

# Formvermessung am holographisch rekonstruierten Objektbild

## DIPLOMARBEIT

im Fachbereich

**PHOTOINGENIEURWESEN UND MEDIENTECHNIK**

---

**FACHHOCHSCHULE KÖLN**

Autor

Vitor Agostinho Guerreiro  
aus Iserlohn-Letmathe  
Matrikel-Nr. 11016455

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Jörg Gutjahr  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Altmeyer

Köln, im Februar 2006

# **Shape measurement of a holographic reconstructed image**

## **THESIS**

at the Department of

**IMAGING SCIENCES AND MEDIA TECHNOLOGY**

---

**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES COLOGNE**

Author

Vitor Agostinho Guerreiro  
Iserlohn-Letmathe, Germany  
Register-No. 11016455

First Reviewer: Prof. Dr. rer. nat. Jörg Gutjahr  
Second Reviewer: Prof. Dr.-Ing. Stefan Altmeyer

Cologne, February 2006

*Agostinho Antonio Guerreiro*

Ich habe keine besondere Begabung,  
sondern bin nur leidenschaftlich neugierig.

Albert Einstein (1879-1955) - in  
einem Brief an Carl Seelig, 1952

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jörg Gutjahr für die Anregung zu der untersuchten Thematik und dem großzügigen Gestaltungsspielraum bei der Bearbeitung danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Altmeyer gilt mein besonderer Dank für sein Interesse an meiner Arbeit und für die freundliche Übernahme des Korreferats. Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Anton Kraus für die wertvollen Diskussionen und für die Unterstützung bei dieser Arbeit bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Prinzip der Holographie . . . . .	4
2.1.1	Mathematische Beschreibung . . . . .	5
2.2	Speckle-Effekt . . . . .	8
2.2.1	Objektive Speckles . . . . .	9
2.2.2	Subjektive Speckles . . . . .	10
2.3	Objektformvermessung . . . . .	12
2.3.1	Holographische Interferometrie . . . . .	12
2.3.2	Konturlinien-Holographie . . . . .	13
2.3.3	Holographische Zwei-Wellenlängen-Verfahren . . . . .	14
2.3.4	Elektronische Speckle-Interferometrie . . . . .	15
2.3.5	ESPI Zwei-Wellenlängen-Verfahren . . . . .	16
2.4	Amplitudenhologramme versus Phasenhologramme . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Höhenschichtlinienanalyse</b>	<b>19</b>
3.1	Phasenschiebeverfahren . . . . .	19
3.2	Filterung und Demodulation von Phasenbildern . . . . .	23
3.3	Empfindlichkeitsvektor . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Formvermessung am holographischen Objektbild</b>	<b>28</b>
4.1	Rekonstruktionssystem . . . . .	29
4.2	Experimenteller Aufbau . . . . .	30
4.3	Arbeitspunkte der Laserdiode . . . . .	34
4.4	Kalibrierung des Phasenschiebens . . . . .	36
4.5	Bildverarbeitungssystem . . . . .	37
4.6	Auswertung des Interferogramms . . . . .	38

<b>5 Diskussion</b>	<b>43</b>
5.1 Dekorrelation der Speckle . . . . .	43
5.2 Empfindlichkeit des Aufbaus bezüglich Fehljustage . . . . .	44
5.3 Lateraler Versatz der rekonstruierten Objektbilder . . . . .	46
5.4 Genauigkeit des entwickelten Verfahrens . . . . .	48
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>50</b>
<b>7 Anhang</b>	<b>52</b>
7.1 Programm-Quellcode . . . . .	52
7.2 Mathematische Erläuterung . . . . .	63
7.2.1 Zweistrahlinterferenz . . . . .	63
7.2.2 Rekonstruktion des Hologramms . . . . .	63
7.2.3 Holographisches Interferogramm . . . . .	64
7.3 Spezifikation . . . . .	65
7.3.1 Temperaturregeleinheit für Laserdioden . . . . .	65
7.3.2 Eingesetzte Laserdiode . . . . .	68
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>
<b>Index</b>	<b>73</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Bildrekonstruktion durch ein Hologramm. . . . .	7
2.2	2D- und 3D-Darstellung der Speckle-Muster-Intensitätsverteilung in der Beobachtungsebene . . . . .	8
2.3	An einer rauen Oberfläche gestreute Strahlen führen zu objektiven Speckles in der Beobachtungsebene. . . . .	9
2.4	Subjektive Speckleentstehung in der Bildebene eines abbildenden Systems. . . . .	10
2.5	Schnittebenen gleicher Phase. . . . .	13
2.6	Prinzipieller Aufbau eines Speckle-Interferometers. . . . .	15
3.1	Rauschfreie, synthetische, um die Zusatzphase verschobene Inter- ferogramme und errechnetes Phasenbild. . . . .	21
3.2	Schematische Darstellung der Sinus/Cosinus-Filterung. . . . .	23
3.3	Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung beim Seitenband-Aufbau. . . . .	26
4.1	Überlagerung zweier virtueller Bilder bei der Rekonstruktion mit zwei Rekonstruktionswellen. . . . .	30
4.2	Experimenteller Aufbau: (I) Graufilterscheiben, (II/III) Strahlteiler, (IV) Blenden, (V) Referenz-, Rekonstruktionsstrahlengänge, (VI) CCD- Kamera, (VII) Photoplattenhalterung, (VIII) Beleuchtungsstrahlen- gang, (IX) Objekthalterung, (X) Piezospiegel . . . . .	31
4.3	Wellenlänge in Abhängigkeit der Betriebstemperatur . . . . .	35
4.4	Ausgangsleistung bei entsprechender Betriebstemperatur . . . . .	35
4.5	Phasenbild des Objektbilds mit hohem Rauschanteil . . . . .	39
4.6	Phasenbild des Objektbilds nach dem Filtern . . . . .	39
4.7	Die Interferenzphase modulo $2\pi$ mit hohem Rauschanteil . . . . .	40
4.8	Die Interferenzphase modulo $2\pi$ nach dem Filtern . . . . .	40
4.9	Phasenzuordnung der Höhenschichtlinien . . . . .	41



4.10 Die Interferenzphase nach der Demodulation . . . . .	41
4.11 Phasenzuordnung des Phasenbilds . . . . .	41
4.12 Interferenzphase nach der Demodulation . . . . .	41
4.13 3D-Darstellung des demodulierten Phasenbilds. . . . .	42
5.1 Photoplatten-Halterung für die „in-situ-Entwicklung“. . . . .	45
7.3.1 Temperaturregeleinheit für Laserdioden . . . . .	65
7.3.2 Eingesetzte Laserdiode . . . . .	68

## Nomenklatur

$\alpha$ .....	Winkel zwischen den sich ausbreitenden Wellen, [ <i>rad</i> ]
$\beta$ .....	Proportionalitätskonstante
$\Delta w$ .....	Höhenschichtlinienabstand, [ <i>m</i> ]
$\Delta w_o$ .....	resultierender Höhenschichtlinienabstand, [ <i>m</i> ]
$\delta$ .....	Phasenlage
$\Delta\delta$ .....	resultierende Phasendifferenz
$\gamma$ .....	Modulation des Interferenzterms
$\lambda$ .....	Wellenlänge des eingesetzten Laserlichts, [ <i>m</i> ]
A .....	Apertur
$\omega$ .....	Kreisfrequenz, [ $\frac{rad}{s}$ ]
$\phi$ .....	Zusatzphase, [ <i>rad</i> ]
$\Psi$ .....	Elektrische Feldstärke der elektromagnetischen Welle
$\sigma$ .....	Standardabweichung
$\theta$ .....	Winkel zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsvektor, [ <i>rad</i> ]
$\varepsilon$ .....	Beugungswinkel
$\varphi$ .....	Winkel zwischen den Referenzstrahlengängen, [ <i>rad</i> ]
$\vec{k}$ .....	Wellenzahlvektor, Ausbreitungsvektor mit dem Betrag ( $\frac{2\pi}{\lambda}$ )
$\vec{r}$ .....	Ortsvektor, ( <i>x y z</i> )
<i>Bel.</i> .....	Index, Beleuchtungs-
<i>Beo.</i> .....	Index, Beobachtungs-
<i>e.</i> .....	Index, Empfindlichkeits-
<i>hI</i> .....	Index, holographische Interferogramm-
<i>h</i> .....	Index, Hologramm-
<i>max</i> .....	Index, maximaler -
<i>min</i> .....	Index, minimaler -
<i>ob</i> .....	Index, objektive-
<i>o</i> .....	Index, Objekt-

$p_b$ .....	Index, Phasenbild-
$re_o$ .....	Index, rekonstruierte Objektwellefront-
$re$ .....	Index, Rekonstruierte-
$R$ .....	Index, Rekonstruktion-
$r$ .....	Index, Referenz-
$su$ .....	Index, subjektive-
$A$ .....	Amplitude der Feldstärke
$a'$ .....	Bildweite, [ $m$ ]
$D$ .....	Pupillendurchmesser, [ $m$ ]
$d_{ob}$ .....	mittlere Specklegröße für objektive Speckles, [ $m$ ]
$d_{su}$ .....	mittlere Specklegröße für subjektive Speckles, [ $m$ ]
$g$ .....	Objektentfernung, [ $m$ ]
$I$ .....	Intensität, Beleuchtungsstärke
$I_0$ .....	Mittelwert der Intensität
$M$ .....	Modulation, Kontrast
$n$ .....	ganzzahlige Streifenordnung
$p$ .....	Periode der Interferenzstreifen
$S$ .....	Strahldurchmesser auf der Objektoberfläche, [ $m$ ]
$T$ .....	Amplitudentransmission
$t$ .....	Zeit, [ $s$ ]
$u, v, w$ .....	kartesische Koordinaten im Bild- oder Objektraum
A/D-Wandler .....	Analog-Digital-Wandler
bit .....	binary digit, Binärziffer: kleinste Einheit der Information
CCD .....	Charge-coupled Device
ESPI .....	Elektronic Speckle Pattern Interferometry, Elektronische Speckle-Interferometrie
IDE .....	Integrated Development Environment, Integrierte Entwicklungsumgebung
PC .....	Personalcomputer
Pixel .....	Digitaler Bildpunkt
PSF .....	Point-Spread-Function, Punktausbreitungsfunktion
RS-232 .....	serielle Schnittstelle (auch EIA-232)
SNR .....	Signal to Noise Ratio, Signal-Rausch-Verhältnis
Speckle .....	Englischer Ausdruck für Fleck

# 1 Einleitung

Die konventionelle mechanische Formvermessung tastet das Objekt punkt- oder linienweise ab. Je nach geforderter räumlicher Auflösung ist diese Methode mit einem großen Zeitaufwand verbunden.

Eine optische Formvermessung hat den Vorteil berührungslos, bildhaft, mit hoher räumlicher und mit hoher zeitlicher Auflösung die Objekttopographie zu erfassen. Es existieren sowohl nichtinterferometrische als auch interferometrische Messverfahren. Beim holographisch-interferometrischen Messverfahren handelt es sich um ein Rekonstruktionsverfahren, bei dem die rekonstruierte Lichtwellenfront komplett äquivalent zu dem ursprünglich vom Objekt ausgehenden Lichtwellenfeld ist. Jede interferometrische Messung, die mit dem Objekt durchgeführt werden kann, könnte somit auch am rekonstruierten Objektbild vorgenommen werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Auswertung von holographischen Interferogrammen zur Formvermessung. Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es, qualitativ die topographische Form eines Objektes anhand dessen holographischen Bildes automatisiert zu erfassen. Die Auswertung findet mit einem digitalen Bildverarbeitungssystem statt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Prinzip der Holographie

Wird ein photographisches Aufnahmemedium (Silberhalogenidfilm, Auge etc.) in ein Lichtwellenfeld gestellt, so wird nur die Intensität registriert. Bei einer Photoplatte wird entsprechend der Lichtintensität diese geschwärzt. Die im Lichtwellenfeld enthaltene Phaseninformation geht bei diesem Aufnahmeprozess verloren.

In der Holographie dagegen wird die Phaseninformation dadurch registriert, dass unter Verwendung von kohärentem Licht die zu registrierende Objektwelle mit einer zweiten Lichtwelle, der so genannten Referenzwelle, überlagert wird. Man spricht bei der Referenzwelle auch von kohärentem Untergrund. Bei der holographischen Aufnahme wird dann das durch Interferenz resultierende Lichtwellenfeld in der Ebene der Photoplatte aufgenommen. Das sich ergebende Interferenzmuster wird Hologramm [6] genannt.

Nach dem Huygensschen Prinzip kann aus der gegebenen Verteilung der Feldstärke eines Lichtwellenfeldes in einer Ebene das Lichtwellenfeld im ganzen Raum bestimmt werden [1].

Somit ist im Hologramm ausreichend Information gespeichert, um das Objektwellenfeld respektive das virtuelle Objektbild zu rekonstruieren. Diese Rekonstruktion findet in einer zweiten Stufe mittels der Beugung am Hologramm statt, bei der die entwickelte Photoplatte mit einer Rekonstruktionswelle beleuchtet wird. Die Rekonstruktionswelle sollte dabei vorzugsweise identisch mit der Referenzwelle sein. Das rekonstruierte Objektwellenfeld lässt nun das virtuelle Objektbild an der ehemals vom Objekt eingenommenen Stelle erscheinen. Somit ist die Holographie ein zweistufiges Verfahren zur Aufzeichnung und Rekonstruktion von Bildern beliebiger Gegenstände. Die Holographie wird unter anderem auch als Wellenfront-Rekonstruktionsverfahren bezeichnet.

### 2.1.1 Mathematische Beschreibung

Die Entstehung eines Hologramms lässt sich durch die Zweistrahlinterferenz beschreiben. Für den einfachsten Fall kann eine ebene Welle als Objektwelle und eine zweite ebene Welle als Referenzwelle angenommen werden.

Eine ebene Welle lässt sich allgemein in folgender komplexer Form darstellen:

$$\Psi(\vec{r}, t) = A e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (2.1)$$

Diese Darstellungsweise der Wellenfunktion ist ausreichend, wenn man annimmt, dass alle Wellen gleich polarisiert sind.

Für die Objekt- und Referenzwelle gilt:

$$\Psi_o(\vec{r}, t) = A_o e^{i(\omega_o t - \vec{k}_o \vec{r})} \quad (2.2)$$

$$\Psi_r(\vec{r}, t) = A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (2.3)$$

Auf die Photoplatte fällt  $\Psi_h(\vec{r}, t)$ , das aus der Überlagerung von  $\Psi_o(\vec{r}, t)$  und  $\Psi_r(\vec{r}, t)$  entsteht. Die resultierende Verteilung der Intensität  $I_h(\vec{r}, t)$  auf der Photoplatte hat die Form:

$$I_h(\vec{r}, t) = |\Psi_o(\vec{r}, t) + \Psi_r(\vec{r}, t)|^2 \quad (2.4)$$

Damit im zeitlichen Mittel das Interferenzmuster nicht verwischt, muss die Objektwelle und die Referenzwelle eine konstante Phasenbeziehung zueinander haben respektive die selbe Wellenlänge haben. Es werden daher zwei kohärente Wellen benötigt. Somit fällt die Zeitabhängigkeit heraus und man erhält nach Auflösung von (2.4):

$$I_h(\vec{r}) = A_r^2 + A_o^2 + 2A_o A_r \cos((\vec{k}_r - \vec{k}_o)\vec{r}) \quad (2.5)$$

Dies ist eine stationäre Intensitätsverteilung. Die räumliche Abhängigkeit der Intensität steckt in dem Term  $(\vec{k}_r - \vec{k}_o)\vec{r}$ .

Die eingestrahlte Intensität erzeugt ein Latentbild auf der in der Hologrammebene befindlichen Photoplatte und damit nach der Entwicklung der Photoplatte eine Amplitudentransmission  $T_h(\vec{r})$ . Zur Vereinfachung wird ein linearer Zusammenhang zwischen Intensitätsverteilung  $I_h(\vec{r})$  und Amplitudentransmission angenommen [8].

$$T_h(\vec{r}) \sim I_h(\vec{r}) \quad (2.6)$$

Bei der Rekonstruktion ergibt sich hinter dem Hologramm ein Lichtwellenfeld  $\Psi_{re}(\vec{r}, t)$ , das sich aus dem Produkt von Rekonstruktionswelle, Transmissionsfunktion und der Proportionalitätskonstante  $\beta$  berechnen lässt, wobei Merkmale, welche die holographische Emulsion vorgibt, in der Proportionalitätskonstant  $\beta$  festgehalten sind.

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta T_h(\vec{r}) \Psi_R(\vec{r}, t) \quad (2.7)$$

Dieses Produkt (2.7) ergibt schließlich folgende Summanden:

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta(A_o^2 + A_r^2) A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (2.8)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t - \vec{k}_o \vec{r})} \quad (2.9)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t + \vec{k}_o \vec{r} - 2\vec{k}_r \vec{r})} \quad (2.10)$$

Der erste Term (2.8) beinhaltet keine Information über die Objektwelle. Es ist die ungebeugte, transmittierte Rekonstruktionswelle, die um einen Transmissionsfaktor abgeschwächt ist. Die Terme (2.9) und (2.10) sind gebeugte Lichtwellenfelder. Abgesehen von einem Faktor ist (2.9) identisch mit der ursprünglichen Objektwelle, die ein virtuelles Bild vom Objekt an der ursprünglichen Position rekonstruiert. Der Term (2.10) rekonstruiert ein konjugiertes reelles Zwillingenbild vom Objekt (siehe Abbildung 2.1).

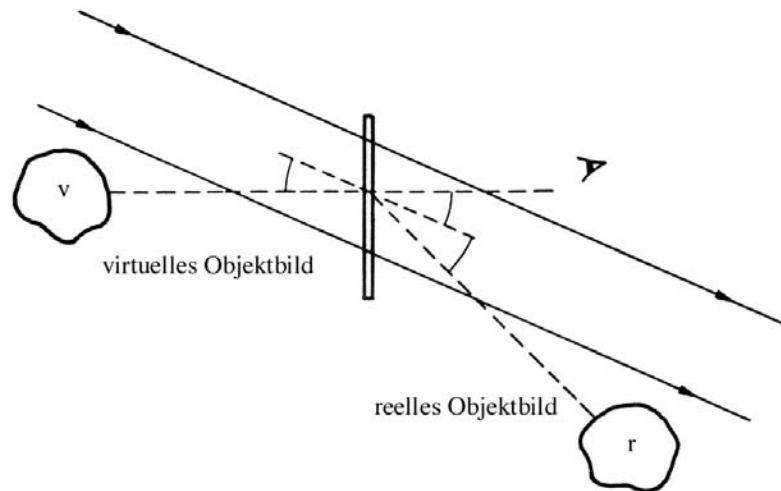


Abbildung 2.1: Bildrekonstruktion durch ein Hologramm.

Zur Vereinfachung ist die reale Objektwelle in diesem Beispiel als eben angenommen. Diese Berechnung gilt auch für komplex geformte Objektwellen. Ebenso ist angenommen, dass die Rekonstruktionswelle identisch ist mit der zur Aufnahme verwendeten Welle. Dies ist nicht zwingend notwendig, es kann durchaus eine Rekonstruktionswelle genutzt werden, die eine andere Wellenlänge besitzt. Das rekonstruierte Objektbild unterliegt dann allerdings einer Positions- und Größenänderung.



## 2.2 Speckle-Effekt

Die in der Holographie benötigte Kohärenzeigenschaft der verwendeten Lichtwellen, führt zum so genannten Speckle-Effekt der nun folgend erläutert wird.

Eine kohärent beleuchtete, optisch raue Oberfläche eines Gegenstandes erscheint dem Betrachter als eine Oberfläche, die mit einem kontrastreichen körnigem Muster überzogen ist. Dabei gilt die Oberfläche als optisch rau, wenn die Höhenvariationen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge liegen [13]. Das beobachtbare Intensitätsmuster besteht aus hellen und dunklen Fleckchen.

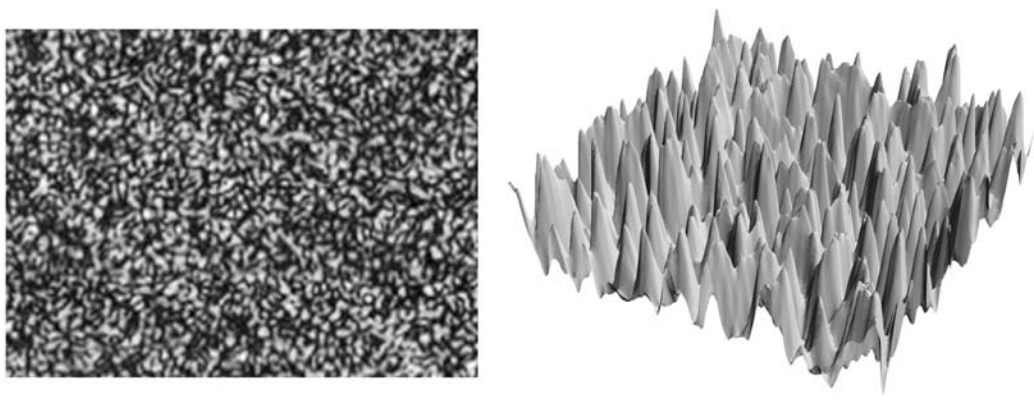


Abbildung 2.2: 2D- und 3D-Darstellung der Speckle-Muster-Intensitätsverteilung in der Beobachtungsebene

Dieser Effekt entsteht durch Interferenz aller an der Oberfläche reflektierten Elementarwellen. Die Phasenlage der einzelnen Streuwellen ist durch die Rauheit eindeutig festgelegt. Die beobachtbare stationäre Intensitätsverteilung ist somit charakteristisch für die jeweilige Oberfläche. Es werden zwei Arten von Speckle-Erscheinungen unterschieden, die nun folgend erläutert werden.

### 2.2.1 Objektive Speckles

Die Intensitätsverteilung an einem Punkt in der Beobachtungsebene ergibt sich aus der Überlagerung aller an der Oberfläche gestreuten Strahlen (Abbildung 2.3). Daher beinhaltet jeder Punkt der Beobachtungsebene Informationen über die gesamte bestrahlte Oberfläche.

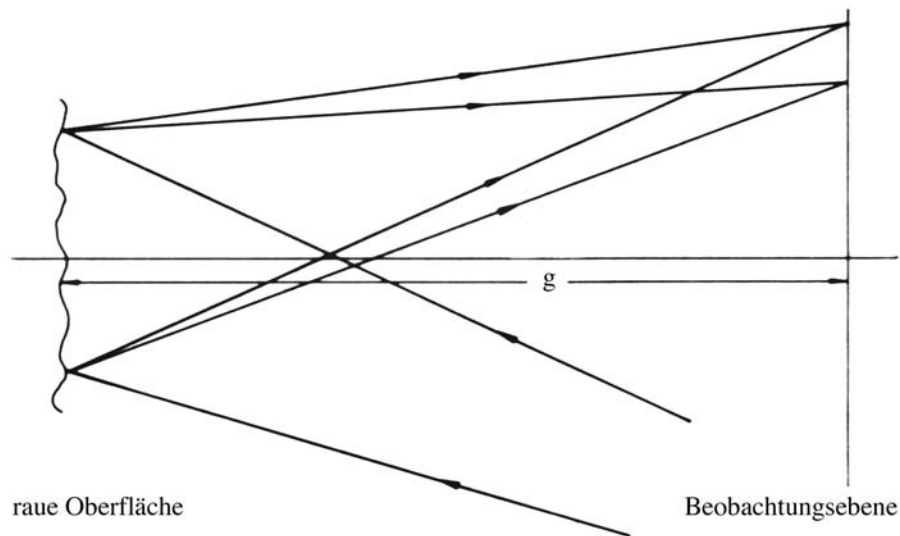


Abbildung 2.3: An einer rauen Oberfläche gestreute Strahlen führen zu objektiven Speckles in der Beobachtungsebene.

Diese beobachtbare Speckle-Erscheinung unterliegt einer Punktausbreitungsfunktion (PSF). Bei objektiven Speckles ist die entstehende mittlere Specklegröße  $d_{ob}$  in der Beobachtungsebene mit  $g$  der Entfernung von der Oberfläche und  $S$  dem Strahldurchmesser auf der Oberfläche des angestrahlten Objekts wie folgt:

$$d_{ob} = \frac{\lambda g}{S} \quad (2.11)$$

Verringert sich der Strahldurchmesser  $S$  auf der Oberfläche, so vergrößern sich die Speckles.

### 2.2.2 Subjektive Speckles

Aufgrund eines abbildenden Systems ergibt sich die Intensitätsverteilung an einem Punkt in der Bildebene aus der Überlagerung der Strahlen eines Oberflächenpunktes (Abbildung 2.4). Jeder Punkt der Bildebene beinhaltet daher Informationen über den mit ihm korrespondierenden Oberflächenpunkt.

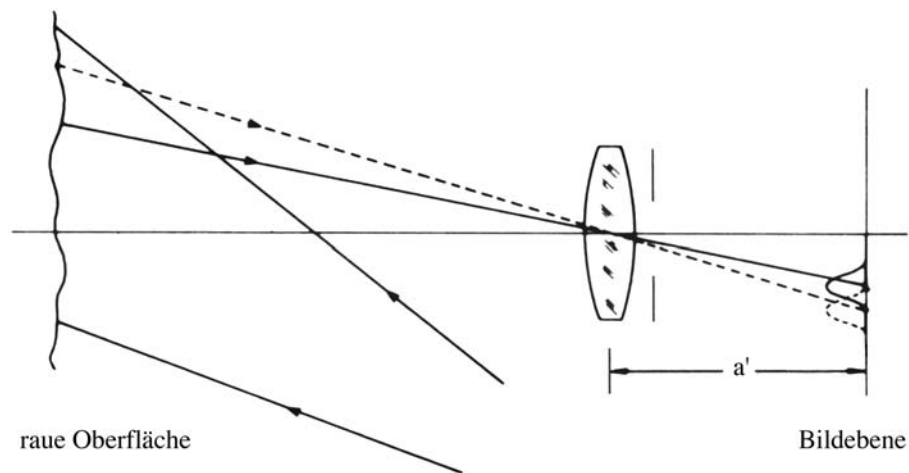


Abbildung 2.4: Subjektive Speckleentstehung in der Bildebene eines abbildenden Systems.

Auch diese beobachtbare Speckle-Erscheinung unterliegt einer Punktausbreitungsfunktion (PSF). Für subjektive Speckles ist die entstehende mittlere Specklegröße  $d_{su}$  in der Bildweite  $a'$ , mit dem Pupillendurchmesser  $D$  des abbildenden Systems wie folgt:

$$d_{su} = 2,44 \frac{\lambda a'}{D} \quad (2.12)$$

Auch hier gilt, verringert sich die Anzahl der Strahlen, die zum Punktbild beitragen, aufgrund des Blendendurchmessers  $D$ , so vergrößern sich die Speckles. Die Specklegröße bei einem abbildenden System oder auch Hologramm hängt also von der Apertur ab, die wie ein Tiefpassfilter wirkt.

In der Holographie sind Speckles aufgrund ihrer auflösungsmindernden Eigenschaft unerwünscht, da sie ein störendes Untergrundrauschen darstellen. Andererseits wird der Speckle-Effekt für interferometrische Verfahren herangezogen. Die elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI) ist eines der wichtigsten Messverfahren, das sich den Speckle-Effekt zunutze macht.

## 2.3 Objektformvermessung

### 2.3.1 Holographische Interferometrie

Die klassische Interferometrie wird durch die holographische Interferometrie ergänzt, in dem diese die Möglichkeit bietet, auch komplex gestaltete Oberflächen optisch auszuwerten. Die holographische Interferometrie wird eingesetzt, wenn es darum geht, einen ganzheitlichen Vergleich zeitlich versetzter Zustände von ein und dem selben Objekt zu erhalten. Die Fähigkeit, zeitlich versetzte Objektzustände zur Interferenz zu bringen, ist der Hauptvorteil gegenüber der klassischen Interferometrie.

Wichtige Messverfahren der holographischen Interferometrie sind:

- Doppelbelichtungs-Holographie (double exposure)
- Echtzeit-Holographie (realtime)
- Zeitmittelungs-Holographie (time average)
- Computer generierte Interferogramme
- Sandwich-Holographie
- Konturlinien-Holographie (contouring)
- Elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI)

Die meisten holographisch-interferometrischen Messverfahren untersuchen statische oder dynamische Verformungen beziehungsweise Verschiebungen des Objekts. Das Konturlinienverfahren hingegen lässt eine qualitative und quantitative Auswertung der Objekttopographie zu. Es stellt die Grundlage zu der in dieser Arbeit vorgestellten Formvermessung dar.

### 2.3.2 Konturlinien-Holographie

Die Tiefeninformation des holographisch aufgenommenen Objektes ist im Hologramm respektive auf der Photoplatte gespeichert. Dieses Interferogramm ist allerdings visuell nicht auswertbar. Durch die Erzeugung von Isohypsen beziehungsweise Höhenschichtlinien auf dem rekonstruierten Objektbild erhält man quantitative Informationen über die Objekttopographie. Diese Höhenschichtlinien sind Linien konstanten Abstands und stellen Orte gleicher Tiefe oder Höhe dar, analog den Höhenlinien auf einer Landkarte. Beim holographisch rekonstruierten Objektbild entspricht das Linien gleicher Phasenlage.

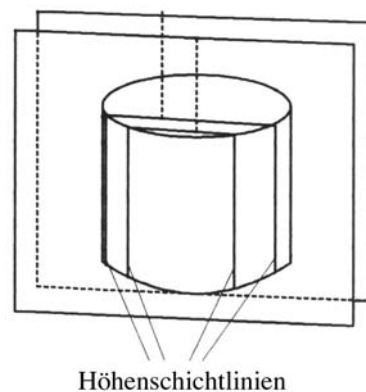


Abbildung 2.5: Schnittebenen gleicher Phase.

Zur Erzeugung von Höhenschichtlinien wird hauptsächlich das Zwei-Wellenlängen-Verfahren angewendet. Ebenso anwendbar ist die Änderung des Objekt umgebenden Mediums, das zu einer veränderten optischen Weglänge führt.

Das Prinzip bei der Erzeugung von Höhenschichtlinien ist, dass zwei rekonstruierende Objektwellen miteinander interferieren und somit das Objektbild mit hellen und dunklen Linien überziehen. Dieses holographische Interferogramm ist charakteristisch für die Objektoberfläche.

Das Zwei-Wellenlängen-Verfahren bietet hinsichtlich der Variation von Höhenschichtlinienabständen die einfachsten Voraussetzungen für die Formvermessung.

### 2.3.3 Holographische Zwei-Wellenlängen-Verfahren

Die holographische Aufnahme findet mit beiden Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  auf einer Photoplatte statt. Je nach Lasertyp kann dies gleichzeitig oder nacheinander stattfinden. Auf der Photoplatte sind bei der Herstellung eines derartigen Interferogrammes zwei Hologramme gespeichert. Die entwickelte Photoplatte wird anschließend mit einer der Referenzwellen, zum Beispiel  $\lambda_1$ , beleuchtet. Die ursprünglich von der Wellenlänge  $\lambda_1$  stammende Objektwelle wird originalgetreu rekonstruiert. Gleichzeitig wird die von der Wellenlänge  $\lambda_2$  stammende Objektwelle axial versetzt rekonstruiert. Die Verschiebung der Oberflächenpunkte führt zu einem Gangunterschied und bildet ein Liniensystem. Die rekonstruierte Phasenverteilung stellt damit ein Höhenschichtprofil des Objektes dar. Die resultierenden Höhenschichtlinien hängen von der Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda$  und vom Empfindlichkeitsvektor ab. Dieser Vektor wird durch die Geometrie des optischen Aufbaus bestimmt.

Wie in Kapitel 2.1.1 gezeigt, stellt der zweite Summand (2.9) die rekonstruierte Objektwelle dar. Im folgenden wird dieser zweite Summand (2.9) mit  $\Psi_{re_0}$  bezeichnet. Für die mit Wellenlängen  $\lambda_1$  rekonstruierten zwei Objektwellen  $\Psi_{re_0\lambda_1}$  und  $\Psi_{re_0\lambda_2}$  folgt:

$$\Psi_{re_0\lambda_1}(\vec{r}, t) = \beta A_r^2 A_0 e^{i(\omega_r t - \vec{k}_0 \vec{r})} \quad (2.13)$$

$$\Psi_{re_0\lambda_2}(\vec{r}, t) = \beta A_r^2 A_0 e^{i(\omega_r t - \vec{k}_0 \vec{r} + \vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (2.14)$$

Die resultierende Phasendifferenz der zwei rekonstruierten Objektwellen  $\Psi_{re_0\lambda_1}$  und  $\Psi_{re_0\lambda_2}$  ist:

$$\Delta\delta = (\vec{k}_{r2} - \vec{k}_{r1}) \cdot \vec{r} \quad (2.15)$$

und führt zu Höhenschichtlinien mit einem Höhenabstand von:

$$\Delta w = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (2.16)$$

Dieser Höhenabstand wird als Empfindlichkeit bezeichnet. Im idealsten Fall entspricht die Empfindlichkeit der halben Wellenlänge  $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ , diese ist im Allgemeinen immer größer.

Die Gleichung (2.16) gilt exakt nur für kleine Wellenlängendifferenzen, da bei einem Seitenbandaufbau neben der axialen Verschiebung auch noch eine laterale Verschiebung und Maßstabsänderung zu berücksichtigen ist. Damit Interferenzen zwischen beiden rekonstruierten Objektbildern noch entstehen, muss der entstehende laterale Bildversatz klein gegenüber der holographischen Auflösung sein. Dies kann unter anderem durch das dichte Positionieren von Objekt und Photoplatte realisiert werden.

### 2.3.4 Elektronische Speckle-Interferometrie

Die Elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI) macht sich den Speckle-Effekt so zunutze, dass die stationäre Intensitätsverteilung der subjektiven Speckles als Objektpunktsignale verstanden wird. Subjektive Speckles dienen dabei als Orte konstanter Phasenlage, mit deren Hilfe interferometrische Messungen direkt auf dem CCD-Element einer digitalen Kamera vollzogen werden können. Dabei wird neben der Objektwelle auch eine Referenzwelle in den Strahlengang eingekoppelt. Somit interferieren auf dem CCD-Element das Specklefeldmuster mit der Referenzwelle. Das führt zu einer entsprechenden Intensitätsverteilung auf dem CCD-Element.

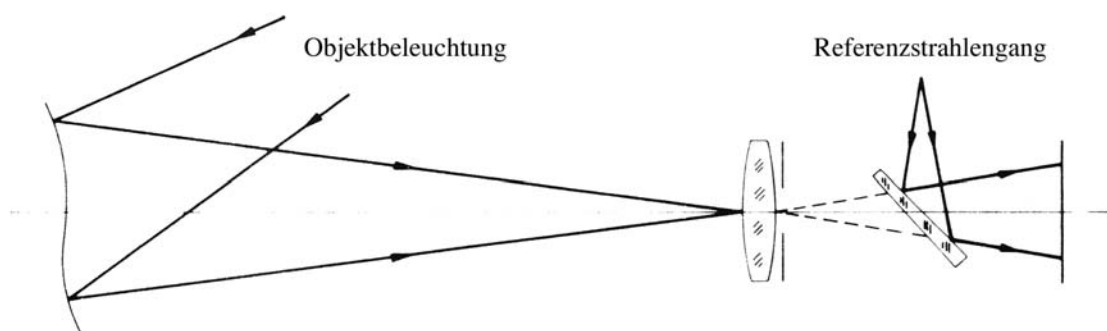


Abbildung 2.6: Prinzipieller Aufbau eines Speckle-Interferometers.

Um vom einzelnen Kamerapixel Rückschlüsse auf separate Oberflächenbereiche ziehen zu können, ist es wichtig, dass die Speckle-Größe im Mittel mindestens ein Kamerapixel groß ist. Wird nun der optische Zustand des Objekts



geändert, so ändert sich die Phasenlage zwischen Specklefeldmuster und Referenzwelle, was zu einer Änderung der Intensitätsverteilung führt. Analog zur Doppelbelichtungs-Holographie lassen sich diese Intensitätsverteilungen direkt elektronisch aufzeichnen. Diese einzelnen Hologramme sind allerdings visuell nicht auswertbar. Erst das nachgeschaltete Verarbeitungssystem ergibt ein sogenanntes Differenzbild, das äquivalent zu einem holographischen Interferogramm ist.

Die holographischen Verfahren besitzen durch den Entwicklungsprozess des Hologramms meist eine beträchtliche zeitliche Verzögerung zwischen Aufnahme und Rekonstruktion, das ESPI Verfahren hingegen lässt eine schnelle Verarbeitung zu und damit verbunden die Möglichkeit von Echtzeit-Untersuchungen. Dieses Verfahren wird auch als Speckle- oder elektronische Holographie bezeichnet, was etwas irreführend ist, da hierbei kein Hologramm im eigentlichen Sinn rekonstruiert wird.

### 2.3.5 ESPI Zwei-Wellenlängen-Verfahren

In Analogie zum holographischen Zwei-Wellenlängen-Verfahren in Kapitel 2.3.3 ist das ESPI-Verfahren in ein Konturlinien-Verfahren überführbar. Dabei werden die zwei verschiedenen optischen Zustände des Objekts durch die verschiedenen Wellenlängen des verwendeten Laserlichts hervorgerufen. Die interferometrischen Aufnahmen finden mit beiden Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  nacheinander statt. Die aufgezeichneten Interferogramme werden anschließend digital zu einem Differenzbild weiter verarbeitet. Dieses Differenzbild stellt das entsprechende Höhenschichtlinienbild dar.

Aufgrund der Specklegröße, des Speckle-Rauschens und des geringeren Dynamik-Verhaltens der CCD-Sensoren gegenüber einem holographischen Film ist die Auflösung der ESPI Verfahren etwas geringer als bei der Konturlinien-Holographie.

Das ESPI-Verfahren wird in dieser Arbeit zur Verifizierung der verwendeten Wellenlängendifferenzen genutzt. Dabei wird das Differenzbild visuell ausgewertet.

## 2.4 Amplitudenhologramme versus Phasenhologramme

Für eine problemlose Weiterverarbeitung der holographischen Interferogramme sollten die rekonstruierten Bilder ausreichend hell sein. Dies hängt von der Beugungseffizienz ab, gemeint ist der Wirkungsgrad zwischen der Helligkeit erster Beugungsordnung und eingestrahelter Helligkeit. Im Vergleich zu Amplitudenhologrammen mit maximal 6% können Phasenhologramme bei entsprechendem Aufnahmematerial eine Beugungseffizienz von bis zu 99% erreichen. Speziell die Volumen-Transmissions-Phasenhologramme erreichen diesen Wirkungsgrad. Mit Volumen-Hologrammen werden Hologramme klassifiziert, bei denen die Schichtdicke des Aufnahmematerials viel größer ist als die durchschnittliche Größe der Interferogrammstrukturen. Im Allgemeinen sind es Volumen-Hologramme, mit denen gearbeitet wird.

Für das Herstellen eines Masterhologramms werden daher ausschließlich Phasenhologramme entwickelt. Für den Entwicklungsprozess heißt das, dass sich an das Entwicklungs- und das Stoppbad ein Bleichbad anschließt. Das entwickelte elementare Silber wird dabei herausgebleicht, während das nicht belichtete und damit auch nicht entwickelte Silberhalogenid weiter in der Schicht verbleibt. Durch die Brechzahldifferenz zwischen Silberhalogenid und Gelatine an den belichteten Stellen entstehen Phasenstrukturen, die bei der Rekonstruktion entsprechend beugen.

Ingredienzen des Entwicklungsprozeß:

- Entwickler

Ascorbinsäure ( $C_6H_8O_6$ ) .....  $36 \frac{g}{l}$

Natriumhydrogenphosphat ( $Na_2HPO_4$ ) .....  $56,8 \frac{g}{l}$

Natriumhydroxid ( $NaOH$ ) .....  $24 \frac{g}{l}$

- Stoppbad

Essigsäure ( $CH_3COOH$ ) ..... 2%-ig

- Bleichbad

Kaliumdichromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) .....	4 $\frac{g}{l}$
konzentrierte Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) .....	4 $\frac{ml}{l}$

Als photographisches Material wurde von der Fa. *Agfa-Gevaert AG* der *Holotest 8E75HD* auf Glassplatten verwendet. Sensibilisiert für den roten Spektralbereich und mit einer Schichtdicke von  $7\mu m$  ist bei diesem Material eine Auflösung von über  $3000 \frac{Linien}{mm}$  möglich.

### 3 Höhenschichtlinienanalyse

Die Höhenschichtlinienanalyse hat in der Formvermessung allgemeine Bedeutung. Die Prinzipien lassen sich sowohl auf interferometrische Verfahren als auch auf z.B. Moiré-Verfahren und alle anderen Streifenprojektionsverfahren anwenden. Ein erfahrener Beobachter kann durchaus ein Interferogramm visuell beurteilen, eine visuelle Interpretation ist allerdings verhältnismäßig ungenau. Daher haben sich computergestützte Verfahren zur Linienauswertung etabliert.

In der Interferometrie wird zwischen dynamischen und statischen Verfahren zur Linienauswertung unterschieden. Dynamische Verfahren benötigen mehrere Interferogramme von optisch verschiedenen Zuständen. Statische Verfahren benötigen nur ein Interferogramm, um eine Auswertung vorzunehmen. Für die in dieser Arbeit vorgenommene Auswertung wurde ausschließlich das dynamische Phasenschiebeverfahren eingesetzt.

#### 3.1 Phasenschiebeverfahren

Das Phasenschiebeverfahren ist eine Technik, die die Phasenverteilung eines Interferogramms aus gemessenen Intensitäten bestimmt. Beschreibbar über die Zweistrahlinterferenz wird die Intensität eines Punktes im Interferogramm wie folgt ausgedrückt:

$$I(\delta) = I_0 (1 + \gamma \cos(\delta)) \quad (3.1)$$

mit

$$I_0 = A_1^2 + A_2^2 \quad \text{Mittelwert der Intensität und}$$

$$\gamma = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2} \quad \text{Modulation des Interferenzterms.}$$

Da lediglich die Intensität gemessen werden kann, befinden sich in dieser Gleichung drei Unbekannte ( $I_0, \gamma, \delta$ ). Zur Ermittlung der Phasenverteilung des Interferogramms wird ein lösbares Gleichungssystem benötigt. Durch Einführung einer bekannten Zusatzphase ( $\phi = \frac{\pi}{2}$ ) und durch mehrere zeitlich sequentiell durchgeführte Intensitätsmessungen ergeben sich folgende Gleichungen:

$$I_1(\delta) = I_0(1 + \gamma \cos(\delta)) \quad (3.2)$$

$$I_2(\delta) = I_0(1 + \gamma \cos(\delta + \frac{\pi}{2})) \quad (3.3)$$

$$I_3(\delta) = I_0(1 + \gamma \cos(\delta + \pi)) \quad (3.4)$$

$$I_4(\delta) = I_0(1 + \gamma \cos(\delta + \frac{3\pi}{2})) \quad (3.5)$$

Bei diesen Intensitätsmessungen wird eine Verschiebung der interferierenden Lichtwellen untereinander um die Zusatzphase vorgenommen. Über die Quadrantenrelationen der trigonometrischen Funktionen ist das Gleichungssystem auflösbar zu:

$$\frac{\sin(\delta)}{\cos(\delta)} = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (3.6)$$

Aus dem Gleichungssystem kann also die Phasenverteilung des Interferogramms aus vier gemessenen Intensitäten berechnet werden:

$$\delta = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (3.7)$$

Dieser Algorithmus wird 4-Schritt-Algorithmus genannt. Das punktweise Lösen des Gleichungssystems (3.2-3.5) erfolgt computergestützt mit Hilfe eines digitalen Bildverarbeitungssystem.

Durch getrennte Auswertung der Vorzeichen im Zähler und Nenner von (3.7) kann für die zyklometrische *arctan*-Funktion eine eindeutige Zuordnung auf den Wertebereich  $[0, 2\pi]$  erzielt werden. Die Vorzeichen werden von  $\sin(\delta)$  und  $\cos(\delta)$  festgelegt. Für einen positiven Zähler und Nenner befindet sich der Phasenwert im ersten Quadranten, für einen positiven Zähler und negativen Nenner befindet sich der Phasenwert im zweiten Quadranten, et cetera.

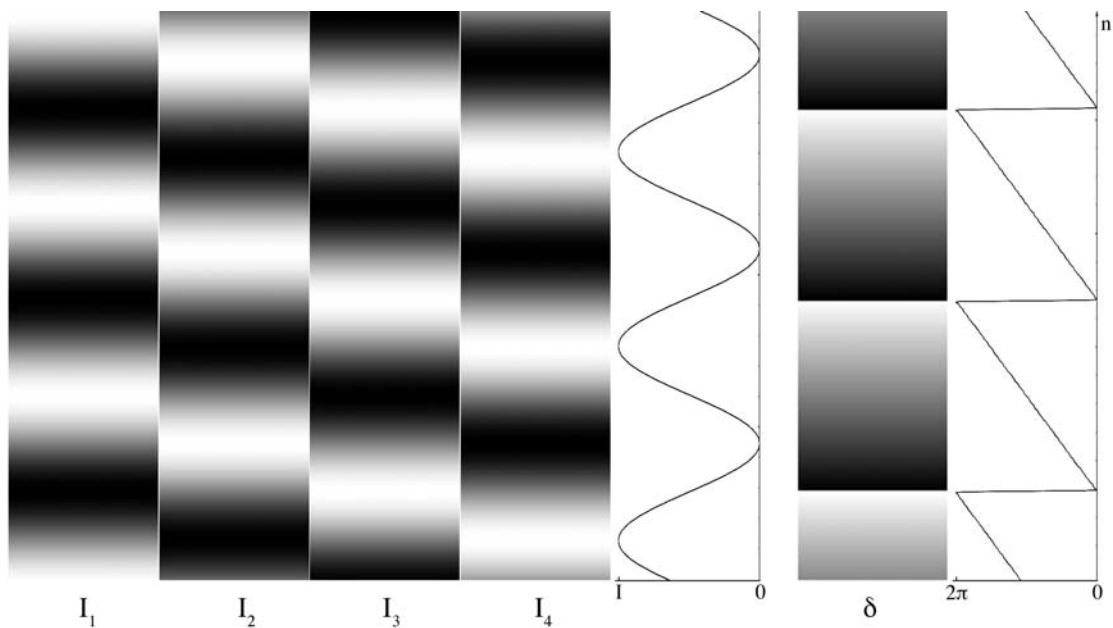


Abbildung 3.1: Rauschfreie, synthetische, um die Zusatzphase verschobene Interferogramme und errechnetes Phasenbild.

	I	II	III	IV
$\sin(\delta)$	+	+	-	-
$\cos(\delta)$	+	-	-	+

Tabelle 5.1: Relation zwischen Phasenwerten und Vorzeichen von Zähler und Nenner.

Allen Phasenschiebverfahren ist die Bestimmung der Interferenzphase modulo  $2\pi$  gemeinsam. Im Gegensatz zu harmonischen Interferenzstreifenmustern, ergibt sich das typische Phasenmuster, dessen Linien einen sägezahnartig scharfen Übergang aufweisen (Abbildung 3.1). Die Anzahl und die Lage der vorhandenen Phasensprünge korrespondieren mit dem dazugehörigen Interferenzstreifenmuster. Die endgültige Interferenzphase ergibt sich erst, nachdem die stetigen Teilintervalle richtig zusammengesetzt werden.

Das Phasenbild mit kodierter Interferenzphase ist wie folgt zu interpretieren:

Im holographischen Interferogramm ist die Interferenzphase

$$\delta_{hl} = n 2\pi + \delta, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.8)$$

Diese Interferenzphase  $\delta_{hl}$  kann aus dem sägezahnartigen Phasenbild durch die Addition der Streifenordnung  $n$  und der zwischen den Sprungstellen linear interpolierten Phase

$$\delta_{pb} = \delta_{hl} \pmod{2\pi} \quad (3.9)$$

gebildet werden.

$$\delta_{hl} = n 2\pi + \delta_{pb} \quad (3.10)$$

Somit ist die gemessene stetige Interferenzphase aus dem sägezahnartigen Phasenbild durch Addition der Streifenordnung und der  $\pmod{2\pi}$  Phasenlage ermittelbar.

Neben diesem 4-Schritt-Algorithmus existieren noch ein 3-Schritt-Algorithmus und eine Reihe weiterer Mehrschrittalgorithmen. Der 3-Schritt-Algorithmus ist recht empfindlich gegenüber falschen Phasenverschiebungen. Die Mehrschrittalgorithmen sind aufgrund der Redundanz an Information fehlertoleranter. Es müssen jedoch hierfür mehr Phaseninformationen erzeugt und anschließend verrechnet werden, was entsprechend aufwendiger ist. In dieser Arbeit kommt ausschließlich der 4-Schritt-Algorithmus zum Einsatz.

### 3.2 Filterung und Demodulation von Phasenbildern

Die in der holographischen und in der Speckle-Interferometrie entstehenden Phasenbilder stellen die Interferenzphase  $\delta$  modulo  $2\pi$  dar. Diese sind aufgrund des elektronischen und optischen Rauschens zusätzlich mit Artefakten behaftet. Damit eine nahezu fehlerfreie Auswertung der Phasenbilder möglich ist, muss das Rauschen mit speziellen Filteralgorithmen herausgefiltert werden.

Einfache lineare Mittelwertfilter sind für Phasenbilder mit hochfrequentem Rauschen wenig geeignet. Diese führen eine unerwünschte Glättung der bedeutungsvollen Sägezahn-Modulation durch, was zu einem Informationsverlust führt. Besonders die Sprungstellen der Sägezahn-Funktion wären betroffen. Das Ergebnis dieser Punktoperation wird demnach zu sehr von anormalen Werten in der Operationsmatrix beeinflusst. Für nicht normal verteilte Werte ist der nichtlineare Medianfilter-Algorithmus geeignet. Durch seine Immunität gegen Punktstörungen eignet sich die Median-Filterung gut für die Beseitigung des Rauschens von Phasenbildern. Diese ist allerdings sehr rechenintensiv, da die Werte in der Operationsmatrix nach ihrer Größe sortiert werden.

Prinzipiell stellt die direkte Filterung der Sägezahn-Funktion eine Herausforderung dar, da die Sprungstellen schwierig von Artefakten zu unterscheiden sind. Bei genauerer Betrachtung von (3.6) und (3.7) wird ersichtlich, dass das sägezahnartige Phasenbild in ein Sinus- und Cosinus-Verteilungsbild transformiert werden kann. In den transformierten Verteilungsbildern treten die scharfen Sprungstellen wie beim Phasenbild nicht mehr auf.

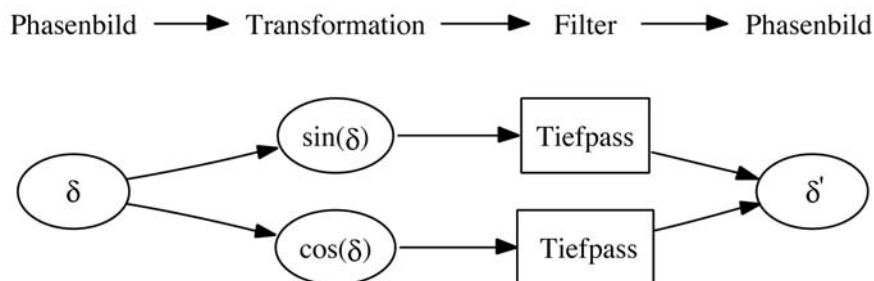


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Sinus/Cosinus-Filterung.



Die wesentlichen Vorteile dieser Transformation bestehen darin, dass selbst einfache lineare Filteralgorithmen gute Resultate erzielen und die nicht vorhandenen Sprungstellen zu einem geringeren Phaseninformations-Fehler führen. Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, wird dann aus den gefilterten Sinus- und Cosinus-Verteilungsbildern das Phasenbild wieder rekonstruiert.

In Kapitel 3.1 wurde bereits erläutert, wie die Phasenbilder zu interpretieren sind. Das Phasendemodulations-Verfahren automatisiert diesen Prozess, in dem das Phasenbild zeilen- oder spaltenweise analysiert wird. Das Verfahren setzt die Interferenzphase bildhaft um, indem die  $2\pi$  Intervalle im Phasenbild stetig ergänzt werden. Die Streifenordnung  $n$  der Interferenzphase wird dabei in Abhängigkeit von der Steigung des Kurvenverlaufs vor und hinter der Sprungstelle gemäß

$$\delta(u_{pb}, v_{pb}) \lesssim 2\pi \quad \wedge \quad \delta(u_{pb} + 1, v_{pb}) \gtrsim 0 \quad (3.11)$$

$$\rightsquigarrow \forall u \geq u_{pb} : \quad n \rightarrow n + 1, \quad \delta(u, v) \rightarrow \delta(u, v) + n2\pi \quad (3.12)$$

$$\delta(u_{pb}, v_{pb}) \gtrsim 0 \quad \wedge \quad \delta(u_{pb} + 1, v_{pb}) \lesssim 2\pi \quad (3.13)$$

$$\rightsquigarrow \forall u \geq u_{pb} : \quad n \rightarrow n - 1, \quad \delta(u, v) \rightarrow \delta(u, v) + n2\pi \quad (3.14)$$

sukzessive angepasst, jeweils um den Wert +1 bei positiver Steigung und um den Wert -1 bei negativer Steigung. Schließlich liefert die Addition der in 3.7 berechneten Phasenwerte  $\delta(u, v)$  (*mod*  $2\pi$ ) zu den Streifenordnungen  $n$  die kontinuierlich verlaufende Interferenzphase.

Die Phasensprünge finden im idealen Fall für Werte der Interferenzphase im Bereich von 0 und  $2\pi$  statt. Nach der Filterung des Phasenbilds können allerdings weiterhin Artefakte vorhanden sein. Um die vorhandenen Phasensprünge sicher zu erkennen, muss das Differenzkriterium benachbarter Werte kleiner  $2\pi$  sein, damit nicht fälschlicherweise zusätzliche Phasensprünge erkannt werden. Sollten einzelne falsche Phasenwerte aufgrund von Artefakten zu einem Fehler bei der Demodulation führen, pflanzt sich der Fehler aufgrund der Inkrementierung und Dekrementierung der Streifenordnungen fort. Daher ist die Filterung

des Rauschens ein wichtiger Verarbeitungsschritt für die erfolgreiche Anwendung des Phasendemodulations-Verfahrens. Auch Vorwissen über die Topographie des Objektes sollte vorhanden sein, da Objekte mit einem ungewöhnlichen Höhenprofil oder steilen Strukturen eng beieinander liegende Sprungstellen hervorrufen.

### 3.3 Empfindlichkeitsvektor

Die Definition der Empfindlichkeit in Kapitel 2.3.3 mit (2.16) geht davon aus, dass der Höhenunterschied im Objekt vollständig zu einem Gangunterschied führt beziehungsweise vollständig eine Phasendifferenz  $\Delta\delta$  hervorruft.

Bei einem holographischen Seitenband-Aufbau wird diese Bedingung nicht erfüllt. Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen wirken unterschiedliche Phasenlagen:

$$\delta_1 = \vec{k}_{Bel.} \cdot \vec{r} \quad (3.15)$$

$$\delta_2 = \vec{k}_{Beo.} \cdot \vec{r} \quad (3.16)$$

zum einen durch die Beleuchtungsrichtung  $\vec{k}_{Bel.}$  bei der Aufnahme, zum anderen durch die Beobachtungsrichtung  $\vec{k}_{Beo.}$  bei der Rekonstruktion.

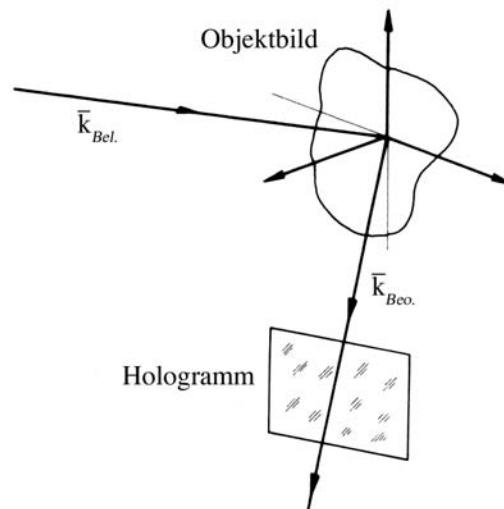


Abbildung 3.3: Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung beim Seitenband-Aufbau.

Für die resultierende Phasendifferenz gilt:

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 = (\vec{k}_{Beo.} - \vec{k}_{Bel.}) \cdot \vec{r} \quad (3.17)$$

Die Höhenschichtlinienebenen verlaufen orthogonal zum dem Vektor

$$\vec{k}_e = \vec{k}_{Beo.} - \vec{k}_{Bel.} \quad , \quad (3.18)$$

der Empfindlichkeitsvektor genannt wird. Dieser Empfindlichkeitsvektor  $\vec{k}_e$  liegt auf der Winkelhalbierenden von  $\vec{k}_{Bel.}$  und  $\vec{k}_{Beo.}$ .

Die Empfindlichkeit (2.16) gilt damit in Richtung des Empfindlichkeitsvektors. Für die Auswertung des Höhenunterschieds im Objekt heißt das, dass der Höhenabstand - gesehen aus der Beobachtungsrichtung - zu einem Gangunterschied führt, der gleich der Projektion des Höhenabstands auf den Empfindlichkeitsvektor ist. Es spielt somit nur die Komponente des Höhenvektors eine Rolle, die parallel zum Empfindlichkeitsvektor liegt. Für den resultierenden Höhenabstand einer Höhenschichtlinie auf dem Objekt gilt:

$$\Delta w_o = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(1 + \cos \theta)} \quad , \quad (3.19)$$

wobei  $\theta$  der Winkel ist, der zwischen Beleuchtungsvektor und Beobachtungsvektor aufgespannt wird.

Für den einfachsten Fall gilt mit (3.19) für den Höhenabstand  $|w|$  zwischen zwei Objektpunkten, die exakt  $n$  Höhenschichtlinien von einander entfernt sind:

$$|w| = n \Delta w_o \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad , \quad (3.20)$$

wobei die Objekttopographie stetig fallend oder ansteigend ist.

Um eine verzerrungsfreie Formvermessung vorzunehmen, sollte daher der optische Aufbau so gestaltet sein, dass der Empfindlichkeitsvektor annähernd gleich dem Beobachtungsvektor ist, wie zum Beispiel bei einem Michelson-Interferometer. Bei einem Seitenbandaufbau und sphärischer Beleuchtung gehen dann die ellipsoidischen Phasenflächen in konzentrische Kugelflächen über.

## 4 Formvermessung am holographischen Objektbild

Zur automatisierten computergestützten Auswertung von Interferogrammen hat sich das Phasenschiebverfahren als wichtige Methode erwiesen. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, bedarf solch eine Auswertung einer definierten Veränderung der Phasenlage der Interferenzstreifen. Für die Formvermessung am holographischen Objektbild bedeutet dies eine definierte Veränderung der Interferenzmuster des holographischen Interferogramms. Werden die relativen Phasenlagen der rekonstruierten Objektwellen untereinander verändert, so wird ebenso eine Veränderung der Phasenlage der Interferenzmuster vorgenommen. Das im Kapitel 2.3.3 beschriebene holographische Interferogramm respektive die resultierende Intensitätsverteilung

$$I_{hI} = |\Psi_{re_o\lambda_1} + \Psi_{re_o\lambda_2}|^2 \quad (4.1)$$

$$I_{hI} = 2(\beta A_r^2 A_o)^2 [1 + \cos(k_{r2}\vec{r} - k_{r1}\vec{r})] \quad (4.2)$$

lässt eine Manipulation der Phasenlage der Interferenzstreifen nicht zu, da beide Objektwellen  $\Psi_{re_o\lambda_1}$  und  $\Psi_{re_o\lambda_2}$  von einer Rekonstruktionswelle gleichzeitig rekonstruiert werden. Der gewählte Ansatz ist, dass zwei vom Einfallswinkel her verschiedene Referenzwellen zur sequentiellen Aufnahme des Master-Hologramms verwendet werden. Bei der Rekonstruktion wird jede Objektwelle mit einer eigenen Rekonstruktionswelle freigesetzt. Im Vergleich zu einfachen Doppelbelichtungsaufbauten erlaubt es die räumliche Trennung, einen Rekonstruktionsstrahlengang separat von dem anderen zu manipulieren. Dies erfolgt durch Änderung der optischen Weglänge mittels eines piezoelektrischen verschiebbaren Spiegels. Dadurch kann das Interferenzfeld für die Phasenmessung diskret in geeigneter Weise modifiziert werden. Für die Auswertung werden die holographischen Interferogramme mit einer CCD-Kamera aufgenommen und nach dem Phasenschiebverfahren ausgewertet.

## 4.1 Rekonstruktionssystem

Die holographische Doppelbelichtungsaufnahme findet mit beiden Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  nacheinander mit jeweils korrespondierenden Referenzwellen auf einer Photoplatte statt. Dadurch werden zwei Hologramme auf der Photoplatte gespeichert. Bei der Rekonstruktion mit Wellenlänge  $\lambda_1$  über beide Referenzstrahlengänge wird die ursprünglich von der Wellenlänge  $\lambda_1$  stammende Objektwelle original getreu rekonstruiert. Gleichzeitig wird die von der Wellenlänge  $\lambda_2$  stammende Objektwelle versetzt rekonstruiert. Dieser Versatz führt zu einem Gangunterschied beziehungsweise Liniensystem.

Bei einem sehr kleinen Winkel zwischen den Referenzwellen werden allerdings auch die jeweiligen Bilder der nicht zueinander korrespondierenden Hologramme und Rekonstruktionswellen rekonstruiert. Diese sogenannten Kreuzrekonstruktionen überlagern zusätzlich bei der Rekonstruktion zwei weitere virtuelle Bilder. Das führt zu einer Reduzierung des Kontrastes des auszuwertenden Interferenzmusters [4]. Für eine problemlose Weiterverarbeitung der holographischen Interferogramme sollten die nicht erwünschten Kreuzrekonstruktionen räumlich von den gewünschten rekonstruierten Objektwellen getrennt werden.

Mit einem großen Winkel ( $\varphi \sim \frac{\pi}{2}$ ) zwischen den Referenzwellen werden die Bilder nicht nur räumlich getrennt, sondern die Kreuzrekonstruktionen werden bei Volumen-Hologrammen gar nicht erst rekonstruiert. Das liegt daran, dass die Braggsche Bedingung [5] nicht erfüllt wird. Die jeweilige Rekonstruktionswelle beleuchtet das *nicht* dazu korrespondierenden Hologramm nicht aus passender Richtung. Der Aufbau wird daher mit einem großen Winkel zwischen beiden Referenzwellen beziehungsweise Rekonstruktionswellen konzipiert. Dieser Aufbau ist jedoch sehr empfindlich gegenüber Fehljustierungen der entwickelten repositionierten Photoplatte sowie der Rekonstruktionswellen. Abbildung 4.1 illustriert schematisch den optischen Aufbau.

Bei diesem dualen Seitenbandaufbau weichen die rekonstruierten Objektwellenfronten  $\Psi_{re_0\lambda_1}$  und  $\Psi_{re_0\lambda_2}$  respektive virtuellen Objektbilder zusätzlich zum axialen Versatz lateral voneinander ab. Damit die beiden Bilder interferieren, muss in der Bildebene das Punktbild größer sein als die Verschiebung der Bild-

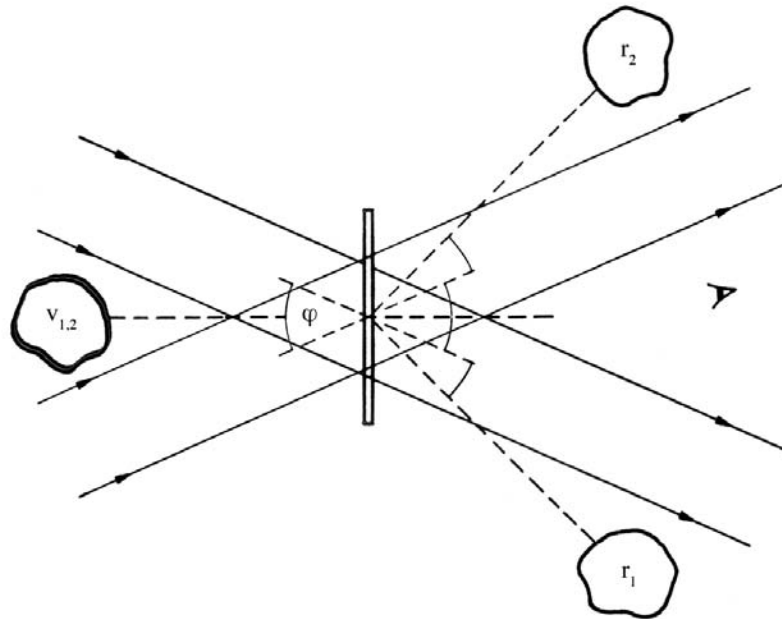


Abbildung 4.1: Überlagerung zweier virtueller Bilder bei der Rekonstruktion mit zwei Rekonstruktionswellen.

punkte. Das Rekonstruktionssystem muss also eine Auflösungsbegrenzung im Objektbild haben. Die Auflösung wird beim Aufnahmeschritt festgelegt, wobei die Größe des Hologramms ein wesentlicher Faktor ist. Diese Größe bestimmt schließlich die Auflösung in der Bildebene. Somit legt die effektive Apertur des Hologramms die Auflösung fest. Die nötige kleine Apertur führt wiederum zu einem sehr „speckligen“ Liniensystem, sorgt allerdings auch dafür, dass der Empfindlichkeitsvektor nahezu konstant ist, was die Auswertung erleichtert.

## 4.2 Experimenteller Aufbau

Der zur Aufnahme des Master-Hologramms erstellte experimentelle Aufbau ist auf einem schwingungs isolierten, optischen Tisch aufgebaut worden. In Abbildung 4.2 ist der optische Aufbau dargestellt. Die Darstellung umfasst außer den optischen Komponenten eine zur Veranschaulichung nachgezeichnete Strahlführung. Der gewählte Winkel zwischen den Referenzstrahlengängen respektive Rekonstruktionsstrahlengängen (Abb.: 4.2/V) beträgt  $\varphi \sim \frac{\pi}{5}$ .

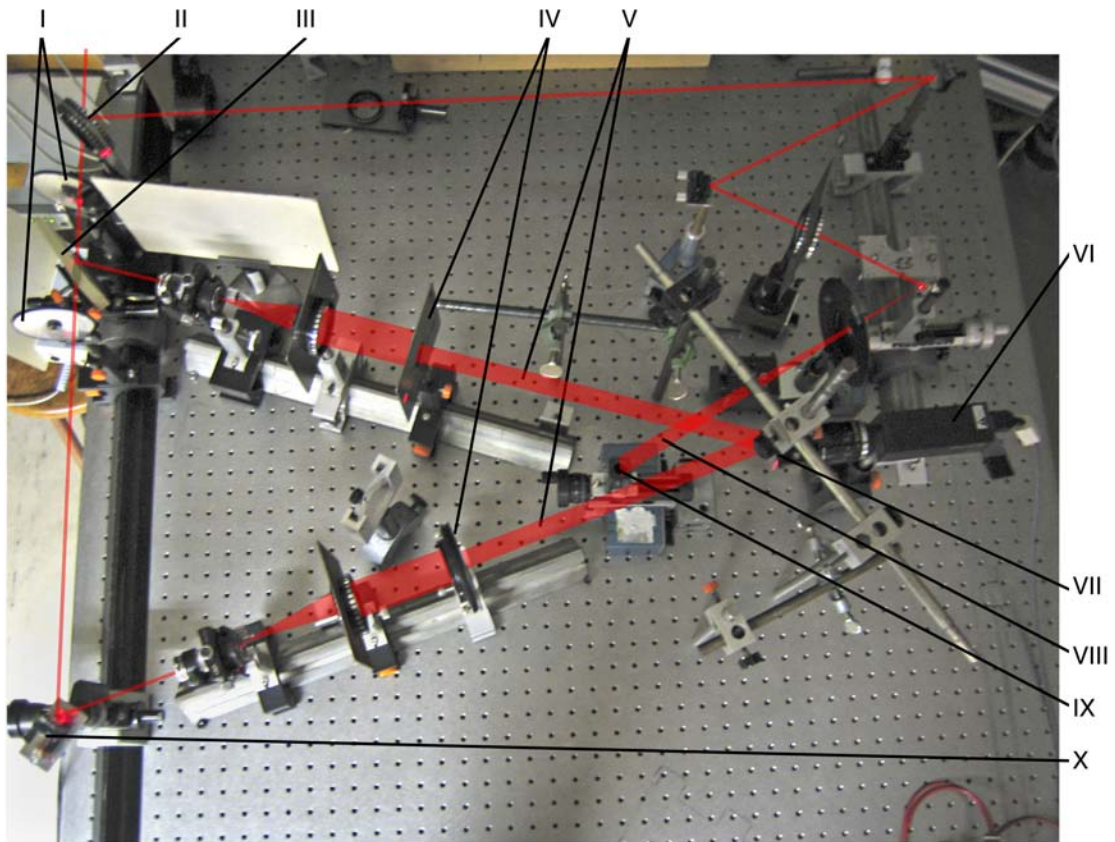


Abbildung 4.2: Experimenteller Aufbau: (I) Graufilterscheiben, (II/III) Strahlteiler, (IV) Blenden, (V) Referenz-, Rekonstruktionsstrahlengänge, (VI) CCD-Kamera, (VII) Photoplattenhalterung, (VIII) Beleuchtungsstrahlengang, (IX) Objekthalterung, (X) Piezospiegel

Charakteristisch für die eingesetzte Laserdiode ist die große elliptische Strahldivergenz, die an der Laserdiode hervorgerufen wird durch Beugung am mikroskopisch kleinen Querschnitt der aktiven Zone. Eine Transformation des divergenten Strahlenkegels der Laserdiode in ein paralleles Strahlenbündel ist daher erforderlich. Es muss mit einer kurzbrennweitigen Optik gearbeitet werden, damit der größte Teil der Diodenintensität genutzt werden kann. Zum Einsatz kommt ein Mikroskopobjektiv mit einer Apertur von 0,4.

Die gleiche Intensität ist für beide Referenzstrahlengänge erforderlich, wenn das holographische Interferogramm mit bestmöglichem Kontrast aufgenommen



werden soll. Für die eingesetzten Strahlteiler bedeutet dies ein möglichst gleiches Reflexions- und Transmissionsvermögen. Es sind zwei Strahlteilungen nötig, damit zwei Referenzstrahlengänge zur Verfügung stehen. Die erste Teilung erfolgt mit einem ultraleichten Folienteiler (Abb.: 4.2/II). Mit diesem sind Teilungsverhältnisse von  $\sim 50/50$  für Reflektion und Transmission möglich. Weiterhin hat dieser Folienteiler den Vorteil, dass Mehrfachreflexionen nahezu eliminiert werden und der Einsatz über ein breites Wellenlängenspektrum möglich ist. Die zweite Teilung erfolgt mit einer Glaskeilplatte (Abb.: 4.2/III), die auftretende Mehrfachreflexionen über die unterschiedlichen Reflektionswinkel an Vorder- und Rückseite trennt.

Als Prüfling kommt eine Metallkugel mit einem Durchmesser von 22mm zum Einsatz. Um die Reflexionseigenschaften zu verbessern, ist die Kugel weiß lackiert worden. Aus interferometrischen Gesichtspunkten ist dieses Objekt für die Vermessung ideal geeignet, da das erwartete holographische Interferogramm markante konzentrische Kreislinien hervorrufen wird. Die eingesetzte Objekthalterung (Abb.: 4.2/IX) erlaubt es nachträglich, über einen Gewindeantrieb die Position des Objektes anzupassen. Weil verschiedene Referenzstrahldurchmesser genutzt werden, kann somit die Position des Objekts gegenüber der Photoplatte angepasst werden. Der Abstand des Objektes gegenüber der Photoplatte ist im Mittel 10cm groß. Damit die diffus gestreuten Strahlen ausreichend für eine Belichtung der Photoplatte sind, wird der Beleuchtungsstrahlengang mit der größten Strahlungsleistung versorgt. Der aufgespannte Winkel zwischen dem Beleuchtungsstrahlengang (Abb.: 4.2/VIII) und dem Beobachtungsstrahlengang (Abb.: 4.2/VI) beträgt  $\theta \sim \frac{\pi}{8}$ .

Zur Dimensionierung der Intensitäten der Referenzstrahlen werden lineare variable Graufilterscheiben (Abb.: 4.2/I) eingesetzt. Um eine gute Modulation der Interferenzen in der Hologrammebene zu erreichen, ist das Intensitätsverhältnis zwischen Objektwelle und Referenzwellen nicht gleich verteilt dimensioniert worden, womit auch eine Belichtung der Photoplatte im linearen Bereich der holographischen Emulsion erreicht wird.

Die sequentiellen Belichtungen sollten zeitlich möglichst schnell hintereinan-

der erfolgen, um den Einfluss von Änderungen im optischen Aufbau zum Beispiel durch niederfrequente Gebäudeschwingungen zu vermeiden. Dem entgegen steht die Ansteuerung der Laserdiode, die zur Wellenlängenänderung einen zweiten Arbeitspunkt eingestellt bekommt, was einer gewissen Zeit bedarf, um sich oszillierend einzustellen. Eine Änderung der Betriebstemperatur führt zu extrem hohen Latenzzeiten, bis es zur Stabilisierung der Betriebstemperatur kommt. Die gewünschte Betriebstemperatur wird über einen Abschwingvorgang erreicht und ist um so größer, je größer die gewünschte Temperaturdifferenz ist. Für eine Wellenlängenänderung wurde daher ausschließlich die Steuerung über den Betriebsstrom vorgenommen.

Die in Kapitel 4.1 geforderte Auflösungsbegrenzung des Hologramms wird im Aufbau über die Referenzstrahlbegrenzung realisiert. Nach der Filterung und Aufweitung der Referenzstrahlen werden die Strahldurchmesser mittels Blenden (Abb.: 4.2/IV) begrenzt, wodurch die effektive Apertur des Hologramms vorgegeben wird. Die Bildauflösung wird somit beim Aufnahmeschritt festgelegt.

Das Master-Hologramm wird mittels einer Doppelbelichtung hergestellt. Dabei findet die erste Belichtung mit nur einem Referenzstrahlengang und der Wellenlänge  $\lambda_1$  statt. Die zweite Belichtung findet nur mit dem zweiten Referenzstrahlengang und der Wellenlänge  $\lambda_2$  statt. Diese sequentiellen Belichtungen werden manuell gesteuert vorgenommen. Die Entwicklung der Photoplatte findet direkt im Anschluss nach der Belichtung mittels dem „in-situ-Verfahren“ statt. Dabei werden die Entwicklungsbäder mit einem Präzisionshubtisch an die Photoplatte (Abb.: 4.2/VII) gehoben. Somit ist die genaue Wiederherstellung der Aufnahmebedingungen möglich.

Zur Rekonstruktion wird die Wellenlänge  $\lambda_1$  eingesetzt, für die der piezoelektrische, verschiebbare Spiegel (Abb.: 4.2/X) kalibriert worden ist. Die entwickelte Photoplatte wird bei der Rekonstruktion über beide Rekonstruktionsstrahlengänge (Abb.: 4.2/V) beleuchtet. Das beobachtbare holographische Interferogramm wird anschließend über die CCD-Kamera (Abb.: 4.2/VI) in das Bildverarbeitungssystem eingespeist.

### 4.3 Arbeitspunkte der Laserdiode

Die erste Phase konzentrierte sich auf das Ansteuern der Laserdiode. Es mussten Arbeitspunkte ermittelt werden, in denen die Laserdiode stabil Licht emittiert. Das verwendete Steuerungsgerät erlaubt es, die Laserdiode komfortabel über die Betriebstemperatur und den Betriebsstrom zu steuern. Die Stabilisierung der Betriebstemperatur der Laserdiode erfolgt über ein Peltierelement, das direkt im Gehäuse der Laserdiode eingebaut ist. Die Arbeitskennlinie der Laserdiode ist mit Bezug auf die Temperaturansteuerung nicht stetig. Es muss darauf geachtet werden, dass die Arbeitspunkte jeweils auf einer Stufe (*Plateau*) der Arbeitskennlinie liegen. Stabile Arbeitspunkte werden visuell und interferometrisch ermittelt. Visuell werden grobe Arbeitsbereiche mittels einer planparallelen Platte (Shearing-Platte) erfasst. Dabei wird die Modulationstiefe der Interferenzstreifen beobachtet. Die Modulation der beobachteten Interferenzstreifen ist gegeben durch:

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4.3)$$

Schwankungen der Modulation und der Interferenzstreifen deuten auf instabile Arbeitspunkte der Laserdiode hin. Diese Arbeitsbereiche werden somit schnell erfasst und ausgeschlossen. Die für visuell gut befundenen Arbeitspunkte werden anschließend mit einem ESPI Aufbau (Kapitel 2.3.4) und dem späteren Prüfling interferometrisch verifiziert. Dabei wird überprüft, wie gut sich Phasenrampen auf dem Phasendifferenzbild ausprägen.

Aus Abbildung 4.3 wird ersichtlich, dass die Wellenlänge bei höheren Temperaturen größer und umgekehrt bei Abkühlung kleiner wird. Ebenso arbeitet die Laserdiode bei Abkühlung effizienter, das heißt, ihre optische Ausgangsleistung steigt (siehe Abbildung 4.4). Um effizient die Laserdiode zu nutzen, ohne diese in kritische Bereiche zu bringen, werden Grenzwerte für die maximale Ausgangsleistung mittels eines Lichtstrommessers (Ulbrichtkugel) ermittelt.

Für die Messung der absoluten Wellenlängen beziehungsweise Wellenlängendifferenz bedarf es eines Spektrometers mit einem sehr hohen Auflösungsvermö-

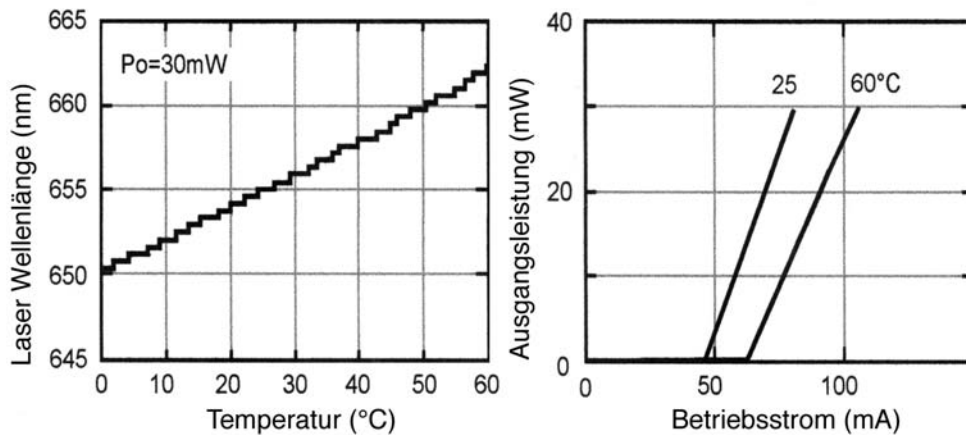


Abbildung 4.3: Wellenlänge in Abhängigkeit der Betriebstemperatur

Abbildung 4.4: Ausgangsleistung bei entsprechender Betriebstemperatur

gen. Für den Versuchsaufbau steht kein Spektrometer mit einer Auflösung unter  $1\text{nm}$  zur Verfügung. Um dennoch eine Referenz zu haben, werden die ESPI-Phasendifferenzbilder ausgewertet. Die absoluten Wellenlängen werden je nach Ansteuerung der Laserdiode aus den Datenblättern (Kapitel 7.3.2) entnommen. Die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der absoluten Wellenlängen haben einen linearen Fehler zur Folge. Die Abmessungen des eingesetzten Prüflings sind bekannt, es kann somit aus einem Phasendifferenzbild die Wellenlängendifferenz ermittelt werden.

Für die Auswertung der Höhenschichtlinienabstände gilt die Gleichung (3.19):

$$\Delta w_o = \frac{\lambda_1(\lambda_1 + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda(1 + \cos \theta)} \quad \text{mit} \quad \lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda \wedge \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (4.4)$$

Für die Wellenlängendifferenz gilt:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1^2}{(1 + \cos \theta)\Delta w_o - \lambda_1} \quad (4.5)$$

Wobei der Winkel  $\theta$ , der zwischen Beleuchtungsvektor und Beobachtungsvektor aufgespannt wird, dem selben Winkel im Hauptaufbau entspricht. Es ergeben

sich folgende Werte:

$$\Delta\lambda \sim 0,1nm \quad (4.6)$$

$$\lambda_1 \simeq 654nm \quad (4.7)$$

$$\lambda_2 \simeq 654,1nm \quad (4.8)$$

Diese Werte dienen als Richtwerte für eine qualitative Interpretation der ausgewerteten Interferogramme. Auf eine quantitative Angabe wird bewußt verzichtet, da die Interferogramme zufällige und systematische Fehler beinhalten.

### 4.4 Kalibrierung des Phasenschiebens

Zur Auswertung der holographischen Interferogramme bedarf es einer definierten Veränderung der Phasenlage der Interferenzstreifen. Die definierte Veränderung der Phasenlage wird durch die Änderung der optischen Weglänge mittels eines piezoelektrischen, verschiebbaren Spiegels vorgenommen. Die Ansteuerung der Piezokeramik erfolgt computergestützt über eine stabilisierte Spannungsversorgung. Um systematische Fehler zu vermeiden, werden die zur Ansteuerung nötigen absoluten Spannungswerte speziell für die zur Rekonstruktion eingesetzte Wellenlänge  $\lambda_1$  ermittelt.

Diese Kalibrierung wird in einem separaten Aufbau vorgenommen. Dabei werden zwei ebene Wellen unter einem kleinen Winkel zur Ausbreitungsrichtung direkt mit einem CCD-Element beobachtet. Über die beobachtbaren Interferenzstreifen und deren Manipulation kann die gewünschte Ansteuerung der Piezokeramik ermittelt werden. Es wird die Spannungsansteuerung der Piezokeramik registriert, bei der eine geometrische Weglänge zur einer um  $2\pi$  veränderten Phasenlage führt. Dabei wird die spätere Strahlführung simuliert, das heißt, Ein- und Ausfallwinkel sind identisch mit denen im späteren optischen Aufbau.

Die Kennlinie einer Piezokeramik weist eine Hysteresecharakteristik auf. Das bedeutet, dass sich bei Umkehrung der Bewegungsrichtung die resultierende Längenänderung unterscheidet. Um den Hystereseeffekt zu umgehen, wird ausschließlich eine Bewegungsrichtung genutzt und zusätzlich wird eine Offset-Spannung vor Beginn der Messung angelegt.

## 4.5 Bildverarbeitungssystem

Für die Auswertung der holographischen Interferogramme wird ein digitales Bildverarbeitungssystem eingesetzt. Es besteht aus einer CCD-Kamera mit einer Bildauflösung von 640x480 Pixel und einem herkömmlichen Computersystem (PC). Die im Computersystem eingebaute spezifische Schnittstellenkarte zur Datenübermittlung wird mit einem hierfür speziell entwickelten Computerprogramm gesteuert.

Im einzelnen lassen sich die Anforderung an das Bildverarbeitungssystem unterteilen in:

- Ansteuerung der Piezokeramik

Die Ansteuerung der Piezokeramik erfolgt computergestützt über die RS-232 Schnittstelle und verbundener stabilisierter Spannungsversorgung. Die im Computer-Programm implementierte Funktion erlaubt somit, den piezoelektrischen, verschiebbaren Spiegel definiert zu manipulieren.

- Aufnahme der Einzelbilder

Die holographischen Interferogramme werden für die Auswertung zu vier verschiedenen relativen Phasenlagen der Rekonstruktionsstrahlen rekonstruiert. Um den Einfluss von Änderungen im optischen Aufbau gering zu halten, werden die vier holographischen Interferogramme automatisiert ( $\Delta t \leq 1s$ ) in das Bildverarbeitungssystem eingelesen.

- Sicherung der Ergebnisse

Die Einzelbilder und das Phasenbild werden mit einem Zeitstempel automatisiert gesichert. Eine nachträgliche Verarbeitung beispielsweise durch Filteralgorithmen, die Störungen verringern sollen, bleibt dadurch möglich. Ebenso bleibt eine Anwendung anderer Phasenschiebe-4-Schritt-Algorithmen nachträglich möglich.

- Auswertung der Interferogramme

Pixelweise wird die Interferenzphase aus den Intensitätsverteilungen der Einzelbilder berechnet. Der Phasenwertebereich  $[0, 2\pi]$  wird mit einer Auflösung von 8bit quantisiert, das heißt, der 8 bit A/D-Wandler diskretisiert den Phasenwertebereich in 256 Abstufungen.

- Bildoptimierung

Die Interferogramme werden mit einer Quantisierungstiefe von 8 bit digitalisiert. Für das elektronische Rauschen bedeutet dies, dass aufgrund des 8 bit A/D-Wandlers das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) auf maximal  $48dB$  beschränkt ist. Auch das Speckle-Rauschen wirkt sich nachteilig aus. Um eine quantitative Aussage über die interferometrische Messung machen zu können, müssen diese Artefakte mit geeigneten Filter-Algorithmen verringert werden.

- Steuerung des Programmsablaufs

Die Steuerung einzelner Verarbeitungsschritte erfolgt mittels eines textbasierten Menüs. Die Bedienung erfolgt durch die Eingabe von Parametern über die Tastatur des Computersystems.

### 4.6 Auswertung des Interferogramms

Die eigentliche Auswertung des holographischen Interferogramms findet anhand des Phasenbildes statt, das der Interferenzphasenverteilung im holographischen Interferogramm entspricht. Dieses Phasenbild ist aufgrund des elektronischen und optischen Rauschens mit Artefakten behaftet. Die Unterdrückung des Rauschens findet mit einem Filter-Algorithmus statt, der von Herrn Prof. Dr. Bruno Klingen und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jörg Gutjahr an der Fachhochschule Köln entwickelt worden ist (ff. Phasen-Filter). Wie in Kapitel 3.2 erläutert, findet bei diesem Filtervorgang eine Transformation des Phasenbilds in ein Sinus- und Cosinus-Verteilungsbild statt. Der Phasen-Filter wird anschließend auf die Sinus- und Cosinus-Verteilungsbilder angewendet. Nach dem Filtervorgang findet eine

Rücktransformation zum Phasenbild statt. Der Phasen-Filter benötigt aufgrund der rekursiven Eigenschaft eine kleinere Operationsmatrix, wodurch der Rechenaufwand erheblich reduziert wird. Eine Maskierung des im Phasenbilds auszuwertenden Bereichs von seinem Umfeld ist dabei Grundvoraussetzung, um Auswertungsfehler zu vermeiden.

Es soll nun anhand eines Ausschnitts des holographischen Interferogramms die Auswertung gezeigt werden. Dabei wird ein Ausschnitt gewählt, in dem sich mehrere Höhenschichtlinien befinden. Das ungefilterte Phasenbild in Abbildung

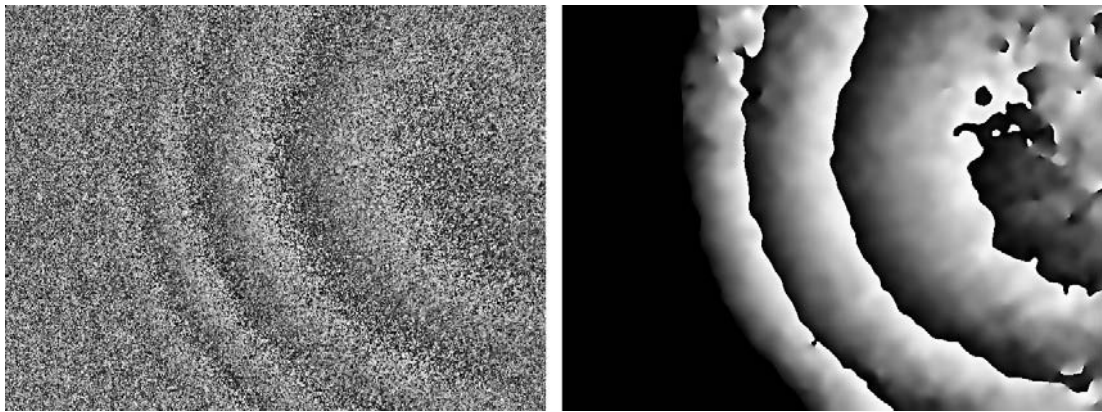


Abbildung 4.5: Phasenbild des Objektbilds mit hohem Rauschanteil

Abbildung 4.6: Phasenbild des Objektbilds nach dem Filtern

4.5 ist aufgrund der begrenzten Auflösung des Rekonstruktionssystems stark verrauscht. Dies stellt eine hohe Anforderung an den Phasen-Filter. Filter-Algorithmen arbeiten meistens einseitig, das heißt, die Filterung findet zweidimensional beispielsweise von links nach rechts statt. Bei mehrfacher Anwendung wirkt sich diese richtungsabhängige Filterung nachteilig aus. Der eingesetzte Phasen-Filter wird daher modifiziert eingesetzt, indem nach jeder Anwendung des Phasen-Filter die Abtastrichtung gespiegelt wird.

Prinzipiell sollte das Phasenbild durch Maßnahmen im optischen Aufbau rauschärmer erzeugt werden. Wie in Abbildung 4.6 zu sehen, ist es durchaus möglich,



ein stark verrauschtes Phasenbild zu filtern. Dies führt jedoch zu einer Verminderung der Messgenauigkeit und beinhaltet teilweise Artefakte, welche die Demodulation empfindlich stören (siehe Kapitel 3.2).

Exemplarisch soll nun die Demodulation an einem horizontalen Schnitt ( $v = 240$ ) betrachtet werden. Die Interferenzphasenverteilung weist Sprungstellen von  $2\pi$  an den Unstetigkeitsstellen der  $\arctan$ -Funktion (3.7) auf. Die endgültige Interferenzphase ergibt sich erst, nachdem die stetigen Teilintervalle richtig zusammengesetzt worden sind. Das im Kapitel 3.2 erläuterte Phasendemodulations-Verfahren führt zunächst eine Skelettierung respektive eine Phasenzuordnung durch. Dabei wird die gefilterte Phasenbildzeile in Abbildung 4.8 anhand der

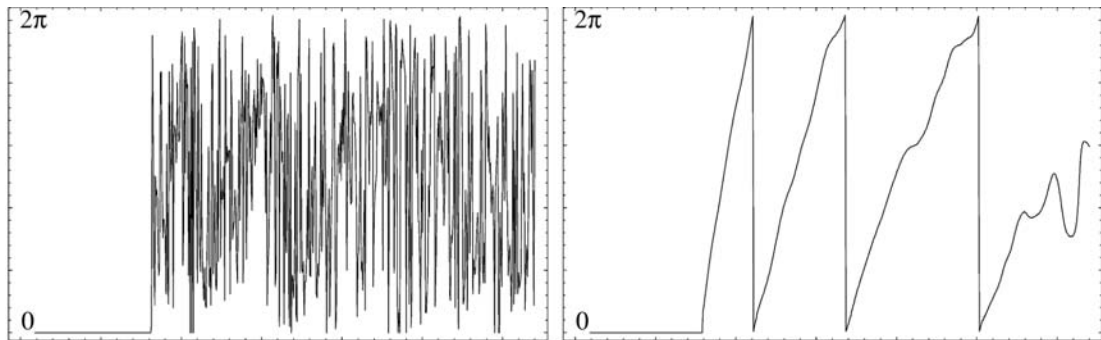


Abbildung 4.7: Die Interferenzphase modulo  $2\pi$  mit hohem Rauschanteil

Abbildung 4.8: Die Interferenzphase modulo  $2\pi$  nach dem Filtern

Sprungstellen analysiert. Das Ergebnis der eindimensionalen Auswertung der berechneten Phasenverteilung in der Phasenbildzeile ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die durch das Erkennen der Sprungstellen erhaltenen Werte für die Ordnung der Interferenzphase sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Die kontinuierliche Interferenzphase in Abbildung 4.10 wird durch die Addition der Interferenzphase modulo  $2\pi$  aus Abbildung 4.8 und der  $2\pi$ -Phasenzuordnung in Abbildung 4.9 berechnet. Für die zweidimensionale Auswertung der berechneten Phasenverteilung erfolgt die Phasenzuordnungen iterativ am Anfang einer jeden neuen Zeile. Da jede Zeile für sich analysiert wird, führen Fehler bei der Phasenzuordnung zu linienförmige Störungen des Interferenzbildes.

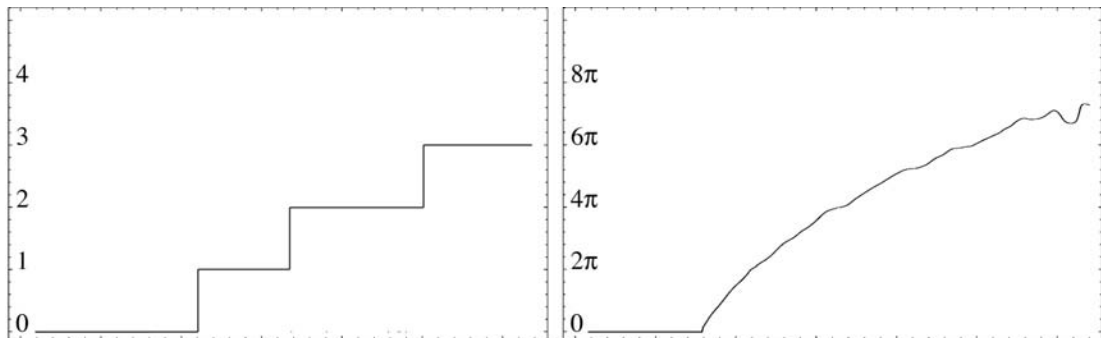


Abbildung 4.9: Phasenzuordnung der Höhenschichtlinien

Abbildung 4.10: Die Interferenzphase nach der Demodulation

Das Resultat der Anwendung des Phasendemodulations-Verfahrens auf das gefilterte Phasenbild in Abbildung 4.6 ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Abbildung 4.11 zeigt die zweidimensionale Phasenzuordnung. Die topographische Darstellung von Abbildung 4.12 zeigt Abbildung 4.13. Der gewählte Ausschnitt des Objektbildes stellt einen Ausschnitt der Kugelkappe des Prüflings dar. Im oberen Bereich der Kugelkappe ist deutlich zu sehen, wie Artefakte sich auf die Demodulation auswirken.

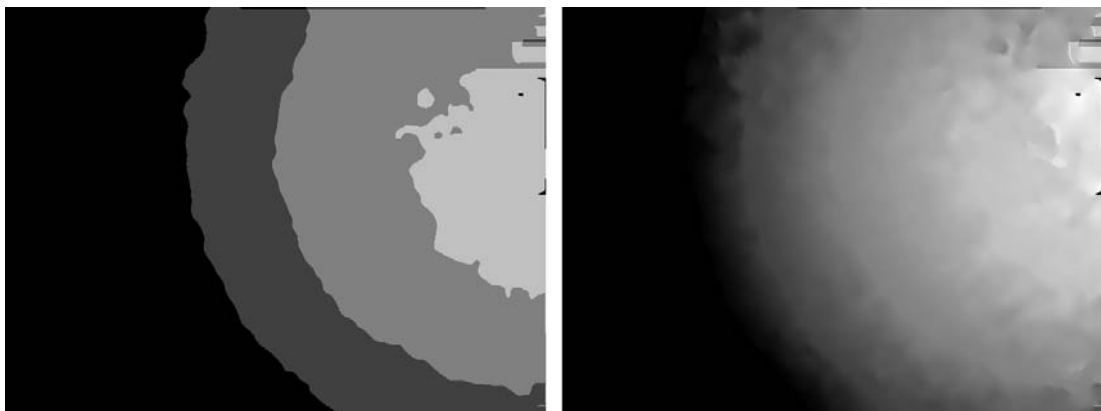


Abbildung 4.11: Phasenzuordnung des Phasenbilds

Abbildung 4.12: Interferenzphase nach der Demodulation

Damit die vorhandenen Sprungstellen sicher erkannt werden können, geht das hier beschriebene Verfahren von einer hinreichend stetigen Objekt Oberfläche aus.

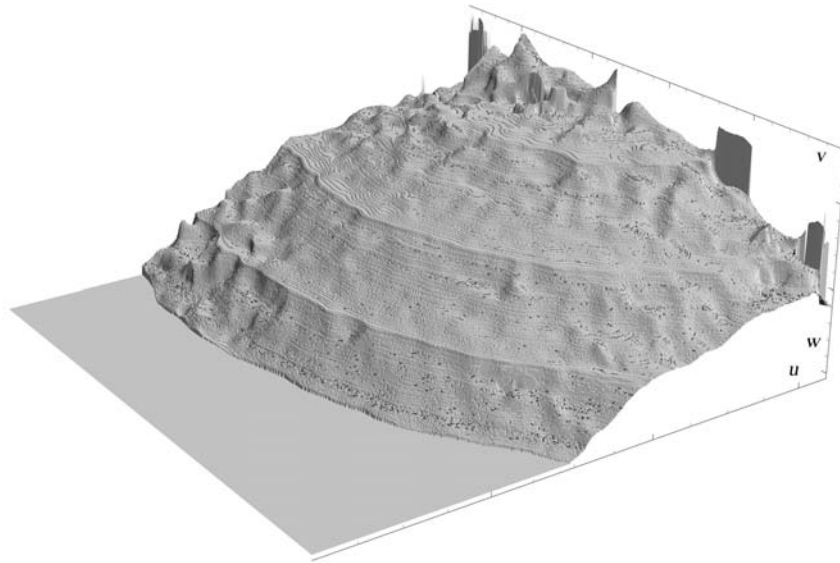


Abbildung 4.13: 3D-Darstellung des demodulierten Phasenbilds.

Ein damit verbundener glatter Verlauf der modulierten Interferenzphasenverteilung über das Bildfeld ist dabei Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Demodulation der berechneten Phasenbilder.

## 5 Diskussion

### 5.1 Dekorrelation der Speckle

Wie in Kapitel 2.2 einleitend beschrieben, entsteht ein Speckle durch Superposition der zum Punktmuster beitragenden Strahlen, die unterschiedliche Phasenlagen besitzen. Bei der Herstellung des Master-Hologramms findet eine Doppelbelichtung mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen statt. Somit ändert sich die Phase der einzelnen Strahlen und das Specklefeldmuster.

Die Korrelation zwischen den Specklefeldmustern, aufgenommen mit den Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , nimmt mit zunehmender Wellenlängendifferenz und zunehmender Rauheit der Oberfläche ab. Gleiche Höhendifferenzen der Oberfläche führen bei verschiedenen Wellenlängen zu unterschiedlichen Phasendifferenzen. Eine Oberflächenrauheit, die mit der Standardabweichung  $\sigma$  variiert, führt zur Phasendifferenz:

$$\Delta\delta = 2\pi \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \sigma \quad (5.1)$$

Unter geeigneten Bedingungen bezüglich dem Empfindlichkeitsvektor sind die Specklefeldmuster dekorreliert, wenn:

$$\left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)^{-1} \simeq \sigma \quad (5.2)$$

Ist die Standardabweichung der Oberflächenrauheit respektive der axiale Versatz zu groß, so dekorrelieren die Specklefeldmuster und die Höhenschichtlinien können sich nicht ausbilden.

Für die Formvermessung mittels der Zwei-Wellenlängen-Verfahren in der elektronischen Speckle-Interferometrie wird in [10] eine empirische Abschätzung für größte Abweichungen gemacht, bei der noch gute sichtbare Höhenschichtlinien beobachtbar sind. Diese Abschätzung verringert zusätzlich die möglichen Wel-

lenlängendifferenzen. Für die Wellenlängendifferenz gilt:

$$\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)^{-1} > 16 \sigma \quad (5.3)$$

Experimentell hat sich gezeigt, dass die Dekorrelation der Specklefeldmuster aufgrund nicht konstanter Specklephasen nur bei grober Verletzung der Beziehung (5.3) auftritt und zur Kontrastminderung oder zum Verschwinden der Höhenschichtlinien führt.

## 5.2 Empfindlichkeit des Aufbaus bezüglich Fehljustage

Am Anfang stellte sich die Frage, wie empfindlich der Aufbau ist bezüglich der Fehljustage der Photoplatte aufgrund der nötigen nasschemischen Behandlung.

Die ersten Untersuchungen wurden ohne Objekt nur mit beiden ebenen Referenzwellen  $\Psi_{r_1}$  und  $\Psi_{r_2}$  vorgenommen, wobei eine Referenzwelle jeweils als ebene Objektwelle gesehen werden kann. Bei der Rekonstruktion mit einer Referenzwelle z.B.  $\Psi_{r_1}$  rekonstruiert diese die andere Referenzwelle als  $\Psi_{re_2}$ . Wird nun zusätzlich die zweite Referenzwelle  $\Psi_{r_2}$  zur Rekonstruktion eingebracht, so überlagert sich diese mit der von Referenzwelle  $\Psi_{r_1}$  rekonstruierten Referenzwelle  $\Psi_{re_2}$ . Das selbe gilt auch umgekehrt, so dass sich Referenzwelle  $\Psi_{r_1}$  mit ihrer rekonstruierten  $\Psi_{re_1}$  überlagert.

Wird die Photoplatte nach ihrer Entwicklung nicht genau an derselben Aufnahme- position positioniert, so wirkt sich das auf die Überlagerung der rekonstruierten Wellen und ihren korrespondierenden Referenzwellen aus. Kleinste Variationen führen zu einer veränderten Ausbreitungsrichtung der rekonstruierten Wellen. Somit breitet sich die korrespondierende Referenzwelle mit ihrer rekonstruierten Welle unter einem kleinen Winkel ( $\alpha$ ) aus, was wiederum zu Interferenzerscheinungen führt. In diesem Strahlengang werden unabhängig vom Ort des Beobachtungsschirms äquidistante Interferenzstreifen sichtbar. Es stellt ein

harmonisches Gitter mit der Periode

$$p = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (5.4)$$

dar. Die Periode der Interferenzstreifen ist charakteristisch für den entstandenen Versatz der Photoplatte. Es konnten somit Positionsfehler der Photoplatte bezüglich aller Richtungen im  $\mu\text{m}$  Bereich genau ermittelt werden.

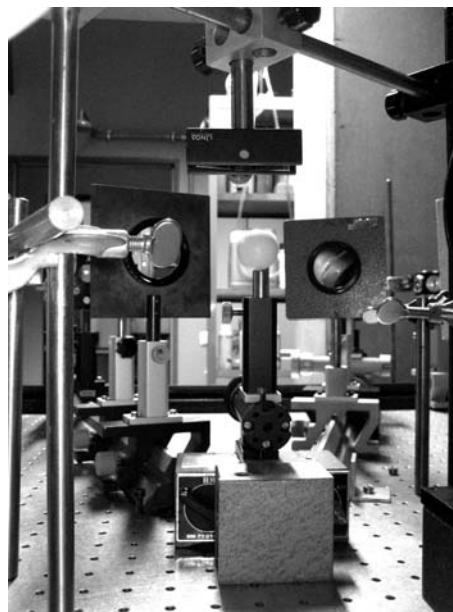


Abbildung 5.1: Photoplatten-Halterung für die „in-situ-Entwicklung“.

Es stellte sich schnell heraus, dass trotz mechanischer Justierhilfen die Repositionierung der Photoplatte in den gewünschten Toleranzen ( $< \frac{\lambda}{4}$ ) [10] nicht realisierbar ist. Nicht zu vergessen ist auch die Emulsionsschrumpfung, die zusätzlich nachteilig einwirkte. Diese Problematik der Positionierung ist bereits aus der Echtzeit-Holographie bekannt und wird durch die „in-situ-Entwicklung“ gelöst, einer Entwicklung der Photoplatte an der Stelle der Aufnahme position. Für den Aufbau bedeutet dies eine geänderte robust konzipierte Halterung für die Photoplatte. Eine kopfüber angeordnete Halterung (Abbildung 5.1) ermöglicht es, die Photoplatte in Entwicklungsbäder zu tauchen, ohne diese zu bewegen.

### 5.3 Lateraler Versatz der rekonstruierten Objektbilder

Nachteilig wirkt sich bei der Rekonstruktion von Seitenbandaufnahmen mit verschiedenen Wellenlängen die unterschiedliche Größe und Lage der beiden interferierenden Bilder aus. Wenn der laterale Versatz größer ist als die Specklegröße in der Bildebene, dann sind beide Bilder dekorreliert und interferieren nicht miteinander. Die Specklegröße in der Bildebene kann formal wie folgt beschrieben werden:

$$d_{su} = 2,44 \frac{\lambda}{2A} \quad (5.5)$$

Hier bedeutet  $A$  die Apertur des Rekonstruktionssystems. Der maximale Versatz in der Bildebene  $(u, v)$  sollte kleiner als die Specklegröße sein, nämlich:

$$\Delta u_{max}, \Delta v_{max} < 2,44 \frac{\lambda}{2A} \quad (5.6)$$

Das Rekonstruktionssystem muss daher eine Auflösungsbegrenzung haben. Bei den vorgenommenen Wellenlängendifferenzen im Bereich von  $\sim 10^{-1}nm$  wurde eine Abschätzung des lateralen Versatzes vorgenommen:

Der Halbwinkel, der von einem Referenzstrahlengang und dem Objektstrahlengang aufgespannt wird, ist maßgebend für die Strukturgröße im Hologramm. Für die nötige maximale Auflösung der holographischen Emulsion ergibt sich eine Gitterperiode von:

$$p_{max} = \frac{\lambda}{2 \sin(\frac{\varphi}{4})} \quad , \quad (5.7)$$

mit  $\lambda$  der mittleren Wellenlänge und  $\varphi$  dem Winkel zwischen den Referenzstrahlengängen respektive Rekonstruktionsstrahlengängen (siehe Seite 30). Der Halbwinkel entspricht hierbei genau dem Winkel, der von einem Referenzstrahlengang und dem Objektstrahlengang aufgespannt wird.

Für die absoluten Beugungswinkel mit Wellenlänge  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  gilt:

$$\sin(\varepsilon_1) = \frac{\lambda_1}{p_{max}} \quad \text{und} \quad \sin(\varepsilon_2) = \frac{\lambda_2}{p_{max}} \quad , \quad (5.8)$$

und für den Versatz in der Bildebene  $(u, v)$  gilt:

$$\Delta u_{max}, \Delta v_{max} = a' (\tan(\varepsilon_2) - \tan(\varepsilon_1)) \quad (5.9)$$

Mit den maximal möglichen Winkeln (5.8) ergibt sich in der Bildebene ein lateraler Versatz von:

$$\Delta u_{max}, \Delta v_{max} = a' \left[ \tan \left( \arcsin \left( \frac{\lambda_2}{g} \right) \right) - \tan \left( \arcsin \left( \frac{\lambda_1}{g} \right) \right) \right] \quad (5.10)$$

Die eingesetzten Wellenlängen betragen  $\lambda_1 \simeq 654nm$  und  $\lambda_2 \simeq 654,1nm$ , die Bildweite  $a'$  beträgt  $10cm$  und für die Gitterperiode gilt  $500 \frac{Linien}{mm}$ . Eingesetzt in (5.10) ergibt sich der berechnete Versatz in der Bildebene zu:

$$\Delta u_{max}, \Delta v_{max} = 5,9\mu m \quad (5.11)$$

Die Korrelationsbedingung (5.6) ist erfüllt bei einer Apertur des Rekonstruktionssystems von:

$$A < 2,44 \frac{\lambda}{2 (\Delta u_{max}, \Delta v_{max})} < 0.133 \quad (5.12)$$

Wie in Kapitel 4.2 erläutert, wird die Apertur des Rekonstruktionssystems mittels Blenden (Abb.: 4.2/IV) vorgegeben. Der Durchmesser der Referenzwellen ergibt sich aus:

$$D < 2 a' A \quad (5.13)$$

Der resultierende maximale Durchmesser der Referenzwellen beziehungsweise



der Hologramme beträgt:

$$D_{max} < 26,6mm \quad (5.14)$$

Um nicht im Grenzbereich zu arbeiten, wird ein Hologrammdurchmesser von  $10mm$  verwendet.

## 5.4 Genauigkeit des entwickelten Verfahrens

Im Allgemeinen liegen die holographischen Interferogramme stark gestört vor. Es handelt sich dabei sowohl um zufällig verteilte Störungen, als auch um systematische Fehler in der interferometrischen Messkette. Bei der in dieser Arbeit vorgenommenen Wellenlängendifferenz im Bereich von  $\sim 10^{-1}nm$  werden Höhenschichtlinien mit einem Abstand von  $\sim 2mm$  erzeugt. Werden die Rauschartefakte vernachlässigt, so ergibt sich an diesem Beispiel der Kugelkappe eine Messgenauigkeit von  $\pm (0,1 - 0,5)mm$ . Für ein quantitatives Endergebnis bedarf es weiterer Analysen von zufälligen und systematischen Fehlern, die das Bildergebnis beeinflussen. Folgend nur einige Faktoren, die ein quantitatives Endergebnis beeinflussen:

- Abweichungen bezüglich der Wellenlänge,
- nichtlineares Verhalten der Piezo-Keramik,
- Winkel zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung,
- Filterverfahren zur Rauschunterdrückung,
- Nicht erwünschte Beugungsmuster, die sich dem holographischen Interferogramm überlagern.

Die in Kapitel 5.3 geforderte Auflösungsbegrenzung im Objektbild, führt zu ein der Bildinformation zusätzlich überlagertes Speckle-Rauschen. Um die Genauigkeit des Verfahrens zu steigern, ist diese Auflösungsbegrenzung im Objektbild weiter zu minimieren. Denkbar ist ein telezentrischer Objektstrahlengang für

eine 1:1 Abbildung des Objekts in die Ebene der Photoplatte. Die Bildebenenholographie ist unempfindlicher gegenüber Änderungen zwischen Aufnahme- und Wiedergabewellenlänge sowie dem damit verbundenen lateralen Versatz der Objektbilder.

Ebenso denkbar ist ein geänderter Aufbau mit kleinem Winkel ( $\varphi \ll 0,1$ ) zwischen Referenzstrahlengängen respektive Rekonstruktionsstrahlengängen. Wodurch die Unempfindlichkeit des Aufbaus gegenüber Fehljustage deutlich verbessert wird. Aufgrund der überlagerten Kreuzrekonstruktionen, führt das wiederum zu einer Reduzierung des Kontrastes der auszuwertenden Interferenzmuster [4]. Das Phasenschiebeverfahren bleibt aber selbst bei schlechten Intensitätsverhältnissen innerhalb des holographischen Interferogramms anwendbar.

Ein kleiner Beitrag zur Erhöhung der Messgenauigkeit kann im Bildverarbeitungssystem erreicht werden. Die Diskretisierung des Phasenwertebereiches  $[0, 2\pi]$  kann auf 10 bit, 12 bit oder 16 bit erhöht werden. Damit verbunden ist die enorme Erhöhung der zu verarbeitenden Datenmenge. Die Filter-Algorithmen und Auswertungsfunktionen müssen dementsprechend weiter optimiert werden, um die Verarbeitungszeit nicht übermäßig zu verlängern. Die Erhöhung der Quantisierungstiefe ist nicht gleichbedeutend mit einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis. Dennoch zeigt sich, dass eine entsprechende Hardware auch ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis bietet.

## 6 Zusammenfassung

Ein wirtschaftlicher Einsatz der holographischen Interferometrie in der Formvermessung erfordert eine automatisierte computergestützte Auswertung der holographischen Interferogramme. In der vorliegenden Arbeit wird das Phasenschiebungsverfahren für eine derartige Automatisierung zum Einsatz gebracht. Es wird die Anwendung der holographischen Interferometrie zur Formvermessung am holographisch rekonstruierten Objektbild beschrieben.

Einleitend sind die Grundlagen zur Holographie und zur Höhenschichtlinienanalyse dargestellt, soweit sie für die Entwicklung des Verfahrens notwendig sind. Zur qualitativen Vermessung wird ein Bildverarbeitungssystem benutzt, dessen Hardware und dessen Auswertalgorithmus besprochen werden.

Darauf aufbauend wird im Hauptteil der Arbeit der experimentelle Aufbau zur Umsetzung der Höhenschichtlinienauswertung am holographischen Objektbild besprochen. Die Verwendung von zwei Referenzstrahlen ermöglicht dabei den Zugriff auf die relative Phase der rekonstruierten Objektwellen. Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es, die topographische Form eines Objektes qualitativ anhand dessen holographischen Bildes automatisiert zu erfassen. Dies wird mit dem Zwei-Wellenlängen-Verfahren realisiert. Die erzielten Ergebnisse werden erläutert.

Es wird deutlich, dass der gewählte experimentelle Aufbau in dieser Arbeit nur unter Laborbedingungen erfolgreich umgesetzt werden konnte. Es zeigt sich aber auch, welche Maßnahmen möglich sind, um diese Einschränkung auszuschließen. Somit steht ein optisches und damit ein berührungsloses und bildhaftes Verfahren zur Verfügung, das Aufnahme und Messvorgang separiert. Der eigentliche Messvorgang findet somit ohne Objekt statt.

Insgesamt wird in der vorliegenden Arbeit die Möglichkeit aufgezeigt, das Phasenschiebverfahren sowohl in der qualitativen als auch in der quantitativen Auswertung holographischer Interferogramme einzusetzen, wobei grundsätzlich das Verfahren vorgestellt und seine Anwendbarkeit nachgewiesen wird. Ein den Vorschlägen entsprechend modifizierter Aufbau, kann zu einem automatisierten Messsystem weiter entwickelt werden.

## 7 Anhang

### 7.1 Programm-Quellcode

Für die Ansteuerung der CCD-Kamera und die Umsetzung des Phasenschiebeprozesses wurde dieses Programm in der Programmiersprache C geschrieben. Es verwendet die kommerzielle Entwicklungsbibliothek MIL-Lite in der Version 7.50 (Build 384) von MATROX. Als integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) diente Visual C++ in der Version 6.0 von der MICROSOFT CORPORATION.

```
/*
 * Copyright 2004, 2005 Vitor Guerreiro <vg@shee.org>
 *
 * This program is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or
 * (at your option) any later version.
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program; if not, write to the Free Software
 * Foundation, Inc., 51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA
 */

/* ----- */

#define DEBUG
#define SHOWPHASE
#define SIZEX 1024L
#define SIZEY 768L
#define DCF "M_RS170"
#define PAUSE {Sleep(500);}
#define PI 3.141592653589793
#define M 0.85 // Filterfaktor

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
```

```
#include <iostream.h>
#include <math.h>
#include <mil.h>
#include <string.h>
#include <cstdlib>
#include <conio.h>
#include <errno.h>
#include "form_espi.h"
#include "rs232.h"

/* ----- public ----- */

bool load=0;
char letter;
long sizeX;
long sizeY;
int phasenbild_1_read=0;
int phasenbild_2_read=0;
double Sinus[SIZY][SIZEX];
double Cosinus[SIZY][SIZEX];
unsigned char bildpuffer_1[SIZY][SIZEX];
unsigned char bildpuffer_2[SIZY][SIZEX];
unsigned char bildpuffer_3[SIZY][SIZEX];
unsigned char bildpuffer_4[SIZY][SIZEX];
unsigned char phasenbild_1[SIZY][SIZEX];
unsigned char phasenbild_2[SIZY][SIZEX];
unsigned char phasenbild[SIZY][SIZEX];
unsigned char phasenbildorg[SIZY][SIZEX];

void Filter(unsigned char diffbild[SIZY][SIZEX]);

/* ----- MIL_ID ----- */

MIL_ID idApp;          /* MIL Application handle. */
MIL_ID idSys;         /* MIL System handle.     */
MIL_ID idDigiz;      /* MIL digitizer handle.  */
MIL_ID fenster_process; /* MIL Display handle.   */
MIL_ID fenster_phase;
MIL_ID milbuffer;    /* MIL Image buffer.      */
MIL_ID milbuffer_phasenbild;

#ifdef SHOWPHASE
MIL_ID milbuffer_phase_1;
MIL_ID milbuffer_phase_2;
#endif

/* ----- functions ----- */

void center()
{
    printf(" Status: Fadenkreuz Anzeige.          \r");
}
```

```

do{
    MdigGrab(idDigiz,milbuffer);
    MgraLine(M_DEFAULT,milbuffer,100,sizeY/2,sizeX-100,sizeY/2);
    MgraLine(M_DEFAULT,milbuffer,sizeX/2,100,sizeX/2,sizeY-100);
    MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer,sizeX/2,sizeY/2,10,10,0,360);
    MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer,sizeX/2,sizeY/2,40,40,0,360);
    MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer,sizeX/2,sizeY/2,70,70,0,360);
    MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer,sizeX/4*3-30,(sizeY/3)+20,10,10,0,360);
    MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer,sizeX/4*3-30,(sizeY/3)+20,120,120,0,360);
    MdispControl(fenster_process, M_WINDOW_TITLE_NAME, \
        (long)MIL_TEXT("Fadenkreuz"));
    MdispSelect(fenster_process, milbuffer);
}
while(!_kbhit());
}

/* ----- */

void grep(int bildnummer){
//    Sanyo DL5147-042 Dioden
//    Betrieb bei 8°Celsius und 66mA.
//    deltaU = 28V > 2PI

    short U0=1000, U1=8000, U2=15000,U3=22000;
    printf(" Status: Aufnahme des Phasenbild %i ... bitte warten:      ",bildnummer);
    MbufClear(milbuffer, 0L);
    MdispControl(fenster_process, M_WINDOW_TITLE_NAME, (long)MIL_TEXT("Process"));

    // Piezo Null
    Spannung(0); PAUSE;

    // Piezo Start
    Spannung(U0); PAUSE;
    MdigGrab(idDigiz,milbuffer);
    MbufGet2d(milbuffer,0,0,sizeX,sizeY,&bildpuffer_1);
    printf("1\b");
    Spannung(U1); PAUSE;
    MbufClear(milbuffer, 0L);
    MdigGrab(idDigiz,milbuffer);
    MbufGet2d(milbuffer,0,0,sizeX,sizeY,&bildpuffer_2);
    printf("2\b");
    Spannung(U2); PAUSE;
    MbufClear(milbuffer, 0L);
    MdigGrab(idDigiz,milbuffer);
    MbufGet2d(milbuffer,0,0,sizeX,sizeY,&bildpuffer_3);
    printf("3\b");
    Spannung(U3); PAUSE;
    MbufClear(milbuffer, 0L);
    MdigGrab(idDigiz,milbuffer);
    MbufGet2d(milbuffer,0,0,sizeX,sizeY,&bildpuffer_4);
    printf("4\r");
}

```

```

// Piezo Auslauf
Spannung(29000); PAUSE;

short py,px;
double phase;
for(int x=0;x<SIZEX;x++)
{ for (int y=0;y<SIZEY;y++)
  {
    py=bildpuffer_1[y][x]-bildpuffer_3[y][x];
    px=bildpuffer_4[y][x]-bildpuffer_2[y][x];
    phase=atan2(px,py)+PI;
    if (bildnummer == 1){
      phasenbild_1[y][x]=unsigned char(phase*256/2/PI);
    }else{
      phasenbild_2[y][x]=unsigned char(phase*256/2/PI);
    }
  }
}

if (bildnummer == 1){
  #ifdef SHOWPHASE
  MbufPut2d(milbuffer_phase_1,0,0,sizeX,sizeY,&phasenbild_1);
  MbufExport("phasenbild1.bmp",M_BMP,milbuffer_phase_1);
  #endif
  phasenbild_1_read=1;
}else{
  #ifdef SHOWPHASE
  MbufPut2d(milbuffer_phase_2,0,0,sizeX,sizeY,&phasenbild_2);
  MbufExport("phasenbild2.bmp",M_BMP,milbuffer_phase_2);
  #endif
  phasenbild_2_read=1;
}
printf(" Status: Phasenbild %i aufgenommen.          \r",bildnummer);
}

/* ----- */

int picdiff(void){
  // restore image from file
  if(load)
  {
    MbufLoad("phasenbild1.bmp",milbuffer_phase_1);
    MbufGet2d(milbuffer_phase_1,0,0,sizeX,sizeY,&phasenbild_1);
    MbufLoad("phasenbild2.bmp",milbuffer_phase_2);
    MbufGet2d(milbuffer_phase_2,0,0,sizeX,sizeY,&phasenbild_2);
    phasenbild_1_read=1;
    phasenbild_2_read=1;
    load=0;
  }
}

```



```

unsigned char diff=0;

if(phasenbild_1_read == 1 && phasenbild_2_read == 1){

    for(int x=0;x<SIZEX;x++){
        for(int y=0;y<SIZEY;y++){
            diff=(phasenbild_2[y][x]-phasenbild_1[y][x]);
            phasenbild[y][x] = diff;
        }
    }

    MbufPut2d(milbuffer_phasenbild,0,0,sizeX,sizeY,&phasenbild);
    MbufExport("differenz.bmp",M_BMP,milbuffer_phasenbild);
}else{
    printf(" Status: Bitte Phasenbilder aufnehmen.          \r");
    return 1;
}
return 0;
}

/* ----- */

void SinusCosinus()
{
    for (int y=0;y<SIZEY;y++)
    {
        for (int x=0;x<SIZEX;x++)
        {
            Sinus[y][x] =sin(phasenbild_1[y][x]*2*PI/255-PI);
            Cosinus[y][x] =cos(phasenbild_1[y][x]*2*PI/255-PI);
        }
    }
}

/* ----- */

void Demod()
{
    int n = 0;
    int xplus = 0;
    for (int y=0;y<SIZEY;y++)
    {
        n = 0;
        for (int x=0;x<SIZEX;x++)
        {
            xplus = x + 1;
            short d_diff = phasenbild_1[y][x] - phasenbild_1[y][xplus];
            if( d_diff > 128 )    n++;
            if( d_diff < -128)    n--;
            // for unwrapp
            phasenbild_2[y][x] = phasenbild_1[y][x]/4 + (n*64);
        }
    }
}

```

```

        // for phase order
        // phasenbild_2[y][x] = (n*64);
    }
}
}

/* ----- */

void Filtern()
{
// not my code
}

/* ----- */

void display(int phasenbildnummer)
{
#ifdef SHOWPHASE
if(phasenbildnummer == 1)
{
    MdispControl(fenster_process, M_WINDOW_TITLE_NAME, \
        (long)MIL_TEXT("Primaeres Phasenbild"));
    MdispSelect(fenster_process, milbuffer_phase_1);
    printf(" Status: Phasenbild 1.                \r");
}
if(phasenbildnummer == 2)
{
    MdispControl(fenster_process, M_WINDOW_TITLE_NAME, \
        (long)MIL_TEXT("Sekundaeres Phasenbild"));
    MdispSelect(fenster_process, milbuffer_phase_2);
    printf(" Status: Phasenbild 2.                \r");
}
#endif
if(phasenbildnummer == 0)
{
    printf(" Status: Differenz Phasenbild.        \r");
    picdiff();

    MgraArc(M_DEFAULT, milbuffer_phasenbild, sizeX/4*3-30, (sizeY/3)+20, 10, 10, 0, 360);
    MgraArc(M_DEFAULT, milbuffer_phasenbild, sizeX/4*3-30, (sizeY/3)+20, 120, 120, 0, 360);
    MdispControl(fenster_phase, M_WINDOW_TITLE_NAME, \
        (long)MIL_TEXT("Differenz Phasenbild"));
    MdispSelect(fenster_phase, milbuffer_phasenbild);
}
if(phasenbildnummer == 3)
{
    MbufLoad("differenz.bmp", milbuffer_phasenbild);
    MbufGet2d(milbuffer_phasenbild, 0, 0, sizeX, sizeY, &phasenbild_1);
    SinusCosinus();
    Filtern();
    MbufPut2d(milbuffer_phasenbild, 0, 0, sizeX, sizeY, &phasenbild_2);
}
}
}
}

```

```

        MdispControl(fenster_phase, M_WINDOW_TITLE_NAME, \
        (long)MIL_TEXT("geladenes Differenz Phasenbild"));
        MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer_phasenbild,sizeX/4*3-30,(sizeY/3)+20,10,10,0,360);
        MgraArc(M_DEFAULT,milbuffer_phasenbild,sizeX/4*3-30,(sizeY/3)+20,120,120,0,360);
        MdispSelect(fenster_phase, milbuffer_phasenbild);
        printf(" Status: geladenes Differenz Phasenbild.          \r");
    }
}

void inirs(void)
{
    RS232_Init(1);
    RS232_Out(" ");
    RS232_Out("opl");
    Spannung (0);
}

/* ----- main ;) ----- */

int main(int argc, char *argv[])
{
    char* dcf;          /* Digitizer format, input.*/
    long dataType;     /* Data type of a pixel.  */
    long bands;        /* Bands in image.        */

    void *system = M_DEF_SYSTEM_TYPE;

/* ----- Interpret command line. ----- */

/* ----- Allocate application. ----- */

    if (MappAlloc(M_DEFAULT, &idApp) == M_NULL) {
        fprintf(stderr, "main: Cannot allocate MIL application.\n");
        return 1;
    }

/* ----- Allocate System. ----- */

    MsysAlloc(system, M_DEV0, M_COMPLETE, &idSys);
    if (idSys == M_NULL) {
        fprintf(stderr, "main: Cannot allocate MIL system.\n");
        return 1;
    }

/* ----- Allocate digitizer. ----- */

    MdigAlloc(idSys, M_DEV0, DCF, M_DEFAULT, &idDigiz);
    if (idDigiz == M_NULL) {
        fprintf(stderr, "main: Cannot allocate MIL digitizer.\n");
        return 1;
    }
}

```

```

dataType = MdigInquire(idDigiz, M_TYPE,      M_NULL);
bands    = MdigInquire(idDigiz, M_SIZE_BAND, M_NULL);
sizeX    = MdigInquire(idDigiz, M_SIZE_X,   M_NULL);
sizeY    = MdigInquire(idDigiz, M_SIZE_Y,   M_NULL);

#ifdef DEBUG
printf("dataType    = %i\n",dataType);
printf("bands      = %i\n",bands);
printf("sizeX      = %i\n",sizeX);
printf("sizeY      = %i\n",sizeY);
#endif

/* ----- Allocate Image buffer. ----- */

MbufAllocColor(idSys, bands, sizeX,sizeY, dataType, \
M_IMAGE+M_GRAB+M_DISP, &milbuffer);
MbufAllocColor(idSys, bands, sizeX,sizeY, dataType, \
M_IMAGE+M_GRAB+M_DISP, &milbuffer_phasenbild);

#ifdef SHOWPHASE
MbufAllocColor(idSys, bands, sizeX,sizeY, dataType, \
M_IMAGE+M_GRAB+M_DISP, &milbuffer_phase_1);
MbufAllocColor(idSys, bands, sizeX,sizeY, dataType, \
M_IMAGE+M_GRAB+M_DISP, &milbuffer_phase_2);
#endif

if (    milbuffer == M_NULL || milbuffer_phasenbild == M_NULL ){
    fprintf(stderr, "main: Cannot allocate image buffer.\n");
    return 1;
}

#ifdef SHOWPHASE
if (    milbuffer_phase_1 == M_NULL || milbuffer_phase_2 == M_NULL ){
    fprintf(stderr, "main: Cannot allocate image buffer.\n");
    return 1;
}
#endif

/* ----- Clear Image Buffer. ----- */

MbufClear(milbuffer, 0L);
MbufClear(milbuffer_phasenbild, 0L);
#ifdef SHOWPHASE
MbufClear(milbuffer_phase_1, 0L);
MbufClear(milbuffer_phase_2, 0L);
#endif

/* ----- Allocate display. ----- */

MdispAlloc(idSys, M_DEFAULT, M_DEF_DISPLAY_FORMAT, M_DEFAULT, &fenster_process);

```

```

MdispAlloc(idSys, M_DEFAULT, M_DEF_DISPLAY_FORMAT, M_DEFAULT, &fenster_phase);
if (fenster_phase == M_NULL || fenster_process == M_NULL){
    fprintf(stderr, "main: Cannot allocate MIL display.\n");
    return 1;
}

/* ----- cosmetic. ----- */

MdispControl(fenster_process, M_WINDOW_TITLE_BAR , M_DISABLE);
MdispControl(fenster_phase, M_WINDOW_TITLE_BAR , M_DISABLE);

/* ----- end preparing MIL system ----- */

MdigControl(idDigiz, M_SHUTTER, 2480);
MdigControl(idDigiz, M_GAIN, 2228);

/* ----- end preparing MIL system ----- */

/* ----- menu ----- */

#ifdef SHOWPHASE
printf("\n Menue: \n\n (f)adenkreuz \n\n \
        (e)erste aufnahme\n \
        (z)weite aufnahme\n\n \
        (p)rimaeres phasenbild \n \
        (s)ekundaeres phasenbild \n \
        (d)ifferenz phasenbild \n\n \
        (t)filter \n \
        (l)ade bilder \n\n \
        (q)uit \n\n" );

#endif
#ifdef SHOWPHASE
printf("\n Menue: \n\n (f)adenkreuz \n\n \
        (e)erste aufnahme\n \
        (z)weite aufnahme \n\n \
        (d)ifferenz phasenbild \n\n \
        (q)uit \n\n" );

#endif
printf(" Status: Anfang. \r");

/* ----- preparing com interface ----- */

inirs();

/* ----- catch key ----- */

do{
    letter=getch();
    switch(letter)
    {
        case 'f':

```

```
        case'F':
            center();
            break;
        case'e':
        case'E':
            grep(1);
            break;
        case'z':
        case'Z':
            grep(2);
            break;
#ifdef SHOWPHASE
        case'p':
        case'P':
            display(1);
            break;
        case's':
        case'S':
            display(2);
            break;
#endif

        case't':
        case'T':
            display(3);
            break;
        case'd':
        case'D':
            display(0);
            break;
        case'r':
        case'R':
            inirs();
            break;
        case'l':
        case'L':
            load=1;
            break;
        case'q':
        case'Q':
            letter=0;
            break;
    }
}
/* -- escape seq --*/
while (letter);
printf(" Status: Programm Ende.                \n");

/* ----- shutdown MIL system ----- */

MdigHalt(idDigiz);
```

```
/* ----- clean up ----- */

RS232_Destruct();

MdispFree(fenster_process);
MdispFree(fenster_phase);
MbufFree(milbuffer);
MbufFree(milbuffer_phasenbild);

#ifdef SHOWPHASE
MbufFree(milbuffer_phase_1);
MbufFree(milbuffer_phase_2);
#endif

MdigFree(idDigiz);
MsysFree(idSys);
MappFree(idApp);
return 0;
}

/* ----- */
```

## 7.2 Mathematische Erläuterung

### 7.2.1 Zweistrahlint interferenz

$$\Psi_o(\vec{r}) = A_o e^{i(\omega_r t - \vec{k}_o \vec{r})} \quad (7.1)$$

$$\Psi_r(\vec{r}) = A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.2)$$

$$I_h(\vec{r}) = |\Psi_o(\vec{r}) + \Psi_r(\vec{r})|^2 \quad (7.3)$$

$$I_h(\vec{r}) = \Psi_o(\vec{r})\Psi_o^*(\vec{r}) + \Psi_r(\vec{r})\Psi_r^*(\vec{r}) + \Psi_o(\vec{r})\Psi_r^*(\vec{r}) + \Psi_r(\vec{r})\Psi_o^*(\vec{r}) \quad (7.4)$$

$$I_h(\vec{r}) = A_r^2 + A_o^2 + A_r A_o e^{i(\vec{k}_r \vec{r} - \vec{k}_o \vec{r})} + A_r A_o e^{-i(\vec{k}_r \vec{r} - \vec{k}_o \vec{r})} \quad (7.5)$$

$$I_h(\vec{r}) = A_r^2 + A_o^2 + 2A_r A_o \cos(\vec{k}_r \vec{r} - \vec{k}_o \vec{r}) \quad (7.6)$$

### 7.2.2 Rekonstruktion des Hologramms

Für  $\Psi_{R\lambda_1} = \Psi_{r\lambda_1}$ :

$$\Psi_r(\vec{r}) = \Psi_R(\vec{r}) = A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.7)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta T_h(\vec{r}) \Psi_R(\vec{r}, t) \quad (7.8)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta (A_r^2 + A_o^2 + 2A_o A_r \cos((\vec{k}_r - \vec{k}_o) \vec{r})) A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.9)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta A_r^2 A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} + \beta A_o^2 A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.10)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\vec{k}_r \vec{r} - \vec{k}_o \vec{r} + \omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.11)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\vec{k}_o \vec{r} - \vec{k}_r \vec{r} + \omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.12)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta (A_o^2 + A_r^2) A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.13)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t - \vec{k}_o \vec{r})} \quad (7.14)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t + \vec{k}_o \vec{r} - 2\vec{k}_r \vec{r})} \quad (7.15)$$



Für  $\Psi_{R\lambda_1} \neq \Psi_{R\lambda_2}$ :

$$\Psi_r(\vec{r}) \neq \Psi_R(\vec{r}) = A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.16)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta T_h(\vec{r}) \Psi_R(\vec{r}, t) \quad (7.17)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta (A_r^2 + A_o^2 + 2A_o A_r \cos((\vec{k}_{r2} - \vec{k}_o) \vec{r})) A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.18)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta A_r^2 A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} + \beta A_o^2 A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.19)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_o \vec{r} + \omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.20)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\vec{k}_o \vec{r} - \vec{k}_{r2} \vec{r} + \omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.21)$$

$$\Psi_{re}(\vec{r}, t) = \beta (A_o^2 + A_r^2) A_r e^{i(\omega_r t - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.22)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t - \vec{k}_o \vec{r} + \vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.23)$$

$$+ \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t + \vec{k}_o \vec{r} - \vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.24)$$

Die rekonstruierten Objektwellen der virtuellen Objektbilder sind:

$$\Psi_{re_o\lambda_1}(\vec{r}, t) = \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t - \vec{k}_o \vec{r})} \quad (7.25)$$

$$\Psi_{re_o\lambda_2}(\vec{r}, t) = \beta A_r^2 A_o e^{i(\omega_r t - \vec{k}_o \vec{r} + \vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.26)$$

### 7.2.3 Holographisches Interferogramm

$$I_{hI} = |\Psi_{re_o\lambda_1} + \Psi_{re_o\lambda_2}|^2 \quad (7.27)$$

$$I_{hI} = \Psi_{re_o\lambda_1} \Psi_{re_o\lambda_1}^* + \Psi_{re_o\lambda_2} \Psi_{re_o\lambda_2}^* + \Psi_{re_o\lambda_1} \Psi_{re_o\lambda_2}^* + \Psi_{re_o\lambda_2} \Psi_{re_o\lambda_1}^* \quad (7.28)$$

$$I_{hI} = 2(\beta A_r^2 A_o)^2 + (\beta A_r^2 A_o)^2 e^{i(\vec{k}_{r1} \vec{r} - \vec{k}_{r2} \vec{r})} + (\beta A_r^2 A_o)^2 e^{i(\vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_{r1} \vec{r})} \quad (7.29)$$

$$I_{hI} = 2(\beta A_r^2 A_o)^2 [1 + \cos(\vec{k}_{r2} \vec{r} - \vec{k}_{r1} \vec{r})] \quad (7.30)$$

## 7.3 Spezifikation

### 7.3.1 Temperaturregeleinheit für Laserdioden



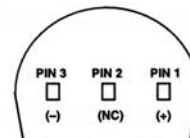
## Low Cost, Precision IC Temperature Transducer

### AD592\*

#### FEATURES

**High Precalibrated Accuracy:** 0.5°C max @ +25°C  
**Excellent Linearity:** 0.15°C max (0°C to +70°C)  
**Wide Operating Temperature Range:** -25°C to +105°C  
**Single Supply Operation:** +4 V to +30 V  
**Excellent Repeatability and Stability**  
**High Level Output:** 1  $\mu\text{A}/\text{K}$   
**Two Terminal Monolithic IC:** Temperature In/  
 Current Out  
**Minimal Self-Heating Errors**

#### CONNECTION DIAGRAM



\* PIN 2 CAN BE EITHER ATTACHED OR UNCONNECTED  
BOTTOM VIEW

#### PRODUCT DESCRIPTION

The AD592 is a two terminal monolithic integrated circuit temperature transducer that provides an output current proportional to absolute temperature. For a wide range of supply voltages the transducer acts as a high impedance temperature dependent current source of 1  $\mu\text{A}/\text{K}$ . Improved design and laser wafer trimming of the IC's thin film resistors allows the AD592 to achieve absolute accuracy levels and nonlinearity errors previously unattainable at a comparable price.

The AD592 can be employed in applications between -25°C and +105°C where conventional temperature sensors (i.e., thermistor, RTD, thermocouple, diode) are currently being used. The inherent low cost of a monolithic integrated circuit in a plastic package, combined with a low total parts count in any given application, make the AD592 the most cost effective temperature transducer currently available. Expensive linearization circuitry, precision voltage references, bridge components, resistance measuring circuitry and cold junction compensation are not required with the AD592.

Typical application areas include: appliance temperature sensing, automotive temperature measurement and control, HVAC (heating/ventilating/air conditioning) system monitoring, industrial temperature control, thermocouple cold junction compensation, board-level electronics temperature diagnostics, temperature readout options in instrumentation, and temperature correction circuitry for precision electronics. Particularly useful in remote sensing applications, the AD592 is immune to voltage drops and voltage noise over long lines due to its high impedance current output. AD592s can easily be multiplexed; the signal current can be switched by a CMOS multiplexer or the supply voltage can be enabled with a tri-state logic gate.

The AD592 is available in three performance grades: the AD592AN, AD592BN and AD592CN. All devices are packaged in a plastic TO-92 case rated from -45°C to +125°C. Performance is specified from -25°C to +105°C. AD592 chips are also available, contact the factory for details.

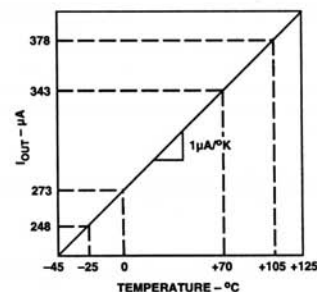
\*Protected by Patent No. 4,123,698.

REV. A

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

#### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. With a single supply (4 V to 30 V) the AD592 offers 0.5°C temperature measurement accuracy.
2. A wide operating temperature range (-25°C to +105°C) and highly linear output make the AD592 an ideal substitute for older, more limited sensor technologies (i.e., thermistors, RTDs, diodes, thermocouples).
3. The AD592 is electrically rugged; supply irregularities and variations or reverse voltages up to 20 V will not damage the device.
4. Because the AD592 is a temperature dependent current source, it is immune to voltage noise pickup and IR drops in the signal leads when used remotely.
5. The high output impedance of the AD592 provides greater than 0.5°C/V rejection of supply voltage drift and ripple.
6. Laser wafer trimming and temperature testing insures that AD592 units are easily interchangeable.
7. Initial system accuracy will not degrade significantly over time. The AD592 has proven long term performance and repeatability advantages inherent in integrated circuit design and construction.



## AD592—SPECIFICATIONS (typical @ $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $V_S = +5\text{ V}$ , unless otherwise noted)

Model	AD592AN			AD592BN			AD592CN			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ACCURACY</b>										
Calibration Error @ $+25^\circ\text{C}^1$ $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$		1.5	2.5		0.7	1.0		0.3	0.5	$^\circ\text{C}$
Error over Temperature Nonlinearity <sup>2</sup>		1.8	3.0		0.8	1.5		0.4	0.8	$^\circ\text{C}$
$T_A = -25^\circ\text{C}$ to $+105^\circ\text{C}$ Error over Temperature <sup>3</sup> Nonlinearity <sup>2</sup>		0.15	0.35		0.1	0.25		0.05	0.15	$^\circ\text{C}$
		2.0	3.5		0.9	2.0		0.5	1.0	$^\circ\text{C}$
		0.25	0.5		0.2	0.4		0.1	0.35	$^\circ\text{C}$
<b>OUTPUT CHARACTERISTICS</b>										
Nominal Current Output @ $+25^\circ\text{C}$ (298.2K)		298.2			298.2			298.2		$\mu\text{A}$
Temperature Coefficient Repeatability <sup>4</sup> Long Term Stability <sup>5</sup>		1	0.1		1	0.1		1	0.1	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}/\text{month}$
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS</b>										
Operating Temperature	-25	+105		-25	+105		-25	+105		$^\circ\text{C}$
Package Temperature <sup>6</sup>	-45	+125		-45	+125		-45	+125		$^\circ\text{C}$
Forward Voltage (+ to -)		44			44			44		V
Reverse Voltage (- to +)		20			20			20		V
Lead Temperature (Soldering 10 sec)		300			300			300		$^\circ\text{C}$
<b>POWER SUPPLY</b>										
Operating Voltage Range	4	30		4	30		4	30		V
Power Supply Rejection										
+4 V < $V_S$ < +5 V		0.5			0.5			0.5		$^\circ\text{C}/\text{V}$
+5 V < $V_S$ < +15 V		0.2			0.2			0.2		$^\circ\text{C}/\text{V}$
+15 V < $V_S$ < +30 V		0.1			0.1			0.1		$^\circ\text{C}/\text{V}$

## NOTES

<sup>1</sup>An external calibration trim can be used to zero the error @  $+25^\circ\text{C}$ .

<sup>2</sup>Defined as the maximum deviation from a mathematically best fit line.

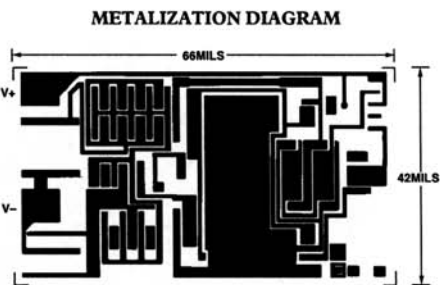
<sup>3</sup>Parameter tested on all production units at  $+105^\circ\text{C}$  only. C grade at  $-25^\circ\text{C}$  also.

<sup>4</sup>Maximum deviation between  $+25^\circ\text{C}$  readings after a temperature cycle between  $-45^\circ\text{C}$  and  $+125^\circ\text{C}$ . Errors of this type are noncumulative.

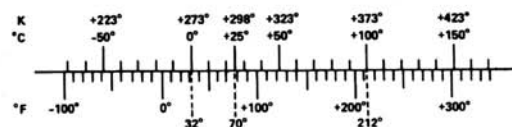
<sup>5</sup>Operation @  $+125^\circ\text{C}$ , error over time is noncumulative.

<sup>6</sup>Although performance is not specified beyond the operating temperature range, temperature excursions within the package temperature range will not damage the device. Specifications subject to change without notice.

Specifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in boldface are tested on all production units.



## TEMPERATURE SCALE CONVERSION EQUATIONS



$$^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (^\circ\text{F} - 32)$$

$$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.15$$

$$^\circ\text{F} = \frac{9}{5} ^\circ\text{C} + 32$$

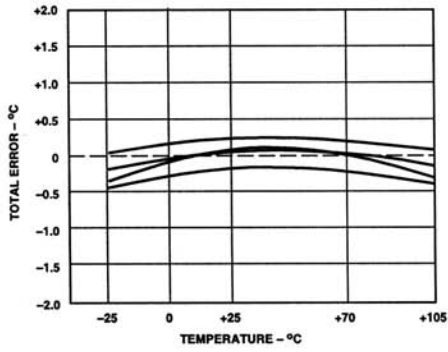
$$^\circ\text{R} = ^\circ\text{F} + 459.7$$

## ORDERING GUIDE

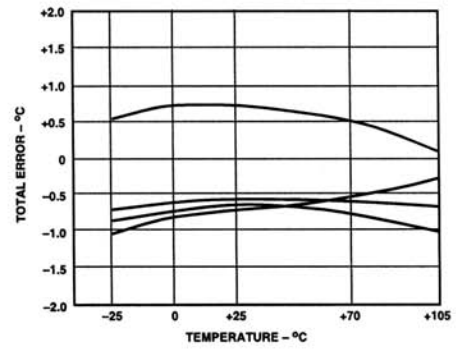
Model	Max Cal Error @ $+25^\circ\text{C}$	Max Error $-25^\circ\text{C}$ to $+105^\circ\text{C}$	Max Nonlinearity $-25^\circ\text{C}$ to $+105^\circ\text{C}$	Package Option
AD592CN	0.5 $^\circ\text{C}$	1.0 $^\circ\text{C}$	0.35 $^\circ\text{C}$	TO-92
AD592BN	1.0 $^\circ\text{C}$	2.0 $^\circ\text{C}$	0.4 $^\circ\text{C}$	TO-92
AD592AN	2.5 $^\circ\text{C}$	3.5 $^\circ\text{C}$	0.5 $^\circ\text{C}$	TO-92

**Typical Performance Curves—AD592**

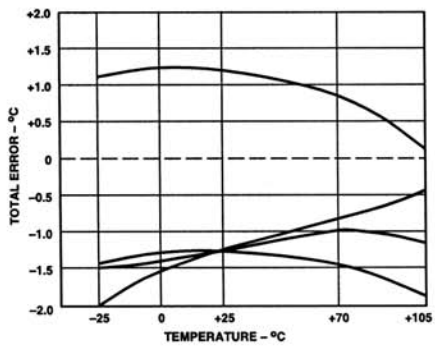
Typical @  $V_S = +5\text{ V}$



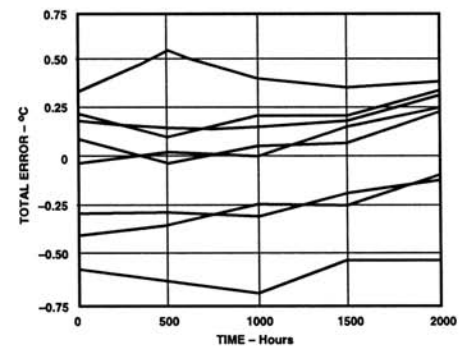
*AD592CN Accuracy Over Temperature*



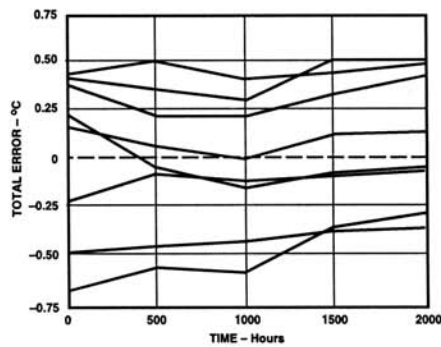
*AD592BN Accuracy Over Temperature*



*AD592AN Accuracy Over Temperature*



*Long-Term Stability @ +85°C and 85% Relative Humidity*



*Long-Term Stability @ +125°C*

## 7.3.2 Eingesetzte Laserdiode

# RED LASER DIODE

## DL-5147-042

Ver.1 July. 2002

### Features

- Short wavelength : 655 nm (Typ.)
- High output power : 30 mW at 60°C (CW)
- Low threshold current :  $I_{th} = 40$  mA (Typ.)
- Small package :  $\varnothing 5.6$  mm
- TE mode

### Applications

Bar-code scanner

### Absolute Maximum Ratings

(T<sub>c</sub>=25°C)

Parameter		Symbol	Ratings	Unit
Light Output	CW	P <sub>o</sub> (CW)	30	mW
	Pulse <sup>1)</sup>	P <sub>o</sub> (pulse)	50	
Reverse Voltage	Laser	VR	2	V
	PD		30	
Operating Temperature		T <sub>opr</sub>	-10 to +60	°C
Storage Temperature		T <sub>stg</sub>	-40 to +85	°C

1) Pulse Width 0.5μs, Duty 50%

### Electrical and Optical Characteristics

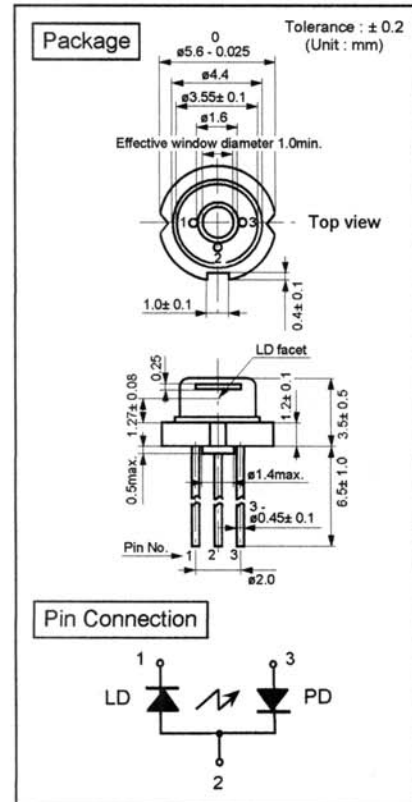
2) 3)

(T<sub>c</sub>=25°C)

Parameter		Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Threshold Current		I <sub>th</sub>	CW	-	40	50	mA
Operating Current		I <sub>op</sub>	P <sub>o</sub> =30mW	-	80	110	mA
Operating Voltage		V <sub>op</sub>	P <sub>o</sub> =30mW	-	2.4	2.8	V
Lasing Wavelength		L <sub>p</sub>	P <sub>o</sub> =30mW	-	655	665	nm
Beam Divergence <sup>4)</sup>	Perpendicular	Q <sub>v</sub>	P <sub>o</sub> =30mW	15	23	28	°
	Parallel	Q <sub>h</sub>	P <sub>o</sub> =30mW	6	7	10	°
Off Axis Angle	Perpendicular	dQ <sub>v</sub>	-	-	-	± 3	°
	Parallel	dQ <sub>h</sub>	-	-	-	± 3	°
Differential Efficiency		dP <sub>o</sub> /dI <sub>op</sub>	-	-	0.75	-	mW/mA
Monitoring Output Current		I <sub>m</sub> <sup>5)</sup>	P <sub>o</sub> =30mW	0,1	0.3	-	mA
Astigmatism		A <sub>s</sub>	P <sub>o</sub> =30mW	-	10	-	μm

2) Initial values 3) All the above values are evaluated with Tottori Sanyo's measuring apparatus

4) Full angle at half maximum

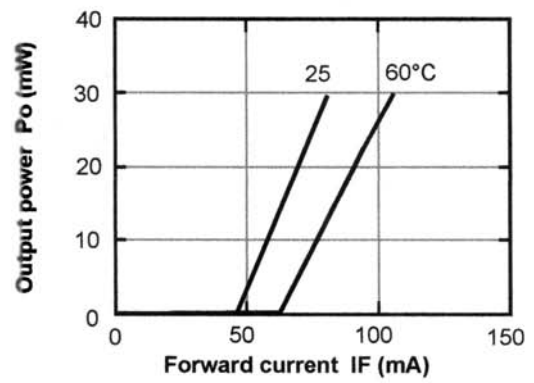


DL-5147-042

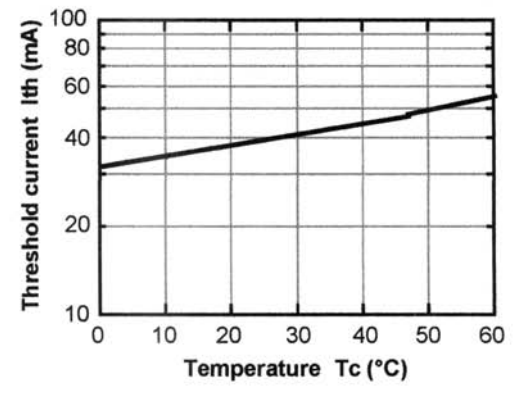


**Characteristics**

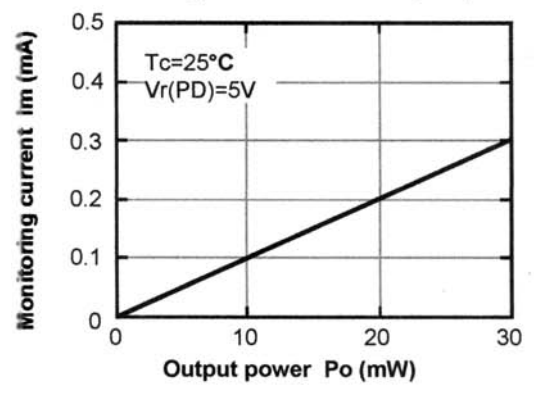
**Output power vs. Forward current**



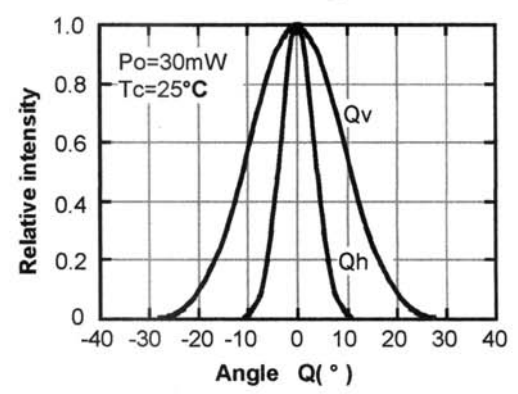
**Threshold current vs. Temperature**



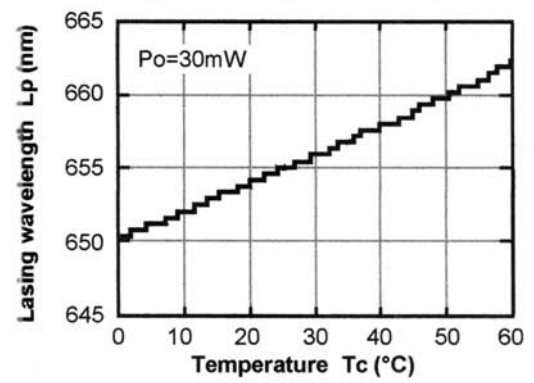
**Monitoring current vs. Output power**



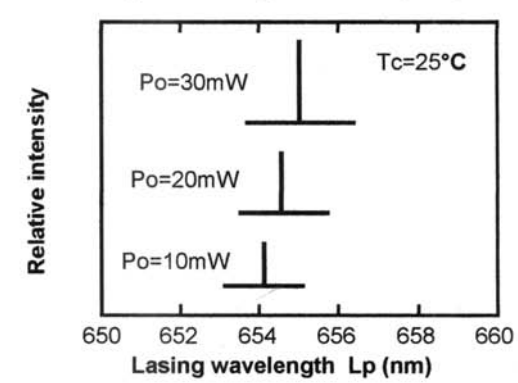
**Beam divergence**



**Lasing wavelength vs. Temperature**



**Lasing wavelength vs. Output power**



## Literaturverzeichnis

- [1] Bergmann - Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik  
Band III Optik, Walter de Gruyter Berlin, 1987.
  
- [2] Breuckmann, B.: Bildverarbeitung und optische Meßtechnik,  
Franzis-Verlag GmbH München, 1993.
  
- [3] Bronstein - Semendjajew - Musiol - Mühlig: Taschenbuch  
der Mathematik, Verlag Harri Deutsch AG, 1999.
  
- [4] Dändliker, R. - Marom, E. - Mottier, F. M.: Two-Reference-Beam Holographic Interferometry, Journal of the Optical Society of America 66, 1976.
  
- [5] Françon M.: Holographie, Springer Verlag, 1972.
  
- [6] Gabor, Dennis: Holography 1948-1971, Nobel Lecture, December 11, 1971.
  
- [7] Hariharan, P.: Optical Holography, Cambridge University Press, 1984.
  
- [8] Hecht, E.: Optics, Addison-Wesley, 1974/1987.
  
- [9] Henning, C.: Messen kleiner Oberflächendeformationen mit Hilfe der Phasen-Shift-Holographie, VDI-Verlag Düsseldorf, 1995.

- [10] Jones, R. and Wykes, C.: Holographic and Speckle Interferometry, Cambridge University Press, 1989.
  
- [11] Kunz, Dietmar: Digitale Bildverarbeitung, Foliensatz WS 2002/2003.
  
- [12] Mütze, K.: ABC der Optik, Dausien Verlag, 1960.
  
- [13] Schnars, U.: Digitale Aufzeichnung und mathematische Rekonstruktion von Hologrammen in der Interferometrie, VDI-Verlag Düsseldorf, 1994.
  
- [14] Schomburg Torsten.: Konturgenerierung nach der Zwei-Wellenlängen-Methode mit Hilfe der elektronischen Speckle-Interferometrie, Diplomarbeit FH Köln, 1990.
  
- [15] Schröder, G.: Technische Fotografie, Vogel-Verlag, 1981.
  
- [16] Schröder, G.: Technische Optik, Vogel-Verlag, 1990.
  
- [17] Stöcker H.: Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch AG, 1998.



## Index

- 4-Schritt-Algorithmus, 20
- Amplitudenhologramm, 17
- Amplitudentransmission, 6
- Apertur, 10
- Artefakten, 23
- Braggsche Bedingung, 29
- Brechzahldifferenz, 17
- Differenzkriterium, 24
- Elementarwellen, 8
- Empfindlichkeit, 14
- Empfindlichkeitsvektor, 14, 26, 27
- Entwicklungsbibliothek, 52
- Entwicklungsumgebung, 52
- Filteralgorithmen, 23
- Fleckenmuster, 8
- Gangunterschied, 26
- Gleichungssystem, 20
- Hologramm, 4
- Huygensschen Prinzip, 4
- Isohypsen, 13
- Kohärenter Untergrund, 4
- Korrelationsbedingung, 47
- Kreuzrekonstruktionen, 29
- Lichtstrommesser, 34
- Maskierung, 39
- Michelson-Interferometer, 27
- Operationsmatrix, 23
- Phasendemodulation, 24
- Phasenhologramm, 17
- Phasenstrukturen, 17
- Punktausbreitungsfunktion, 9, 10
- Quadrantenrelationen, 20
- Sägezahn-Funktion, 23
- Seitenband, 26
- Shearing-Platte, 34
- Speckle, 8
- Streifenordnung, 24
- Tiefpassfilter, 10
- Ulbrichtkugel, 34
- Verteilungsbilder, 23
- Wellenfrontrekonstruktion, 4
- Zusatzphase, 20
- Zweistrahlinterdferenz, 5, 19



## **Kurzbeschreibung**

**Titel :** Formvermessung am holographisch rekonstruierten Objektbild

**Autor :** Vitor Agostinho Guerreiro

**Referenten :** Prof. Dr. rer. nat. Jörg Gutjahr / Prof. Dr.-Ing. Stefan Altmeyer

**Zusammenfassung :** Diese Arbeit zeigt ein Verfahren zur automatisierten Auswertung von holographischen Interferogrammen für die Formvermessung auf. Es erlaubt, die topographische Form eines Objektes qualitativ anhand dessen holographischen Bildes automatisiert zu erfassen. Eine automatisierte Auswertung ermöglicht den wirtschaftlichen Einsatz der holographischen Interferometrie in der Formvermessung.

**Stichwörter :** holographische Formvermessung, Konturgenerierung, Zwei-Wellenlängen-Verfahren

**Datum :** Februar 2006

**Abstract**

**Title :** Shape measurement of a holographic reconstructed image

**Author :** Vitor Agostinho Guerreiro

**Reviewers :** Prof. Dr. rer. nat. Jörg Gutjahr / Prof. Dr.-Ing. Stefan Altmeyer

**Abstract :** This work shows a procedure for the automated evaluation of holographic interference fringes for a shape measurement. It allows qualitatively, the automated measurement of the topographic form of an object, based on its holographic image. An automated evaluation makes the business application of holographic interferometry in shape measurement possible.

**Keywords :** Two-wavelength holographic contouring, Shape measurement

**Date :** February 2006

## **Erklärungen**

### **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Köln, den 17. Februar 2006

(Vitor A. Guerreiro)

### **Sperrvermerk**

Die vorgelegte Arbeit unterliegt keinem Sperrvermerk.

### **Weitergabeerklärung**

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass das vorliegende Exemplar meiner Diplomarbeit oder eine Kopie hiervon für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden darf.

Köln, den 17. Februar 2006

(Vitor A. Guerreiro)