

# Probabilistische Verbesserung der Kalibrierung deflektometrischer Systeme

H. Rapp und C. Stiller

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mess- und Regelungstechnik,  
Engler-Bunte-Ring 21, D-76131 Karlsruhe, E-Mail: holger.rapp@kit.edu

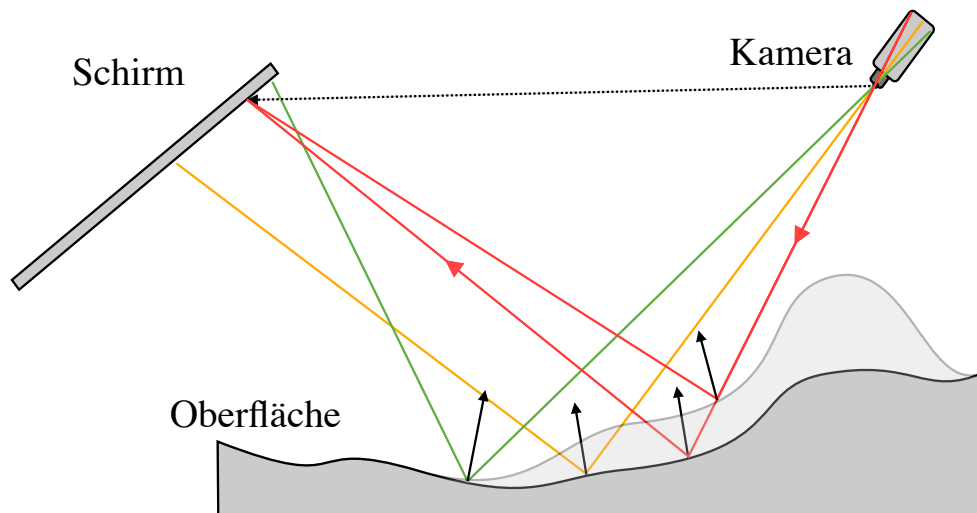
## Kurzfassung

Dieser Aufsatz befasst sich mit dem Problem der Feinkalibrierung eines deflektometrischen Versuchstandes zur drei-dimensionalen Vermessung voll reflektierender Oberflächen. Hierzu wird die Deflektometrie als drei-dimensionales Messverfahren erläutert, es wird dabei besonders auf das Verfahren der Stereodeflektometrie eingegangen. Das Problem der Kalibrierung wird anhand einer Simulation verdeutlicht und ein probabilistischer Ansatz vorgestellt der in der Simulation Fehler in der Kalibrierung erfolgreich herausrechnen kann. Der Aufsatz schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

## 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 so wie Badamaturen können damit geprüft werden.

Das Messprinzip dabei ist simpel und basiert auf der Bestimmung der Neigung der zu untersuchenden Oberfläche. Bild 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 aus der Interferometrie bekannten Phasenschubverfahren oder ähnlicher Kodierungsmechanismen kann eine Zuordnung zwischen beobachtetem Schirmpixel und Kamerapixel hergestellt werden; diese



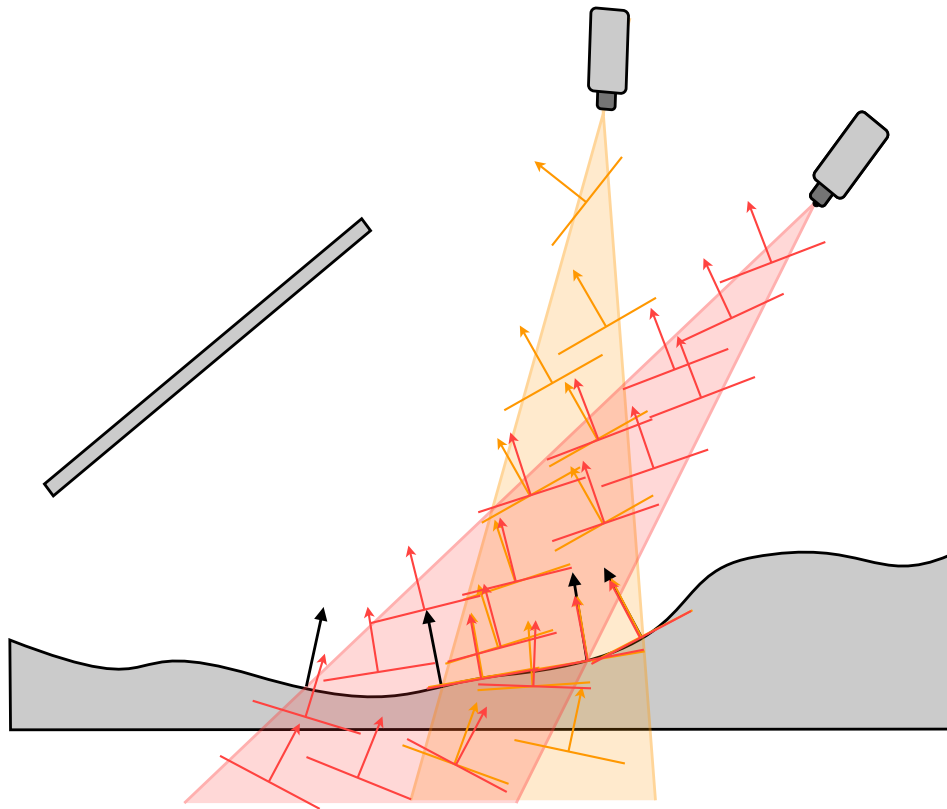
**Bild 1:** Messprinzip und Eindeutigkeitsproblem.

Abbildung wird einfache Abbildungsfunktion  $l$  genannt [1–3].

Die Deflektometrie ist bereits ein Industriestandard für die optische Sichtprüfung hoch reflektiver Teile. Hier interessiert jedoch oft nur die qualitative Aussage über die Oberfläche. Sofern gewisse Randbedingungen beim Design des Messaufbaus berücksichtigt werden kann die einfache Abbildungsfunktion als proportional zur lokalen Neigung der Oberfläche angenommen werden; ihre Ableitung ist demnach proportional zur lokalen Krümmung [2, 4]. Durch eine geschickte Visualisierung sind geometrische Defekte für den Menschen deutlich erkennbar zu machen. Eine quantitative Aussage über Tiefe und Ausprägung der Defekte ist allerdings so nicht möglich.

Der momentane Forschungsschwerpunkt liegt auf der hoch genauen dreidimensionalen Vermessung reflektiver Teile mit deflektometrischen Methoden. Sind Kamera- und Schirmposition relativ zueinander bekannt, ist es möglich aus einer deflektometrischen Messung und Zusatzinformationen oder aus mehreren deflektometrischen Messungen die drei-dimensionale Geometrie des Targets zu errechnen. Hier sind reichhaltig Verfahren wie zum Beispiel Propagationsverfahren [5], Kombinationsansätze, die z.T. zumindest partiell diffus reflektierende Körper benötigen [6–8], und numerische Ausgleichsverfahren mehrerer Messungen [9] untersucht. Eine Übersicht über die Funktionsweise verbreiteter Verfahren gibt [10].

Viele interessante Fragestellungen sind allerdings noch offen: Gibt es optima-

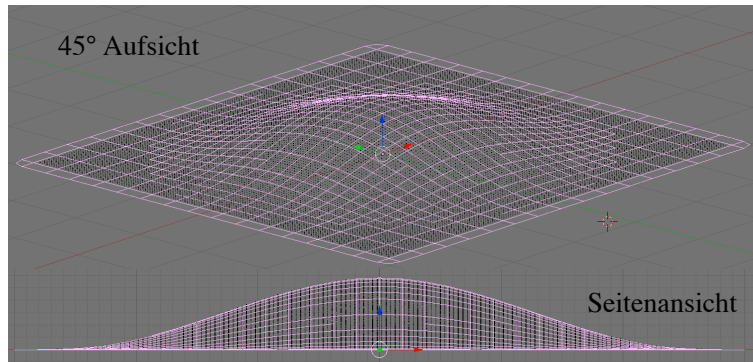


**Bild 2:** Funktionsprinzip der Stereodeflektometrie

le Kamera- und Schirmpositionen? Was ist die minimale Anzahl an Messungen, die nötig sind, um eine bestimmte Form zu vermessen? Was ist die ideale Schirmgeometrie?

Grundvoraussetzung für jegliche quantitative Messung ist jedoch eine genaue Information über Schirm- und Kameraposition. Für deren Kalibrierung sind Verfahren Stand der Technik, die eine bekannte Targetgeometrie nutzen, zum Beispiel einen flachen Spiegel [11]. Diese Kalibrierung muss jedoch für jedes Schirm- und Kamerapositions-Paar neu durchgeführt werden. Eine Autokalibrierung des Messaufbaus ist daher wünschenswert. Der hier vorgestellte Ansatz konzentriert sich hierbei auf eine Verbesserung einer groben Vorkalibrierung, die bereits als gegeben vorausgesetzt wird.

Im nächsten Abschnitt wird vorerst von perfekten Messungen ausgegangen und das zum Einsatz kommende Rekonstruktionsverfahren erläutert.



**Bild 3:** Orthografische Ansicht des Simulationstargets. Die Maße sind  $6 \times 6 \times 0,6$  Einheiten.

## 2 Stereodeflektometrie

Gegeben sind nun zwei perfekt kalibrierte deflektometrische Messungen eines Objektes mit zwei verschiedenen relativen Kamera- und Schirmpositionen, aber überschneidenden Messvolumina. Eine drei-dimensionale Rekonstruktion kann nun mit Hilfe der Stereodeflektometrie erfolgen [12]. Dieses Verfahren ist in Bild 2 visualisiert.

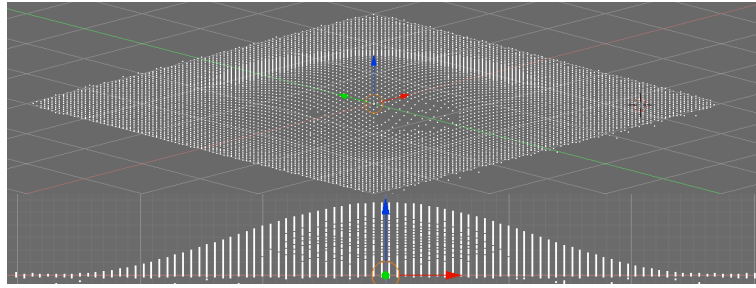
Die beiden Messungen werden als induzierte potentielle Normalenfelder über dem jeweiligen Messvolumen  $M_i$  mit  $i \in 1, 2$  aufgefasst. D. h. jede Messung definiert für jeden Raumpunkt  $x, y, z$  im eigenen Messvolumen  $M_i$  einen potentiellen Normalenvektor, also die Normale die die Oberfläche hätte, würde sie in diesem Punkt liegen. Im gemeinsamen Messvolumen  $M = M_1 \cap M_2$  erhält man gegensätzliche Aussagen in jedem Punkt, außer der Punkt liegt tatsächlich auf der gesuchten Oberfläche.

Um also die Oberfläche zu finden bietet es sich an, ein Ähnlichkeitsmaß  $S$  zwischen den beiden Normalen zu definieren und dieses auf einem kartesischen Grid entlang einer Raumachse zu minimieren. Ein einfacher Vorschlag ist

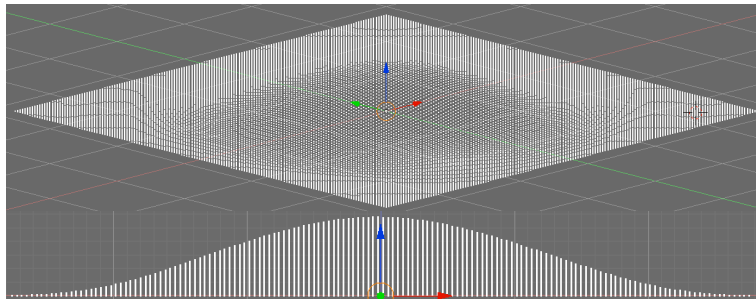
$$S(n_1(x, y, z), n_2(x, y, z)) = 1 - |n_1(x, y, z) \cdot n_2(x, y, z)|. \quad (1)$$

Hierdurch erhält man eine Approximation der Raumpunkte der Oberfläche und deren Normalenvektoren. Durch eine Hermite Interpolation, beispielsweise mit radialen Basisfunktionen [13] oder auch durch Lösen der zugehörigen Poisson Gleichung erhält man eine Repräsentation der Oberfläche.

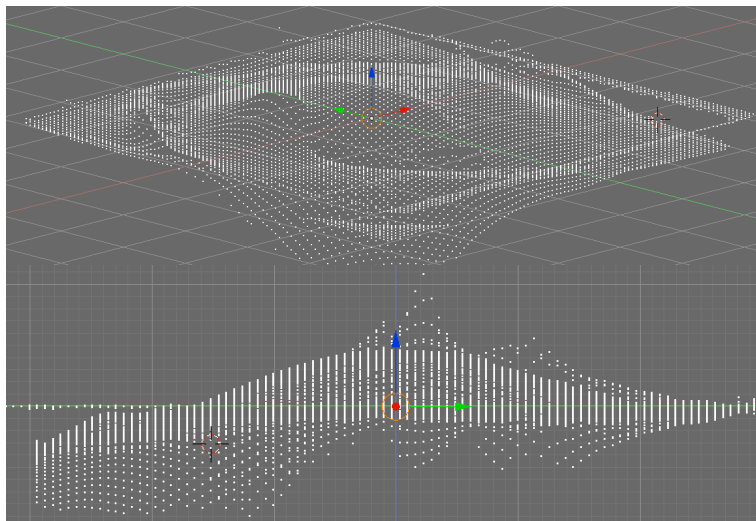
Zwischenergebnisse aus einer simulierten Rekonstruktion sind in Abbildungen 3 - 5 zu sehen. In Bild 6 ist die selbe Rekonstruktion gezeigt, hierbei ist al-



**Bild 4:** Punkte mit minimalen Normalenunterschied  $S$  auf einem Grid. Minimiert wurde entlang der  $z$ -Achse.



**Bild 5:** Endergebnis der Rekonstruktion. Die Normalen der Punkte aus Abbildung 4 wurden mit Hilfe von radialen Basisfunktionen interpoliert.



**Bild 6:** Wie Bild 4. Hier ist bei der Kalibrierung einer der beiden Kameras ein Fehler von  $2^\circ$  simuliert worden.

lerdings bei der Kalibrierung einer Kamera ein Fehler von  $2^\circ$  simuliert worden. Dies zeigt eindrucksvoll wie stark ein kleiner Fehler in der Kalibrierung das Endergebnis verfälscht. Diese hohe Sensitivität der Deflektometrie kann man sich zu nutze machen um eine Verbesserung der Kalibrierung zu erreichen.

### 3 Verbesserung der Kalibrierung

Unsere Problemstellung kann also folgendermaßen formuliert werden: Gegeben ist eine Anzahl  $m \geq 3$  von deflektometrischen Messungen, die als potentielle Normalenfelder in einem jeweiligen Messvolumen  $M_i$  aufgefasst werden. Alle Messungen sind dabei bezogen auf des selben raumfeste kartesische Koordinatensystem. Die Menge aller Messungen definieren wir als

$$N = \{n_1(x, y, z), n_2(x, y, z) \dots n_m(x, y, z)\} \quad (2)$$

Außerdem sind die dazugehörigen Kamera- und Schirmpositionen und deren jeweiligen Sichtvektoren bis zu einer gewissen Genauigkeit bekannt. Modelliert werden sie als Normalverteilung mit Mittelwerten  $x_{1\dots m}^C$ ,  $x_{1\dots m}^S$ ,  $t_{1\dots m}^C$  und  $t_{1\dots m}^S$  und Varianzen  $\sigma_{x_{1\dots m}^C}^2$ ,  $\sigma_{x_{1\dots m}^S}^2$ ,  $\sigma_{t_{1\dots m}^C}^2$  und  $\sigma_{t_{1\dots m}^S}^2$ . Die Oberfläche wird als Normalverteilung über das Höhenprofil auf einem kartesischen Grid modelliert

$$z(x, y) = \mathcal{N}(\mu_z(x, y), \sigma_z^2(x, y)) \quad (3)$$

Der Algorithmus arbeitet nun in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden mit den momentanen Parametern durch paarweises Vergleichen der Normalenfeldern - wie in Abschnitt 2 beschrieben - aktuelle Vorschläge für die Oberfläche gefunden. Dies entspricht einem Samplen aus der Population der gesamten möglichen Oberflächen, wobei die Parameter als Beobachtungen gesehen werden. Mit der empirischen Varianz und dem Mittelwert dieser Sampels wird die Verteilungsdichte für  $z$  upgedated.

Nun wird zufällig ein Schirm oder eine Kamera einer Messung ausgewählt und dort dann auch zufällig die Position oder der Sichtvektor ausgesucht. Von dem ausgewählten Wert werden Mittelwert und  $2\text{-}\sigma$ -Punkte gesampelt und der erste Schritt mit diesen neuen Werten wiederholt. Derjenige Punkt, der die kleinste

Summe über die Varianzen der Oberfläche

$$E = \sum_{x,y \in \bigcup_{i=1}^m M_i} \sigma_z^2(x,y) \quad (4)$$

ergibt wird als neuer Mittelwert festgelegt.

Diese zwei Schritte werden so lange wiederholt bis  $E$  eine festgelegte Schranke unterschreitet.

In der obigen Simulation bringt der Algorithmus gute Ergebnisse: bei  $m = 3$  und einem Kalibrationsfehler von maximalen 1 cm in der Position bzw.  $3^\circ$  im Winkel ergibt sich mit diesem Verfahren die korrekte Geometrie nach Minimierung von  $E$ . Die gewählten Kalibrationsfehler sind deutlich konservativer als jene, die von modernen Handhabungsgeräten erreicht werden können. Experimentelle Ergebnisse stehen allerdings noch aus.

## 4 Weiterführende Arbeiten

Die Simulationsergebnisse lassen hoffen, dass dieser Ansatz in der Praxis funktionieren kann. Dadurch wird es möglich, schnell eine Vielzahl von deflektometrischen Messungen mit verschiedenen Kamera- und Schirmpositionen aufzunehmen und so auch komplexe Geometrien deflektometrisch zu vermessen. Ein entsprechender Versuchsaufbau ist vorhanden und praktische Experimente sind als nächster Schritt geplant.

Der momentan eingesetzte Algorithmus zur Optimierung der Schirm und Kamerapositionen ist  $O(m!)$  mit der Anzahl an deflektometrischen Messungen  $m$ . Eine Reduktion der Komplexitätsklasse scheint möglich indem man die Anzahl an Samples für  $z$  in Schritt eins reduziert und eine höhere empirische Varianz akzeptiert. Ein RANSAC Sampling bietet sich hier an. Eine reduzierte Komplexität erlaubt mehr Messungen in die Optimierung mit aufzunehmen, was geringere Fehler im Endergebnis zu erwarten lässt. Ob hier tatsächlich Verbesserungen zu erreichen sind soll noch untersucht werden.

## 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.
- [3] M. Petz und R. Tutsch, “Rasterreflexions-photogrammetrie zur messung spiegelnder oberflächen”, *TM - Technisches Messen* (71), S. 389–397, 2004.
- [4] S. Kammel und F. P. Leon, “Deflectometric measurement of specular surfaces”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **57**, S. 763–769, Apr. 2008.
- [5] S. Kammel und J. Horbach, “Topography reconstruction of specular surfaces”, in *Videometrics VIII*, J.-A. Beraldin, S. F. El-Hakim, A. Gruen und J. S. Walton (Hrsg.), **5665**(1), S. 59–66, SPIE, 2005.
- [6] J. Balzer, S. Werling und J. Beyerer, “Deflektometrische Rekonstruktion teilspiegelnder Freiformflächen (Deflectometric Reconstruction of Partially Specular Free-Form Surfaces)”, *tm-Technisches Messen* **74**(11), S. 545–552, 2007.
- [7] K. Donner, “Stereo reconstruction of reflecting surfaces”, *Pattern Recognition and Image Analysis* **14**(2), S. 168–172, 2004.
- [8] R. Kickingereder, *Optische Vermessung partiell reflektierender Oberflächen*. PhD thesis, Universität Passau, November 2006.
- [9] J. Balzer, S. Werling und J. Beyerer, “Regularization of the deflectometry problem using shading data”, *Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology IV* **6382**(1), S. 63820B, SPIE, 2006.
- [10] H. Rapp und C. Stiller, “Deflektometrische Methoden zur Sichtprüfung und 3D-Vermessung voll reflektierender Freiformflächen”, in *Forum Bildverarbeitung 2010, Regensburg*, S. 217, KIT Scientific Publishing, 2010.
- [11] S. Hofer, S. Werling und J. Beyerer, “Neuartige Strategie zur vollständigen Kalibrierung eines Sensorsystems zur automatischen Sichtprüfung spiegelnder Oberflächen”, in *Forum Bildverarbeitung 2010, Regensburg*, S. 25, KIT Scientific Publishing, 2010.
- [12] M. C. Knauer, *Absolute Phasenmessende Deflektometrie*. PhD thesis, Universität Erlangen-Nürnberg, Mai 2006.
- [13] S. Ettl, J. Kaminski und G. Häusler, “Generalized hermite interpolation with



radial basis functions considering only gradient data”, in *Curve and Surface Fitting: Avignon 2006*, S. 141–149, Nashboro Press, 2007.