

# Deflektometrische Methoden zur Sichtprüfung und 3D-Vermessung voll reflektierender Freiformflächen

H. Rapp und C. Stiller

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mess- und Regelungstechnik  
Engler-Bunte-Ring 21, D-76131 Karlsruhe

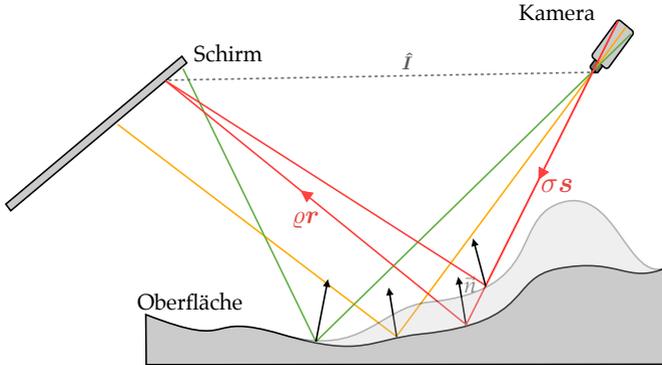
**Zusammenfassung** Deflektometrische Methoden sind geeignet, voll- oder teilreflektierende Oberflächen optisch zu vermessen. Sie finden Einsatz in der Industrie zur Sichtprüfung von Bauteilen, aber das Verfahren leistet auch 3-dimensionale Rekonstruktion.

Dieser Aufsatz erklärt das Messprinzip der Deflektometrie und das Eindeutigkeitsproblem bei der 3-dimensionalen Rekonstruktion. Ausserdem wird das Phasenschubverfahren im Kontext der Deflektometrie besprochen. Ausführlich wird auf die Visualisierung von Fehlstellen bei qualitativer Messung eingegangen und der Aufsatz schließt mit der Vorstellung möglicher Verfahren für die 3-dimensionale Rekonstruktion.

## 1 Einleitung

Die Deflektometrie ist eine etablierte Methode um geometrische Fehlstellen auf voll reflektierenden Bauteilen zu detektieren. Sie findet Anwendung bei der Qualitätssicherung in vielen Bereichen der Industrie: Lackteile beim Automobil, Keramikgeschirr oder Badarmaturen können alle damit geprüft werden. Zudem eignet sie sich zur 3-dimensionalen Vermessung von reflektierenden Bauteilen.

Das Messprinzip ist dabei simpel und basiert auf der Bestimmung der Neigung der zu untersuchenden Oberfläche. Bild 1.1 zeigt den schematischen Aufbau eines Deflektometriesystems: Ein Schirm oder Monitor zeigt ein definiertes Muster an, dieses wird von der Oberfläche reflektiert und das verzerrte Muster wird von der Kamera beobachtet. Durch



**Abbildung 1.1:** Schematischer Aufbau einer deflektometrischen Anordnung.

aus der Interferometrie bekannten Phasenschubverfahren oder ähnlicher Kodierungsmechanismen kann eine Zuordnung zwischen beobachtetem Schirmpixel und Kamerapixel hergestellt werden; diese Abbildung wird einfache Abbildungsfunktion  $I$  genannt [1–3]. Diese entspricht also einer Zuordnung zwischen Sichtstrahl der Kamera und Schirmpixel. Unter gewissen Annahmen reichen diese Informationen für eine qualitative Aussage über die Oberfläche aus. Soll eine 3-dimensionale Rekonstruktion erfolgen steht man allerdings vor einem Zuordnungsproblem: Für jeden Punkt auf dem Sichtstrahl der Kamera lässt sich eine potentielle Oberflächennormale finden, die der einfachen Abbildungsfunktion genügt; d.h. ein freier Parameter bleibt unbestimmt durch die deflektometrische Messung [4].

Dieser Aufsatz ist wie folgt gegliedert: Im nächsten Abschnitt 2 diskutieren wir kurz die theoretischen Grundlagen der Deflektometrie. Ein wichtiger Teil ist hier die Messung der einfachen Abbildungsfunktion mittels des Phasenschubverfahrens. Ausserdem gehen wir auf die geometrischen Zusammenhänge der deflektometrischen Größen ein.

Der Abschnitt 3 erklärt, wie man die Deflektometrie zu Qualitätssicherungszwecken einsetzen kann. Dazu werden die nötigen Annahmen erläutert und auch die Visualisierung von Defekten wird diskutiert.

Im folgenden Abschnitte 4 werden Verfahren vorgestellt, die das Eindeutigkeitsproblem lösen und damit eine 3D-Rekonstruktion möglich ma-

chen.

Der Aufsatz schliesst mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 5.

## 2 Theorie

### 2.1 Die Messung der einfachen Abbildungsfunktion

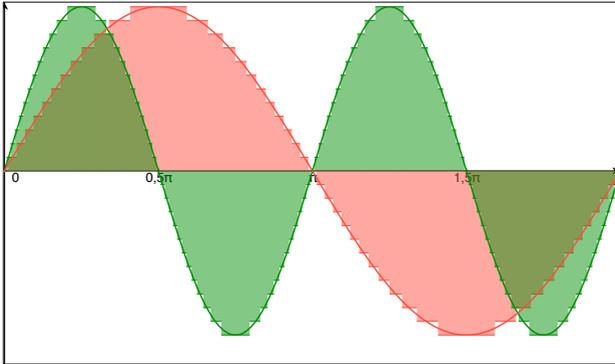
Jede deflektometrische Messung benötigt die Zuordnung zwischen Kamerapixel  $\mathbf{u}$  und von diesem Pixel beobachtetem Schirmpixel  $\mathbf{v}$ . Dieser Zusammenhang wird einfache Abbildungsfunktion  $I(\mathbf{u})$  genannt; ist eine Kalibrierung der Schirm und Kameraposition gegeben so lässt sich eine Zuordnung zwischen Sichtstrahl im Raum und Schirmpixel im Raum direkt aus ihr berechnen. Diese 3-dimensionale Zuordnung nennt man dann Abbildungsfunktion  $\hat{I}$ .

Die offensichtliche Methode die einfache Abbildungsfunktion zu messen ist jeden Pixel des Schirms einzeln auf weiss zu stellen und zu überprüfen, welcher Pixel sich im Bild der Kamera ändert. Diese Methode hat einige Nachteile: sie benötigt sehr viele Bilder, erlaubt keine subpixelgenaue Zuordnung und es gehen durch den Tiefpasscharakter von optischen Systemen bei der Abbildung Informationen verloren. Andere binäre Codierungen wie Graycode oder Base2 sind möglich und sparen Bilder. Für die Deflektometrie hat sich jedoch ein aus der Interferometrie und Time-Of-Flight Imaging kommende Idee etabliert: das Phasenschubverfahren. Zum Einsatz kommen hierbei Sinus Muster. Sie haben nur eine Frequenz, eine subpixelgenaue Zuordnung ist möglich und theoretisch reichen sechs Bilder um die einfache Abbildungsfunktion zu messen. Numerisch besonders einfach ist das Verfahren aber mit 8 Bildern (4 für die X-Richtung und 4 für die Y Richtung), welches wir im folgenden kurz beschreiben wollen.

O.b.d.A. beschränken wir uns hier auf eine Richtung, das Verfahren muss für horizontale und vertikale Richtung ausgeführt werden. Der Schirm zeigt nacheinander 4 Sinus-Muster der Form

$$S_k(v) = A_o \cos\left(\frac{2\pi}{V}v + \Phi_k\right) \quad (1.1)$$

an. hierbei ist  $A_o$  die Amplitude,  $v$  der Index des Pixels auf dem Schirm,  $V$  die Wellenlänge in Pixel und  $\Phi_k$  ein Offset, der in jedem Bild um  $\pi/2$



**Abbildung 1.2:** Diskretisierungsproblem. Rot ist eindeutig hat aber einen geringen lokalen Kontrast. Grün hat höheren lokalen Kontrast, ist aber nicht mehr eindeutig.

weiter geschoben wird.  $k$  definiert den Index des aufgenommenen Bildes. Der Kamerapixel mit Index  $u$  nimmt im  $k$ -ten Bild folgendes Signal auf:

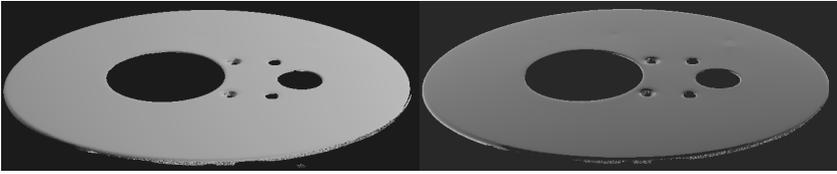
$$C_k(u) = g(u) + A_i(u) \cos(\varphi(u) + \Phi_k), \quad (1.2)$$

dabei ist  $g$  die konstante Hintergrundbeleuchtung die auf den Pixel fällt und unabhängig vom Schirmbild ist,  $A_i$  die aufgezeichnete Amplitude und  $\varphi(u)$  der interessierende Phasenschub. Aus vier Bildern lässt sich  $\varphi(u)$  leicht bestimmen:

$$\varphi(u) = \arctan \left( \frac{C_3(u) - C_1(u)}{C_2(u) - C_0(u)} \right). \quad (1.3)$$

Aus dem Phasenschub  $\varphi(u)$  kann nun der Schirmpixel Index berechnet werden; hierzu ist es nötig Radian wieder in Pixel umzurechnen, es gilt also  $v(u) = \varphi(u)V/2\pi$ .

Die Gleichung (1.3) ist ein Spezialfall mit  $n = \max(k) = 4$  einer allgemeineren Formulierung für  $n \geq 3$ . Für die allgemeine Lösung kann gezeigt werden, dass sie im Least-Square Sinne optimal an die Messung angepasst ist. Das Phasenschubverfahren bietet ausserdem noch ein Fehlermaß durch die Amplitude  $A_i$  in jedem Pixel. Eine detaillierte Diskussion der allgemeinen Formulierung findet sich zum Beispiel in [5]. Der



**Abbildung 1.3:** Einfache Abbildungsfunktion  $I$ , gemessen mit dem Multiphasenschubverfahren. Links: Horizontale Komponente, Rechts: Vertikale Komponente

Phasenschub ist nach wie vor im Focus des wissenschaftlichen Interesse, eine neue faszinierende Arbeit ist [6].

### Multiphasenschub

Figure 1.2 zeigt ein praktisches Problem beim Phasenschubverfahren. Displays haben eine endliche Anzahl an diskreten Grauwerte, d.h. benachbarte Pixel auf der Kamera messen u.U. die gleiche Phase. Das Problem kann gelöst werden, indem man die Frequenz des Sinus auf dem Schirm erhöht: die breite der Flächen gleicher Grauwerte werden kleiner, d.h. der lokale Kontrast wird erhöht. Allerdings verliert man die eindeutige Zuordnung zwischen Schirmpixel  $v$  und zugehörigem Phasenschub  $\varphi$ .

Diese Eindeutigkeit wieder herzustellen nennt man Phasenentfaltung; auch hier gibt es reichlich Ansätze, wie z.B. Kombinationen zwischen Phasenschub und binärer Codierung [7] oder 2-Frequenz Phasenschübe entfaltet mit dem chinesischen Restsatz [8]. Simpel und numerisch bestens geeignet ist jedoch der Multiphasenschub, der bei  $C_2$  stetigen Oberflächen immer eine genaue Entfaltung erlaubt. Die Idee hierbei ist, die Frequenz des Sinus in jedem Bild zu verdoppeln; springt die Phase bei einem Bild im Vergleich zum vorherigen kann sie mit der Information aus dem letzten Bild korrigiert werden.

Die Messungen der einfachen Abbildungsfunktion für das Bauteil aus Abb. 1.4 sind in Abb. 1.3 zu sehen.

## 2.2 Geometrie der Deflektometrie

Aus der Abb. 1.1 ergibt sich der Zusammenhang

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{s}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{s}\|} \quad \text{und} \quad \hat{\mathbf{I}} = \sigma \mathbf{s} + \rho \mathbf{r} \quad (1.4)$$

Einsetzen ergibt direkt

$$\hat{\mathbf{I}} = \frac{1/\rho \hat{\mathbf{I}} - (1 + \frac{\sigma}{\rho})\mathbf{s}}{\|1/\rho \hat{\mathbf{I}} - (1 + \frac{\sigma}{\rho})\mathbf{s}\|} \quad (1.5)$$

Hierbei ist ersichtlich, dass die einfache Abbildungsfunktion zwei Parameter enthält ( $\rho$  und  $\sigma$ ) und daher nicht direkt die gewünschte Information über den Normalenvektor liefert.

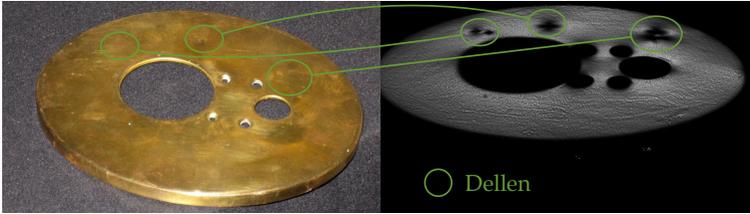
## 3 Deflektometrie zur Sichtprüfung

In der Qualitätssicherung interessiert oft nur die Frage, ob ein Bauteil defekt ist oder nicht. Sämtliche Defekte, die von der Krümmung der Oberfläche abhängen lassen sich mit der Deflektometrie sehr gut aufspüren. Hierzu umgeht man das Eindeutigkeitsproblem mit der Annahme, dass die Neigung der Oberfläche affin zur einfachen Abbildungsfunktion ist. Dies ist in Gleichung (1.5) dann exakt erfüllt, wenn alle Punkte der Oberfläche vom optischen Zentrum gleich weit entfernt sind und der Schirm kugelförmig ist [2]. Generell ergibt die Annahme akzeptable Ergebnisse wenn die Oberfläche ausreichend weit weg von Schirm und Kamera liegt.

Die Ableitung der einfachen Abbildungsfunktion kann dann mit den Ableitungen der Tangentialebenen der Oberfläche identifiziert werden. Hieraus lassen sich in einem nächsten Schritt der Grauwertstruktur-Tensor berechnen dessen größter Eigenwert mit der Stärke der größten Krümmung in jedem Punkt identifiziert werden kann.

Mathematisch fasst man hierzu am bequemsten die beiden Ableitungen der einfachen Abbildungsfunktion  $I$  entlang der Koordinatenrichtungen  $u_1, u_2$  der Kamera zusammen und nutzt diese in der diskreten Approximation des Grauwertstruktur-Tensors  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K}(\mathbf{u}) \approx \left( \begin{array}{cc} \sum_{\mathbf{u}'} \omega(\mathbf{u}, \mathbf{u}')^2 p_1^2 & \sum_{\mathbf{u}'} \omega(\mathbf{u}, \mathbf{u}')^2 p_1 p_2 \\ \sum_{\mathbf{u}'} \omega(\mathbf{u}, \mathbf{u}')^2 p_1 p_2 & \sum_{\mathbf{u}'} \omega(\mathbf{u}, \mathbf{u}')^2 p_2^2 \end{array} \right), \quad (1.6)$$



**Abbildung 1.4:** Foto einer Amatur und die zugehörige Visualisierung von  $\lambda_{\max}$

mit  $\mathbf{p} = \left( \frac{\partial I_1}{\partial u_1}, \frac{\partial I_2}{\partial u_2} \right)^T$  und  $\omega(\mathbf{u})$  als eine Fensterfunktion die den Einfluss der Umgebung bestimmt.

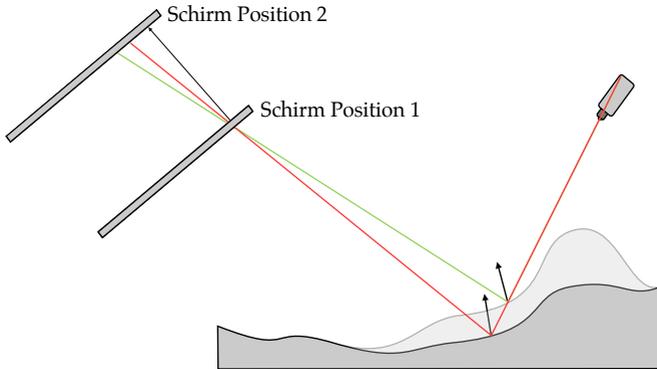
Der größte Eigenwert in jedem Kamerapixel  $\mathbf{u}$

$$\lambda_{\max}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \text{Spur} K(\mathbf{u}) + \sqrt{\text{Spur}^2 K(\mathbf{u}) - 4 \text{Det}(\mathbf{u})} \quad (1.7)$$

beschreibt die stärkste Krümmung. Dieser Wert kann als Grauwert visualisiert werden [9]. Abb. 1.4 gibt ein Beispiel. Links ist ein Foto des zu untersuchenden Bauteiles abgebildet, rechts die Visualisierung  $\lambda_{\max}$ . Die Defekte sind im Foto nicht sichtbar oder nicht von Variationen in der Textur der Oberfläche zu unterscheiden, in der Visualisierung treten sie klar hervor.

## 4 Deflektometrische Methoden zur 3D-Vermessung

Um mit der Deflektometrie 3-dimensional rekonstruieren zu können, benötigt man zunächst einen kalibrierten Versuchsaufbau, d.h. es ist nötig zu wissen wie Kamera und Schirm zueinander orientiert sind. Desweiteren ist es notwendig das Eindeutigkeitsproblem zu lösen. Wenn dies gelingt hat man direkt den gesamten Strahlengang und damit die 3-dimensionale Rekonstruktion der Oberfläche. Oft erhält man allerdings bessere Ergebnisse, wenn man die so eindeutig bestimmten Normalenvektoren integriert [10] anstatt den Abstand  $\rho$  zu triangulieren. Die Integration von Normalenfeldern ist ein gut untersuchtes Problem in der Literatur, siehe z.B. [11], [12].



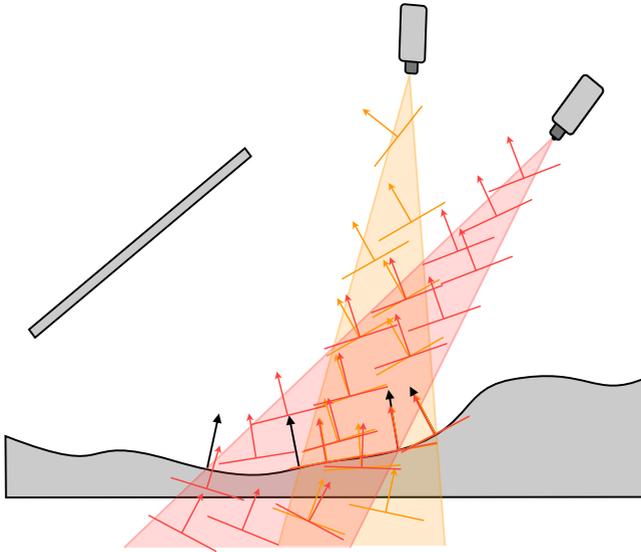
**Abbildung 1.5:** Auflösen des Eindeutigkeitsproblems durch das Verschieben des Schirmes.

#### 4.1 Verschieben des Schirms

Eine einfache Methode zur Lösung des Eindeutigkeitsproblem ist das Verschieben des Schirmes wie dargestellt in 1.5 [3]. Die Idee ist, dass man zwei deflektometrische Messungen durchführt und dabei nur den Schirm vom Objekt weg bewegt; man hat also zwei Raumpunkte der Schirmpixel pro Kamerapixel und erhält damit den kompletten Strahlengang. In der Praxis besteht allerdings oft das Problem das der Schirm nicht einfach zu handhaben ist und dass das genau Verschieben, das für diese Verfahren notwendig ist nicht realisierbar ist. Auch ist bei gekrümmten Bauteilen das Bewegen des Schirmes nicht sinnvoll, da nur noch ein zu kleiner Teil der Oberfläche den Schirm reflektiert.

#### 4.2 Stereodeflektometrie

Ein anderes Verfahren, das nur das Verschieben der Kamera benötigt ist die Stereodeflektometrie [13]. Die Kamera ist leichter zu Handhaben als der Schirm, deswegen wird das Verfahren in der Praxis häufig dem Verschieben des Schirms vorgezogen. Die Idee der Stereodeflektometrie ist in Abb. 1.6 dargestellt. Eine deflektometrische Messung kann als Normalenvektorfeld aufgefasst werden: Jedem Raumpunkt im Messvolumen kann eine potentielle Oberflächennormale zugeordnet werden. Zwei Nor-



**Abbildung 1.6:** Stereodeflektometrie: Zwei Kamerapositionen ergeben zwei Normalenfelder die nur in den Oberflächenpunkten wirklich übereinstimmen.

malenfelder von zwei unterschiedlichen Messungen präzisieren am einem Punkt zwei unterschiedliche Normalen, ausser der Punkt liegt auf der Oberfläche.

Die Art- und Weise wie der Normalenvergleich durchgeführt wird kann variiert werden; möglich sind diskrete Optimierer, Variationsansätze oder auch probabilistische Algorithmen wie Expectation Maximization. Neuere Ansätze versuchen Ungenauigkeiten in der Kalibrierung des Versuchstandes im Normalenvektorvergleich mit zu korrigieren - normalerweise werden dafür mehr als zwei Messungen benötigt.

### 4.3 Sonstige Methoden

Es gibt noch eine Reihe von anderen Rekonstruktionsmethoden. Kurz erwähnt seien hier das Region Grow Verfahren [14] das den Abstand eines Punktes auf der Oberfläche kennen muss und von dort die Normalenvektoren aufintegriert. Andere etablierte Verfahren kombinieren die Deflektometrie mit anderen Messmethoden wie Shape-from-Shading [15], herkömmlichen Stereo [16] oder Streifenlichtprojektion. Diese Methoden benötigen für gewöhnlich jedoch einen lambertschen Anteil in der Reflexion der zu untersuchenden Oberfläche, funktionieren also nicht mit voll reflektierenden Materialien.

Besonderen theoretischen Scharm hat der Ansatz, den optischen Fluss beim Bewegen der Kamera direkt auszuwerten [4]. Das Verfahren hat allerdings praktische Nachteile: es kann kein Phasenschub verwendet werden, da die Kamera für optischen Fluss kontinuierlich bewegt werden muss; zudem ist die Rekonstruktion numerisch sehr aufwendig.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Deflektometrie als qualitative Sichtprüfung ist gut etabliert und bietet kontrastreiche Darstellung von geometrischen Fehlern auf Oberflächen. Dieser Aufsatz gab eine Übersicht über die Theorie der Abbildungsfunktion und wie sie als affin zur Oberflächennormale approximiert werden kann, dabei wurde auch das Eindeutigkeitsproblem der Deflektometrie angesprochen. Desweiteren wurde eine mögliche Visualisierung von Defekten erläutert.

In Abschnitt 4 wurden 2 Verfahren zur Lösung des Eindeutigkeitsproblems vorgestellt und auf weitere verwiesen. Die 3D-Deflektometrie wird zur Zeit sehr aktiv erforscht und man kann davon ausgehen, dass in der nahen Zukunft hier noch weitere Fortschritte erzielt werden können. Von allen vorgestellten Verfahren hat die Stereodeflektometrie im Moment die höchste Relevanz für die Praxis, allerdings leidet sie darunter, dass der Versuchsstand für sie exakt kalibriert sein muss. Ein selbst kalibrierender Stereodeflektometrieaufbau wäre für die Praxis sehr wünschenswert.

## Literatur

1. D. Pérard, “Automated visual inspection of specular surfaces with structured-lighting reflection techniques,” Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2001, fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 869, VDI-Verlag, Düsseldorf.
2. S. Kammel, “Deflektometrische untersuchung spiegelnd reflektierender freiformflächen,” Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2005, schriftenreihe Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universitätsverlag Karlsruhe, Nr. 004. [Online]. Available: <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2005/50/>
3. M. Petz and R. Tutsch, “Rasterreflexions-photogrammetrie zur messung spiegelnder oberflächen,” *TM - Technisches Messen*, no. 71, pp. 389–397, 2004.
4. J. Balzer, “Regularisierung des deflektometrieproblems,” Ph.D. dissertation, Universität Karlsruhe, Feb 2008.
5. H. Rapp, “Experimental and theoretical investigation of correlating TOF-camera systems,” *University of Heidelberg*, 2007.
6. S. Zhang, “Phase unwrapping error reduction framework for a multiple-wavelength phase-shifting algorithm,” *Optical Engineering*, vol. 48, no. 10, p. 105601, 2009. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/?JOE/48/105601/1>
7. X. Chen, J. Xi, and Y. Jin, “Phase error compensation method using smoothing spline approximation for a three-dimensional shape measurement system based on gray-code and phase-shift light projection,” *Optical Engineering*, vol. 47, no. 11, p. 113601, 2008. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/?JOE/47/113601/1>
8. L. Yu and L. Luo, “The generalization of the Chinese remainder theorem,” *Acta Mathematica Sinica*, vol. 18, no. 3, pp. 531–538, 2002.
9. S. Kammel and F. P. Leon, “Deflectometric measurement of specular surfaces,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 4, pp. 763–769, Apr. 2008.
10. M. C. Knauer, T. Bothe, S. Lowitzsch, W. Jüptner, and G. Häusler, “Höhe, neigung oder krümmung?” in *DGaO-Proceedings*, no. 107, 2006, p. B30.
11. A. Agrawal, R. Raskar, and R. Chellappa, “What is the range of surface reconstructions from a gradient field?” *Computer Vision–ECCV 2006*, pp. 578–591, 2006.

12. M. Grédiac, “Method for surface reconstruction from slope or curvature measurements of rectangular areas,” *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 20, pp. 4823–4829, 1997. [Online]. Available: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-36-20-4823>
13. M. C. Knauer, “Absolute phasenmessende deflektometrie,” Ph.D. dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Mai 2006.
14. S. Kammel and J. Horbach, “Topography reconstruction of specular surfaces,” in *Videometrics VIII*, J.-A. Beraldin, S. F. El-Hakim, A. Gruen, and J. S. Walton, Eds., vol. 5665, no. 1. SPIE, 2005, pp. 59–66. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/?PSI/5665/59/1>
15. J. Balzer, S. Werling, and J. Beyerer, “Regularization of the deflectometry problem using shading data,” P. S. Huang, Ed., vol. 6382, no. 1. SPIE, 2006, p. 63820B. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/?PSI/6382/63820B/1>
16. J. Horbach, “Verfahren zur optischen 3d-vermessung spiegelnder oberflächen,” Ph.D. dissertation, Universität Karlsruhe, September 2007.