
Flächenhafte Interferometrische Messtechnik

1. Einführung

In diesem Praktikum geht es um eines der präzisesten Verfahren zur flächenhaften Vermessung von optischen Oberflächen: Die Interferometrie. Diese Messtechnik benutzt die Wellenlänge des Lichts als Längenmassstab (typisch: Helium-Neon Laser bei 632.8 nm). Mit modernen Interferometern erreicht man Reproduzierbarkeiten im sub-Ångström-Bereich (zum Vergleich: der Abstand der Wasserstoffatome im Wasserstoffmolekül beträgt rund $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 10^{10} \text{ m}$).

Hauptanwendung dieser Messtechnik ist die Qualitätskontrolle bei der Herstellung von optischen Oberflächen, wie z.B. Teleskopspiegel, die Linsen in Fotoobjektiven und Mikroskopen. Die höchsten Genauigkeitsanforderungen momentan haben die Objektive, die bei der Computerchipherstellung eingesetzt werden. Diese Lithografieobjektive erfordern Oberflächengenauigkeiten, die im Bereich von 1 nm und darunter liegen, die Messtechnik muss dementsprechend hochauflösend und genau sein. Dies leistet momentan nur die Interferometrie.

Die Interferometrie wird schon sehr lange in der Optikfertigung eingesetzt. Das einfachste und immer noch verwendete Interferometer ist das Probeglas zur Prüfung einer sphärischen oder planen Fläche. Das Probeglas ist die Soll-Negativform der zu prüfenden Fläche. Es wird in engen Kontakt mit dem Prüfling gebracht, wodurch bei Beleuchtung mit weißem Licht Newton-Ringe sichtbar werden, die die Abweichungen des Prüflings von der Sollfläche anzeigen.

Einen großen Fortschritt brachte der Einsatz des Lasers in der Interferometrie. Durch die hohe Kohärenzlänge wurden neue, nicht abgeglichenen Interferometerdesigns möglich. Nicht abgeglichen heisst, dass sich die optische Länge des Referenzarms von der optischen Länge des Prüfarms unterscheidet.

In diesem Praktikum sollen die Grundlagen der praktischen Interferometrie erlernt werden und der Umgang mit einem modernen Interferometer (Fisba μ Phase2) gezeigt werden. Es werden verschiedene Messungen durchgeführt (Ebenheit von Planspiegeln, Dickenvariationen von Glasplatten, Vermessung von Linsenoberflächen, Bestimmung von Flächenradien) und auf praxisrelevante Themen wie Kalibrierung und Justage eingegangen.

2. Grundlagen Interferometrie

Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen. Wenn man verschiedene Wellen überlagert, entstehen Interferenzmuster. Dies lässt sich bei allen Wellen beobachten, seien es nun Oberflächenwellen im Wasser, Schallwellen oder auch bei elektromagnetischen Wellen wie dem Licht. Lichtinterferenzen in Form heller und dunkler Streifen kann man nur beobachten, wenn die überlagerten Lichtwellenfelder während einer für die Detektion ausreichenden Zeit unverändert bleibt. Damit ergeben getrennte Lichtquellen keine Interferenzen, denn zwischen den von ihren Atomen in völlig unregelmäßiger Folge emittierten Wellenzügen besteht keine konstante Phasenbeziehung - sie sind **inkohärent**.

Detektierbare Interferenzen entstehen nicht, weil sich durch die ständige Änderung der Phasenbeziehung der Interferenzeffekt wegmittelt.

Wellenzüge mit fester Phasenbeziehung, also **Kohärente** Wellenzüge, kann man mit Hilfe eines Strahlteilers erzeugen. Am Strahlteiler wird ein Wellenfeld in zwei Wellenfelder mit fester Phasenbeziehung aufgeteilt. Von den beiden so erzeugten Wellen durchläuft eine den Referenz-, der andere den Prüfling. An einem zweiten Strahlteiler werden sie wieder vereinigt und gelangen schließlich zum Detektor, z.B. den Chip einer CCD-Kamera. Wenn der optische Weglängenunterschied zwischen den beiden Strahlen die **Kohärenzlänge** des verwendeten Lichts nicht überschreitet, kann man Interferenzen beobachten. Die Kohärenzlänge l_c , die die zeitliche Kohärenz des Lichts beschreibt, kann man sich anschaulich als die durchschnittliche Länge eines Wellenzuges vorstellen. Sie ist abhängig von der spektralen Breite $\Delta\lambda$ des verwendeten Lichts:

$$l_c = \lambda_0^2 / \Delta\lambda \quad (1)$$

Die Kohärenzlängen einiger Lichtquellen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

<i>Lichtquelle</i>	<i>Spektrum</i>	<i>Kohärenzlänge</i>
Sonnenlicht	Weißes Licht, nahezu kontinuierliches Spektrum	Einige Mikrometer
Superlumineszenzdiode	Wenige Nanometer	Einige 10 Mikrometer
Spektrallampe (z.B. Natrium-Dampfampe)	Schmalbandig um eine feste Wellenlänge	Ca. 3 m
Frequenzstabilisierter HeNe-Laser	Frequenzstabilisiert auf einige MHz	Einige hundert Meter

Eine der einfachsten Formen der Interferometrie wird schon lange zur Untersuchung von Linsen eingesetzt: die bereits in der Einleitung angesprochene Oberflächenprüfung mit dem **Probeglas**. Dabei wird der Prüfling mit einer passenden Negativform, dem Probeglas, in engen Kontakt gebracht. Licht wird an der Oberfläche des Probeglasses und an der des Prüflings reflektiert, die beiden reflektierten Strahlen interferieren und es entstehen Newtonsche Ringe. Der enge Kontakt ist deshalb erforderlich, weil das Licht, das am Prüfling reflektiert wird, einen weiteren Weg zurücklegt als das Licht, das am Probeglas reflektiert wird. Damit sich Interferenzen ausbilden können, muss der Wegunterschied kleiner sein als die Kohärenzlänge des Beleuchtungslichts, also im einfachsten Fall Sonnenlicht mit einer Kohärenzlänge von einigen Mikrometern.

Das entstehende Streifenmuster, das **Interferogramm**, stellt das Konturlinienbild der Differenz zwischen Prüfling und Referenzfläche (Probeglas) dar. Von einem Streifen zum nächsten nimmt die Abweichung des Prüflings von seiner Sollform um $\lambda/2$ zu. Die Abweichung der Prüffläche von der Sollform wird als **Passfehler** bezeichnet.

Die Prüfung mit dem Probeglas erfordert für jede zu prüfende Fläche eine Negativfläche mit dem entsprechenden Radius. Zudem birgt der enge Kontakt stets das Risiko, eine oder beide Flächen zu beschädigen. Es wurden daher andere Interferometertypen entwickelt, die die Referenzfläche räumlich vom Prüfling trennen.

Fizeau-Interferometer. Eine nahe liegende Abhilfe besteht darin, den Abstand zwischen Masterfläche und Prüfling zu vergrößern. Dies impliziert jedoch auch höhere Anforderungen an die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle. Heutzutage stellen Laserquellen das Mittel der Wahl dar. Der prinzipielle Aufbau eines Fizeau-Interferometers ist in Abbildung 1 skizziert.

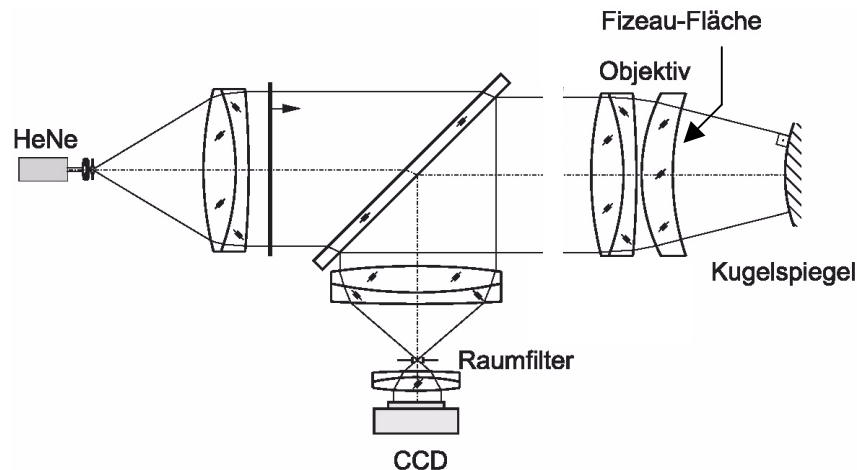


Abbildung 1: Fizeau-Interferometer: Der Laserstrahl wird über eine Teleskopoptik aufgeweitet, so dass eine ebene Welle entsteht. Sie durchläuft ein spezielles Fizeau-Objektiv, dessen letzte Fläche als Strahlteiler dient. Diese ist teilverspiegelt und liegt konzentrisch zum Brennpunkt des Objektivs. Damit ist der Strahlengang nur zwischen dieser Fizeau-Fläche und der Prüflingsoberfläche (hier Kugelspiegel) aufgespalten, die sogenannte Kavität ist sehr klein. Deshalb können auch nur hier Störungen eingebracht werden, z.B. durch Turbulenzen, was den Aufbau sehr unempfindlich macht.

Verschiedene Ausführungsformen des Interferometers mit ebener oder sphärischer Fizeau-Referenzfläche gestatten die Prüfung von Plan- oder Kugelflächen. Für den letztgenannten Fall wird ein sogenanntes Fizeau-Objektiv eingesetzt, dessen letzte Linsenfläche exakt konzentrisch zum Brennpunkt des Systems liegt. Die Referenzwelle wird durch Reflexion eines Lichtanteils an dieser hochgenauen Linsenfläche gebildet. Der transmittierte Lichtanteil erfährt durch den senkrechten Durchtritt durch diese Fläche keine Brechung und bildet die sphärische Prüfwelle. Ein Vorteil derartiger Fizeau-Objektive ist, dass nur die Fizeau-Fläche hochpräzise sein muss. Alle anderen Linsen des Systems werden von Prüf- und Referenzwelle auf gleichen optischen Wegen durchlaufen. Auf diese Weise wird der systematische Messfehler, der durch kleinere Abweichungen der Linsenflächen von ihrer Sollform entsteht, minimiert.

Ein weiterer wichtiger Typ der Zweistrahlinterferometer ist das **Twyman-Green-Interferometer** (Abbildung 2). Es ist eine Variation eines Michelson-Interferometers und wurde zunächst zum Prüfen von Linsen und Prismen entwickelt¹, eignet sich aber ebenso wie das Fizeau-Interferometer zum Prüfen verschiedener optischer Komponenten. Die räumliche Aufspaltung von Referenz- und Messarm erlaubt eine exakte Anpassung der optischen Weglängen in beiden Interferometerarmen. Dies ist besonders wichtig, wenn kurzkohärente Lichtquellen verwendet werden. Twyman-Green-Interferometer bieten zudem den Vorteil, dass der Referenzarm unabhängig vom Messarm manipuliert werden kann, beispielsweise zur Anpassung der Referenzwellenamplitude.

¹ F. Twyman and A. Green. Improvements in finishing prisms or lenses or combination of the same and in apparatus therefor. British Patent, 103 832, 1917.

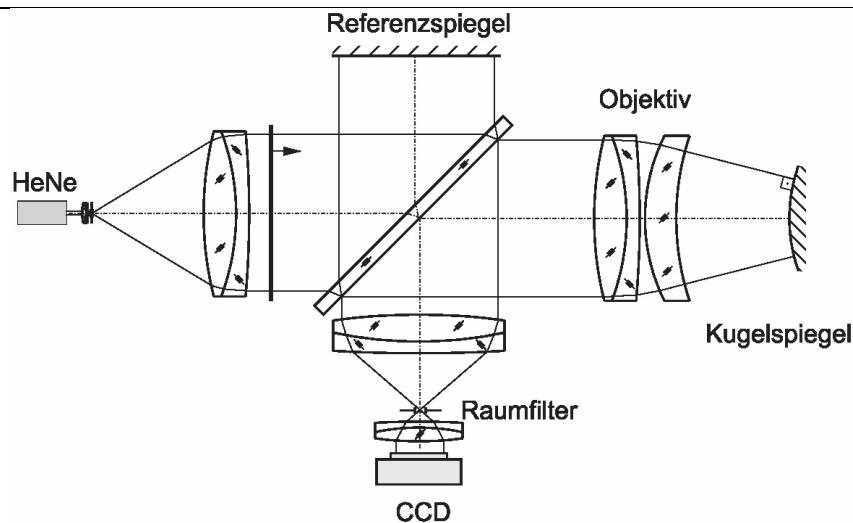


Abbildung 2: Twyman-Green-Interferometer: Die Aufspaltung von Referenz- und Objektwelle erfolgt bereits am Strahlteiler, ein Teil des Lichtes wird in den Referenzarm ausgelenkt. Dieser Interferometertyp kann abgeglichen werden, was für Lichtquellen kurzer Kohärenzlänge von Bedeutung ist.

Kontrast. Die Überlagerung zweier Wellenfronten mit der Phasendifferenz $\varphi = \varphi(x,y)$ führt zu einer Intensitätsverteilung, die neben den beiden Intensitäten I_1 und I_2 noch einen Interferenzterm in Abhängigkeit von der Phasendifferenz enthält:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi) \quad (2)$$

Die Intensitätsmodulation hat die Amplitude

$$I'' = 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3)$$

und bewegt sich um den Mittelwert

$$I' = I_1 + I_2 \quad (4)$$

Der Kontrast eines Interferogramms ist über die Extremwerte der Intensität definiert:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{I''}{I'} \quad (5)$$

Man erhält ein Maximum für den Kontrast K , wenn die Amplitude I'' gleich dem Mittelwert I' ist. Daraus folgt, dass der **maximale Kontrast** im Interferogramme erreicht wird, wenn die Intensitäten der beiden kohärenten Lichtquellen am Ort der Überlagerung gleich sind. Dann variiert die Gesamtintensität zwischen 0 und der vierfachen Einzelintensität.

Die hellen und dunklen Interferenzstreifen zeigen wie die Höhenlinien einer Landkarte das Höhenprofil der Differenzfunktion zwischen den beiden Wellen an, wobei der Abstand von einem dunklen Streifen zum nächsten einer Wellenlänge des verwendeten Lichtes entspricht.

Beachte: bei Reflexion an einer Oberfläche wird ein Oberflächenfehler durch den Hin- und Rückweg in eine doppelt so große Wellenfrontänderung übersetzt. Bei Oberflächenvermessungen entspricht also der Abstand zwischen zwei Streifen einer *halben* Wellenlänge.

Sind die Abweichungen der Wellenfronten und infolgedessen die Steigungen der Differenzfunktion sehr groß, ergeben sich hohe Streifendichten. Da jedoch das Streifenmuster nur bis zu einer gewissen Ortsfrequenz, die meist durch die endliche Pixelgröße der detektierenden CCD-Kamera begrenzt ist, erfaßt werden kann, ist oberhalb dieser maximalen Ortsfrequenz kein vernünftiges Messergebnis zu erwarten: Das Interferenzbild wird mit einer nicht ausreichenden Stützstellenzahl abgetastet. Im Bild,

das die CCD-Kamera liefert, entsteht ein Moiré, von dem man nicht mehr direkt auf die Phasendifferenz schließen kann.

Zudem durchlaufen Referenz- und Prüfwellen bei großen Abweichungen unterschiedliche Bereiche der Abbildungsoptik, was zu einem zusätzlichen Fehler, den sogenannten „Retrace-Error“ führt.

Deshalb versucht man, die Abweichungen der Wellenfronten voneinander möglichst klein zu halten und verwendet im Prüfarm eine auf den Prüfling abgestimmte Kompensationsoptik. Wenn die Kompensationsoptik so ausgelegt ist, dass bei perfektem Prüfling eine ebene Welle aus dem Prüfarm zurückkommt, spricht man von einer **Nulloptik**. In diesem Fall werden alle Strahlen im Prüfarm in sich selbst zurückreflektiert werden. Der Prüfling wird in diesem Fall "im **Nulltest**" geprüft.

3. Interferometerjustage und Interferogrammauswertung

Für das Messergebnis ist eine gute Justage unabdingbar, da ein falsch justierter Prüfling Justageaberrationen einführt, die als Oberflächenfehler fehlinterpretiert werden können. In der Regel ist ein Interferometer mit einem oder mehreren in Richtung der optischen Achse verfahrbaren Prüflingshaltern ausgestattet. Die z-Position¹ dieser Schlitten kann über Längenmesssysteme festgestellt werden. Allerdings ist die Position des Schlittens nicht unbedingt gleichzusetzen mit der Position des Prüflings. Hier hilft eine bestimmte Prüfkonfiguration: die **Cat's eye - Position**. In dieser Konfiguration wird der Spot des Interferometerobjektivs auf den Scheitel des Prüflings (z.B. Kugelspiegel) gelegt. An dieser Stelle entsteht ein interferometrisch kontrollierbares Nullinterferogramm. Damit kennt man die genaue Position seines Prüflings relativ zum Aufbau und kann seine Längenmesssysteme entsprechend einstellen.

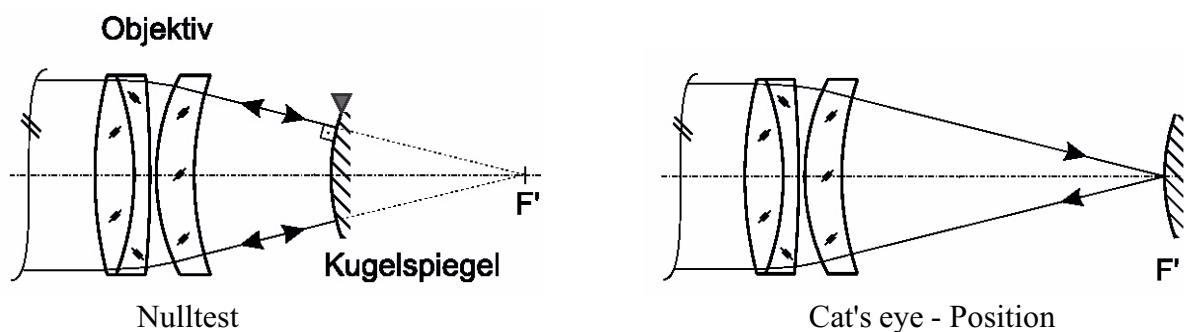


Abbildung 3: Gebräuchliche Setups in der interferometrischen Messtechnik. Links: Vermessung eines Kugelspiegels im Nulltest. Alle Strahlen werden in sich zurückreflektiert. Rechts: Cat's eye - Position: Der Scheitel des Prüflings wird in den Brennpunkt des Prüfobjektivs gelegt. Dadurch entsteht auch ein Nullinterferogramm, die Strahlen laufen allerdings nicht in sich zurück.

Ein weiteres wichtiges Hilfsmittel ist die **Spotkamera**. Sie befindet sich in der Fourierebene des abbildenden Systems. In dieser Ebene wird eine ebene Welle zu einem Spot transformiert. Die Position des Spots entspricht der Richtung der ebenen Welle. Mit diesem Hilfsmittel lässt sich sehr gut und lange bevor Streifen sichtbar werden die Richtung der Prüfwellen mit der Richtung der Referenzwellen abgleichen, indem so justiert wird, dass die beiden Spots aufeinander fallen.

¹ die z-Achse ist wie meist in der Optik die Achse parallel zur optischen Achse

Interferogrammauswertung

Wenn der Prüfling in den Prüfaufbau eingesetzt und justiert ist, kann das Interferogramm aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die Auswertung hat zum Ziel, aus der Intensitätsverteilung im Interferogramm die Phasendifferenz $\varphi(x,y)$ zwischen Objektwellenfront und Referenzwellenfront zu bestimmen. Ist die Phasendifferenz bestimmt, kann man dann unter Berücksichtigung des Aufbaus auf die Eigenschaften des Prüflings zurückschließen. Im einfachsten Fall, wenn eine Oberfläche mit einem Nulltest in Reflexion vermessen werden soll, ist der Höhenfehler h des Prüflings über die Formel

$$h(x,y) = \frac{1}{2} \frac{\varphi(x,y)}{2\pi} \lambda \quad (6)$$

zu berechnen. Der Faktor $\frac{1}{2}$ resultiert aus dem zweimaligen Durchlauf des Höhenfehlers. Die Koordinaten x und y müssen noch an den Abbildungsmaßstab angepasst werden, mit dem der Prüfling abgebildet wird.

Die Berechnung der Phasenfunktion verläuft in zwei Stufen:

1. Bestimmung der Phasenwerte $\Phi = \varphi \text{ modulo } 2\pi$ aus den Intensitäten, die an den einzelnen Pixeln gemessen wurden.
2. Phasentflechtung (phase unwrapping): Berechnung von φ aus Φ durch Auflösung der 2π -Mehrdeutigkeit, d.h. Addition eines ganzzahligen Vielfachen von 2π in jedem Pixel, so dass als Resultat eine stetige Wellenfront entsteht.

Für den ersten Schritt kann man das Interferogramm statisch oder dynamisch auswerten. Von einer *statischen Interferogrammauswertung* spricht man, wenn die Auswertung auf nur einem Interferogramm basiert. Statische Verfahren haben einige Nachteile. So ist aus dem Interferogramm nicht zu erkennen, ob die zugehörige Phasendifferenz konvex oder konkav ist. Die Auswertung des Interferogramms erfolgt über den Verlauf der Streifen. Eine perfekte ebene Welle erzeugt zusammen mit einer weiteren, leicht verkippten ebenen Welle ein periodisches Streifenmuster mit geraden, äquidistanten Linien. Bei der Auswertung wird die Abweichung der Streifen von diesem Ideal gemessen. Allerdings können nicht beliebige Interferenzmuster ausgewertet werden, so sind z.B. für viele Algorithmen geschlossenen Linienzüge zu vermeiden. Die Auswertung ist störänfällig gegen Intensitätsvariationen, wie sie z.B. durch ein ungleichmäßig ausgeleuchtetes Interferogramm oder durch Unterschiede in der Lichtempfindlichkeit der einzelnen Pixel verursacht werden. Vorteil dieses Verfahrens ist eine sehr schnelle Messung („Einzelschuss-Messung“).

Das zweite Auswerteprinzip basiert auf einer aktiven Phasenschiebung, die in mehreren Schritten in kurzer Zeit absolviert wird. Man spricht deshalb von einer *dynamischen Interferogrammauswertung*. Mit ihr werden in guten Interferometern routinemässig Messungen mit einer Wiederholgenauigkeit von $\lambda/100$ erreicht, mit Sorgfalt können die Abweichungen aufeinanderfolgender Messungen bis in den Bereich von $\lambda/1000$ reduziert werden¹. Durch die pixelweise Auswertung wird die Messung robust gegenüber Intensitätsschwankungen über das Interferogramm hinweg und gegen eine über den

¹ Malacara, D.: *Optical Shop Testing*, Wiley & Sons, 1992

Ort variierenden Detektorempfindlichkeit. Im Gegensatz zur statischen Auswertung ist die Messung allerdings empfindlich gegenüber zeitlichen Änderungen des Interferogramms, wie sie z.B. durch Luftturbulenzen und Intensitätsschwankungen des Lasers verursacht werden können.

Die Phasenwerte Φ werden aus mehreren Interferogrammen, die während der Phasenschiebung aufgenommen werden, berechnet. Die Phasenschiebung ändert die Differenz zwischen Referenzwelle und Messwelle um einen über die gesamte Apertur konstanten, zeitlich veränderlichen Wert. In der Intensitätsverteilung aus Gleichung 1 wird also eine zeitlich variable Anfangsphase $\Delta\delta$ eingeführt:

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \Delta\delta(t)). \quad (7)$$

Betrachtet man das gesamte Interferogramm, so scheinen die Interferenzstreifen zu wandern.

Beobachtet man die Intensität an einem Pixel, so erhält man, für eine mit der Zeit linear verlaufende Phasenänderung $\Delta\delta(t)$ einen kosinusförmigen Verlauf.

Eine Standardtechnik in der Interferometrie, die auch in dem verwendeten Aufbau verwendet wird, ist die Phasenschiebung durch geometrische Verschiebung des Referenzspiegels in Richtung der optischen Achse. Eine Verschiebung um eine halbe Wellenlänge ändert die Phasendifferenz zwischen Prüf- und Referenzwelle um 2π .

Ein verbreiteter Algorithmus ist der 5-Phasenschiebe-Algorithmus. Dieser Algorithmus benötigt fünf Interferogramme, die durch vier Phasenschiebungen mit fester Schrittweite (90°) aufgenommen wurden. Der Phasenwert Φ am Ort eines Pixel berechnet sich aus den fünf registrierten Intensitäten wie folgt:

$$\Phi(x, y) = \arctan \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \quad (8)$$

Mit der Berechnung der Phasenwerte Φ ist die erste Stufe der Phasendifferenzberechnung abgeschlossen, es folgt das phase-unwrapping. Für dieses nicht-triviale Problem der Verstetigung der 2π -Sprungstellen existieren unzählige Algorithmen. Der im Messprogramm des Instituts implementierte Algorithmus versucht, Unstetigkeitsstellen zu vermeiden, indem ausgehend von Gebieten mit niedriger Streifendichte mehrdeutige Bereiche erschlossen werden, wobei stets die Möglichkeit mit den geringsten Steigungen gewählt wird.

Messwertreduktion

Im Alltag ist es ist nützlich, das interferometrische Messergebnis, das aus etlichen tausend Einzelwerten besteht (jedes Pixel stellt einen Messwert zur Verfügung), auf einige wenige Kenngrößen zu reduzieren.

PV- und RMS-Wert: Der PV-Wert (peak to valley value) bezeichnet die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert der Phasenfläche. Bei dieser Betrachtung ist nachteilig, dass hierbei nur zwei Punkte einer Fläche verglichen werden und somit einzelne große lokale Fehler einen großen PV-Wert ergeben können.

Aussagekräftiger ist hingegen der RMS-Wert (root mean square value) bzw. der quadratische Mittelwert. Er ist ein auf die Fläche A bezogener, statistisch gewichteter Wert der Wellenaberrationsfunktion $W(r, \theta)$ und durch den Integralausdruck

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\int_A W(r, \theta)^2 dA}{\int_A dA}} \quad (9)$$

bestimmt. Da in der Praxis eine endliche Anzahl an Messpunkten vorliegt, wird das Integral durch eine Summation angenähert.

Eine detailliertere Aussage über die Wellenfront erhält man, wenn man sie durch einen Satz von Polynomen annähert, z.B. über **Zernike Polynome**. Dieser Satz an Polynomen ist auf einer Kreisfläche definiert und daher für die meist kreisförmigen Messaperturen in der Optik besonders gut geeignet. Die Zernike Polynome bilden ein Orthonormalsystem, was sich sehr vorteilhaft auf die Numerik auswirkt. So ist das Ergebnis eines Polynomfits an die Messwerte praktisch unabhängig von der Anzahl der verwendeten Terme. Einige Terme können direkt Wellenfrontfehlern zugeordnet werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Zernike Polynome bis zum 4. Grad:

j	n	m	U_{nm}	Bedeutung
1	0	0	1	Konstante
2	1	1	$r \sin \theta$	Verkippung um y -Achse
3		-1	$r \cos \theta$	Verkippung um x -Achse
4	2	2	$r^2 \sin 2\theta$	Astigmatismus bei 0°
5		0	$(2r^2 - 1)$	Defokussierung
6		-2	$r^2 \cos 2\theta$	Astigmatismus bei 45°
7	3	3	$r^3 \sin 3\theta$	
8		1	$(3r^3 - 2r) \sin \theta$	Koma in x -Richtung
9		-1	$(3r^3 - 2r) \cos \theta$	Koma in y -Richtung
10		-3	$r^3 \cos 3\theta$	
11	4	4	$r^4 \sin 4\theta$	
12		2	$(4r^4 - 3r^2) \sin 2\theta$	
13		0	$(6r^4 - 6r^2 + 1)$	Sphärische Aberration
14		-2	$(4r^4 - 3r^2) \cos 2\theta$	
15		-4	$r^4 \cos 4\theta$	