 3D-Genauigkeit bei Stufenobjekten

Die bei der Vermessung von Stufenobjekten auftretenden Überschwinger sind Effekte, die auch bei einem idealen Weißlichtinterferometer auftreten. Grundsätzlich wurde in der Literatur eine Abhängigkeit der Größe der Überschwinger von der numerischen Apertur, der Kohärenzlänge und der Zentralwellenlänge beschrieben. In der Praxis werden diese Parameter jedoch anhand der erforderlichen Messfeldgröße und Messunsicherheit ausgewählt. Die Überschwinger können deshalb nur mit einer angepassten Signalauswertung im Anschluss an die Messung beseitigt werden. Wie die hier durchgeführte Simulation zeigt, treten bei der Phasenauswertung keine Überschwinger auf, so dass diese Auswertung zu bevorzugen ist. In diesem Zusammenhang ist jedoch auf ein Patent zu verweisen, das sich insbesondere auf die Fälle bezieht, in denen eine Verstetigung der Phasenwerte notwendig ist [13]. Generell stellen die Überschwinger lediglich lokal begrenzte Störungen dar, die sich auch gut mit einer Tiefpassfilterung der gewonnenen Topografiedaten beseitigen lassen.

4 Zusammenfassung

Messungen mit dem untersuchten Weißlichtinterferometer an spiegelnden, geneigten oder gekrümmten Oberflächen zeigten eine Korrelation der Topografie und der Gesamtphase des Weißlichtinterferometrie-Signals am Einhüllendenmaximum. Das vorhandene optische System wurde modelliert, wobei insbesondere eine asymmetrische Ausleuchtung der Pupille und die vorhandenen chromatischen Aberrationen berücksichtigt wurden. Die auf Basis dieses Modells durchgeführten Simulationen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. In Simulationen konnte gezeigt werden, dass bei der Phasenauswertung deutlich geringere Messabweichungen auftreten als bei der Einhüllendenauswertung. Basierend auf weiteren Simulationen wurden verschiedene Modifikationen am Weißlichtinterferometer analysiert. Dabei zeigte sich, dass durch eine Reduktion des Farbquerfehlers die Korrelation der Topografie und der Gesamtphase des Weißlichtinterferometrie-Signals sowie die daraus resultierenden hohen Messunsicherheiten weitgehend beseitigt werden können. Während des Projekts wurden diese Ergebnisse erfolgreich in einem Demonstrator umgesetzt.

Des Weiteren wurden Überschwinger an Kanten durch Simulationen untersucht. Diese Effekte lassen sich auch bei einem idealen Weißlichtinterferometer nicht vermei-

den. Im Projekt wurden deshalb mehrere numerische Möglichkeiten zur Beseitigung dieser Effekte aufgezeigt.

5 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Zunächst wurde im Teilvorhaben eine Kalibrierung der Messabweichungen, welche bei der Weißlichtinterferometrie an spiegelnden, geneigten und gekrümmten Oberflächen auftreten, vorgeschlagen. Die hier durchgeführten Arbeiten bieten jedoch ein tiefergehendes Verständnis der Ursachen dieser Messabweichungen, weshalb seitens des ITO eine hardwareseitige Lösung zur Reduktion dieser Messabweichungen auf Basis einer speziell angepassten Tubuslinse vorgeschlagen wurde. Die Verbesserung der 3D-Messgenauigkeit auch bei spiegelnden, geneigten und gekrümmten Objekten konnte anhand eines Weißlichtinterferometrie-Demonstrators durch die Firma Mahr belegt werden.

Weiterhin konnte durch Simulation gezeigt werden, dass die bei der weißlichtinterferometrischen Topografiemessung von Stufenobjekten auftretenden Überschwinger an Kanten prinzipbedingt sind und sich somit nicht vermeiden lassen. Ein zusätzlicher Informationsgewinn zu diesem Thema gelang durch eine ausführliche Literaturrecherche. In diesem Zusammenhang wurden auch patentrechtlich geschützte Lösungen anderer Anbieter von Weißlichtinterferometern in Betracht gezogen. Vom ITO wurde erkannt, dass das Wellenlängenspektrum der Lichtquelle einen interessanten Freiheitsparameter darstellt. Bei der Firma Mahr führten entsprechende Untersuchungen zu neuen Auswertalgorithmen, mit denen eine Identifikation von Überschwingern an Kanten möglich ist [14].

Während der Projektlaufzeit wurde ein deutlich tiefergehendes Verständnis der bei der Weißlichtinterferometrie auftretenden Messartefakte erzielt. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Lösungen zur Verbesserung der 3D-Messgenauigkeit auch an schwer zu messenden Objekten, wie z.B. spiegelnde Sinusnormale, konnten am Demonstrator erfolgreich getestet werden. Die Umsetzung der Ergebnisse in neue Produkte erfolgt durch die Projektpartner.

6 Literaturverzeichnis

- [1] F. Marinello, P. Bariani, L. De Chiffre, H.N. Hansen: Development and analysis of a software tool for stitching three-dimensional surface topography data sets. *Meas. Sci. Technol.* 18, 1404-1412, 2007
- [2] R. Sitnik, M. Kujawinska, J. Woznicki: Digital fringe projection system for large-volume 360-deg shape measurement. *Opt. Eng.* 41(2), 443-449, 2002
- [3] R. Döffinger: Subdivision Surfaces. Seminararbeit am Institut für Prozeßrechen-technik, Automation und Robotik der Universität Karlsruhe, 2004
- [4] G. Häusler, S. Karbacher: Reconstruction of Smoothed Polyhedral Surfaces from Multiple Range Images. *3D Image Analysis and Synthesis*, 191-198, 1997
- [5] D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, P. Krsek: The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm. *International Conf. on Pattern Recognition*, 545-548, 2002
- [6] W. Wilke: Segmentierung und Approximation großer Punktwolken. Dissertation an der Universität Darmstadt, 2002
- [7] M. Fleischer, R. Windecker, H.J. Tiziani: Fast algorithms for data reduction in modern optical three-dimensional profile measurement systems with MMX technology. *Applied Optics*, Vol. 39, 1290-1297, 2000
- [8] R. Berger, T. Sure, W. Osten: Measurement errors of mirrorlike, tilted objects in white-light interferometry. *Proc. SPIE*, Vol. 66162E, 1-9, 2007
- [9] R. Berger, K. Körner, W. Osten: Chromatische Aberrationen in der Weißlichtinterferometrie. *DGaO-Proceedings*, A30, 2008
- [10] A. Harasaki, J.C. Wyant: Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry. *Applied Optics*, Vol. 39, 2101-2106, 2000
- [11] M. Rahlves, M. Seifert, T. Fahlbusch, J. Frühauf, E. Reithmeier: Bewertung von Weißlichtinterferometermessungen mit einer Kantenteststruktur. *DGaO-Proceedings*, P54, 2007
- [12] R. Berger, J. Kauffmann, N. Kerwien, W. Osten, H.J. Tiziani: Rigorose Beugungssimulation: Ein Vergleich zwischen RCWA , FDTD und der Finiten Elemente Methode. *DGaO-Proceedings*, P59, 2004
- [13] A. Harasaki, J. Schmit: Bat-wing attenuation in white-light interferometry. *US Patent 6493093 B2*, 2002
- [14] J. Niehues, P. Lehmann, K. Bobey: Dual-wavelength vertical scanning low-coherence interferometric microscope. *Applied Optics*, Vol. 46, 7141-7148, 2007