

David Uhlig\* und Michael Heizmann

# Lichtfeld-Tiefenschätzung für die Vermessung teilspiegelnder Oberflächen

Light field depth estimation for the measurement of partially specular surfaces

DOI 10.1515/teme-2020-0022

**Zusammenfassung:** Die Deflektometrie analysiert Messproben durch indirekte Beobachtung einer bekannten Referenzszenen als Reflexion in der Oberfläche. Sie benötigt jedoch Zusatzwissen, z.B. über mindestens einen Oberflächenpunkt, um sehr präzise Oberflächengradienten zu messen. Lichtfeldkameras als optische 3D-Messgeräte erlauben es bei teilspiegelnden Oberflächen, die Entfernung sowohl zur Oberfläche als auch zur Referenzszenen zu messen. In diesem Beitrag wird ein Ansatz präsentiert, bei dem diese doppelte Tiefenschätzung effektiv mit der Deflektometrie kombiniert wird. Durch Formulieren der Oberflächenrekonstruktion als Variationsproblem wird die Tiefenschätzung mit den deflektometrischen Gradienten fusioniert. Experimente bestätigen die Methode und zeigen, dass hohe Rekonstruktionsgenauigkeiten erreicht werden.

**Schlüsselwörter:** Lichtfeldkamera, Tiefenschätzung, Deflektometrie.

**Abstract:** Deflectometry analyses surfaces by indirect observation of a known reference scene via the reflection in the surface itself. But, it requires additional knowledge, e.g. about one surface point, in order to measure surface gradients very precisely. Light field cameras as optical 3D measuring devices allow to measure the distance to the surface as well as to the reference scene when observing partially reflecting surfaces. In this paper an approach is presented that effectively combines this dual-depth estimation with deflectometry. By formulating the surface reconstruction as a variation problem, the depth is fused with the deflectometric gradients. Experiments validate the method and show that high accuracy in the reconstruction is achieved.

---

\*Korrespondenzautor: David Uhlig, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industrielle Informationstechnik (IIIT), Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe, E-Mail: david.uhlig@kit.edu  
Michael Heizmann, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industrielle Informationstechnik (IIIT), Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe, E-Mail: michael.heizmann@kit.edu

**Keywords:** Light field camera, depth estimation, deflectometry.

## 1 Einleitung

Die Sichtprüfung spiegelnder Oberflächen gehört in der Messtechnik immer noch zu den größeren Herausforderungen. Für die Analyse solcher Oberflächen haben sich die deflektometrischen Messverfahren durchgesetzt. Sie ermöglichen es, hochpräzise Neigungsinformationen der Messprobe zu erhalten, indem sie die durch die spiegelnde Oberfläche verzerrten Bilder einer Referenzszenen auswerten. Da die spiegelnde Oberfläche für den Beobachter quasi unsichtbar ist, kann die absolute Höhe mit einer herkömmlichen Kamera ohne Zusatzwissen nicht rekonstruiert werden und stattdessen erhält man eine unendliche Anzahl möglicher Oberflächen [2]. Diese Mehrdeutigkeit kann jedoch durch spezielle Messaufbauten aufgelöst werden. Mehrfachmessungen und Verschieben eines Referenzmonitors, präzise konfokale Vermessung eines einzelnen Oberflächenpunktes, telezentrische Optiken oder auch Stereo-Kamera-Ansätze können das Problem weitgehend beheben [7], benötigen jedoch aufwändige und teure Hardware, einen großen Bau- raum oder zusätzlich eine sehr zuverlässige Kalibrierung.

In diesem Beitrag wird eine Lichtfeldkamera als Aufnahme- gerät benutzt, da sie durch ihre sehr kompakte Bau- weise leicht in einen Standard-Deflektometrieaufbau inte- griert werden kann. Gleichzeitig kann sie als 3D-Kamera genutzt werden, um eine effiziente Tiefenschätzung zu er- möglichen. Dabei erlauben es die speziellen Eigenschaften der Lichtfeldkamera, bei der Vermessung von teilspiegelnden Oberflächen sowohl Tiefenmerkmale auf der direkten Oberfläche zu finden als auch die Tiefe der reflektierten Szenen zu bestimmen. Diese unabhängigen Messungen kön- nen als zusätzliche Informationsquelle regularisierend für die Deflektometrie genutzt werden. Da deflektometrische Messungen hochpräzise Neigungsinformationen in Form von Oberflächennormalen liefern, wird in diesem Beitrag die Oberflächenrekonstruktion als Energie-Optimierung formuliert. Minimieren des Funktionals durch einen Va-

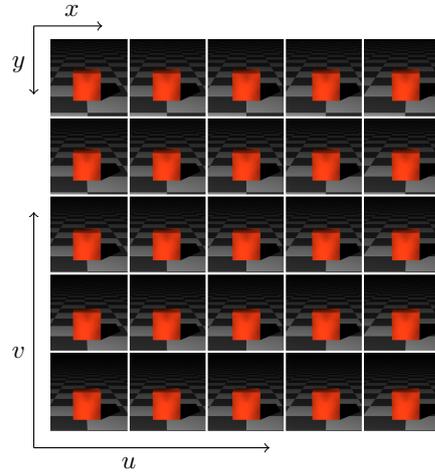
riationsansatz und mittels des Primal-Dual-Formalismus fusioniert die Tiefenmessungen mit den Oberflächennormalen und erhöht die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion.

## 2 Lichtfeld-Tiefenschätzung

In der geometrischen Optik kann die Strahldichte einer Szene durch das 4D-Lichtfeld  $L(u, v, x, y)$  mit zwei örtlichen Dimensionen  $x, y$  und zwei angulären Dimensionen  $u, v$  beschrieben werden. Lichtfeldkameras besitzen einen ähnlichen Aufbau wie Standard-Kameras mit dem entscheidenden Unterschied, dass vor dem Sensor ein Array von Mikrolinsen platziert ist [3]. Mit dieser Bauweise wird es möglich, das Lichtfeld der beobachteten Szene aufzunehmen. Hierbei sind  $x, y$  vergleichbar zu den Pixelkoordinaten der Standard-Kamera und  $u, v$  entsprechen dem Durchstoßpunkt des Lichtstrahls durch die Hauptlinse. Jede  $u, v$ -Koordinate repräsentiert daher eine virtuelle Subkamera, welche nur einen Teil der Hauptlinse beobachtet, weshalb eine Lichtfeldkamera auch als Multi-Kamera-Array interpretiert werden kann, siehe Abb. 1a. Die im Vergleich zur Standard-Kamera zusätzliche Information erlaubt es, nach der Aufnahme die Perspektive auf die Szene zu ändern, wodurch Tiefeninformation extrahiert werden kann, oder den Fokus im Nachhinein neu zu setzen.

Die Tiefe der Szene, bzw. die Entfernung eines beobachteten Objektpunktes, lässt sich im Lichtfeld über die Analyse der Epipolarebenen (engl.: epipolar plane image, EPI) bestimmen. Diese EPIs sind 2D-Schnitte durch das Lichtfeld, bei denen jeweils eine anguläre und eine örtliche Koordinate festgehalten werden. Abb. 1b zeigt ein Beispiel. Es sind Linien unterschiedlicher Steigungen zu erkennen, wobei die Orientierung der Linien die Tiefe des Objektpunktes repräsentiert [11]. Die Tiefenschätzung reduziert sich daher zu einer einfachen lokalen Orientierungsschätzung in den EPIs. Im Gegensatz zu einem Stereo-Kamera-Aufbau muss dabei kein Feature Matching durchgeführt werden. Bekannte Ansätze zur Lichtfeld-Tiefenschätzung nutzen zur Orientierungsschätzung bspw. den Strukturtensor, *Hough*-Transformation, oder auch neuronale Faltungsnetze [9, 11].

Untersucht man Lichtfelder, die teilspiegelnde oder transparente Objekte zeigen, so tritt ein besonderer Effekt auf. Das resultierende Lichtfeld lässt sich als Addition zweier Teillichtfelder  $L = L_{\text{diffus}} + L_{\text{reflektiert}}$  interpretieren [14]. Für klassische Stereo-Kamera-Systeme ist diese Addition meist störend und resultiert in fehlerhaften Tiefenschätzungen. Für Lichtfelder jedoch zeigt eine Analyse der EPIs nun auch eine Überlagerung der Orientierungen,



(a) Das Lichtfeld ist interpretierbar als Multi-Kamera-Array.



(b) Ein horizontales EPI  $L_{v^*, y^*}(u, x)$  entsteht als 2D-Schnitt durch das Lichtfeld bei festhalten einer  $y$ - und  $v$ -Koordinate.



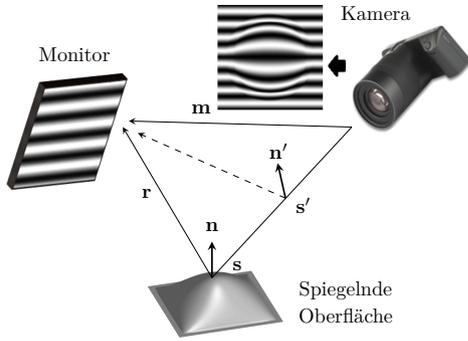
(c) Die Szene aus Abb. 1b reflektiert an einer teilspiegelnden Oberfläche erzeugt überlagerte Lichtfelder. Es zeigen sich zwei Orientierungen/Tiefen.

**Abb. 1:** Im Lichtfeld einer Szene ist Tiefeninformation enthalten.

siehe Abb. 1c. Eine gleichzeitige Schätzung beider Orientierungen liefert damit sowohl eine Tiefenschätzung des teilspiegelnden Objekts als auch der reflektierten Szene. Methoden zum Schätzen der Tiefen nutzen z.B. Struktur-tensoren höherer Ordnung oder optischen Fluss [12, 14].

## 3 Deflektometrie

Während die Lichtfeld-Tiefenschätzung für strukturierte Oberflächen gute Ergebnisse liefern kann, versagt sie an unstrukturierten Szenen, da sich jetzt keine Information mehr aus den EPIs extrahieren lässt. Noch aufwändiger wird die direkte Tiefenschätzung spiegelnd reflektierender Objekte, denn jetzt sieht die Kamera nicht die Oberfläche selbst, sondern das verzerrte Spiegelbild der Umgebung. Die spiegelnde Oberfläche ist quasi unsichtbar. Um die Struktur von Spiegeln vermessen zu können, bieten sich Verfahren mit aktiver Beleuchtung wie die Deflektometrie an. Sie erlaubt es, hochpräzise Neigungsinformationen der Oberfläche zu erhalten, welche zur 3D-Rekonstruktion oder Fehlererkennung genutzt werden können.



**Abb. 2:** Messprinzip der Deflektometrie. Für jeden Punkt  $s'$  kann eine hypothetische Normale  $n'$  berechnet werden.

In der Deflektometrie wird die Oberfläche eines spiegelnden Objekts rekonstruiert, indem eine Kamera einen aktiven Mustergenerator (z.B. einen Monitor) indirekt als Reflexion in der Messprobe beobachtet. Das Messprinzip ist in Abb. 2 dargestellt. Folgt man der Ausbreitung des Lichts von der Kamera zurück zur Quelle, dann trifft hierbei ein Kamerasichtstrahl  $\hat{s} = \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}$  auf die Spiegeloberfläche, wird im Punkt  $s$  reflektiert und beobachtet die Monitorebene im Punkt  $\mathbf{m}$ .

Die Zuordnung von Kamerasichtstrahlen  $\hat{s}$  zu Monitorpunkten  $\mathbf{m}$  kann dabei mithilfe einer zeitlichen Codierung der Monitorpixel gefunden werden. Hier bieten sich Phasenschieber-Mustersequenzen an, da sie eine subpixelgenaue Codierung in der Monitorebene erlauben, sie sogar bei Defokussierung gute Ergebnisse liefern und sie das Messrauschen durch Verlängerung der Mustersequenz kontrolliert auf die gewünschte Größe reduzieren können [6, 15]. Eine geometrische Kalibrierung der Kamera und des Kamera-Monitor-Systems [3, 13] erlaubt es anschließend, den Vektor  $\mathbf{m}$  zu bestimmen, womit die Normale der Spiegeloberfläche berechnet werden kann:  $\mathbf{n}_{\text{mess}}(\mathbf{s}) = \frac{\mathbf{m} - \mathbf{s}}{\|\mathbf{m} - \mathbf{s}\|} - \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}$ . Die Integration des Normalenfeldes liefert schlussendlich die gesuchte Oberfläche. Die Unkenntnis des Punktes  $\mathbf{s}$  führt jedoch zu mehrdeutigen Normalen  $\mathbf{n}(\mathbf{s})$  und damit entlang jeden Sichtstrahls zu einer einparametrischen Lösungsmenge für die Oberfläche.

Um die Mehrdeutigkeit der deflektometrischen Messung aufzulösen, wird regularisierendes Zusatzwissen benötigt. Es reicht prinzipiell aus, nur einen Punkt der Oberfläche zu messen und ausgehend von diesem Punkt die Oberfläche aus dem Normalenfeld zu rekonstruieren [2]. Liegen jedoch mehr Messwerte vor, kann dies helfen, den Einfluss einer unsicheren und verrauschten Messung eines einzelnen Oberflächenpunktes zu reduzieren.

Die Tiefenschätzung der Lichtfeldkamera erlaubt es, Kandidaten für mögliche Oberflächenpunkte zu finden, und sie macht es damit möglich, die Mehrdeutigkeit der

deflektometrischen Normalenschätzung aufzulösen. Hier ergeben sich zwei Situationen. Zunächst, wenn die Oberfläche der Messprobe diffuse Bereiche hat, kann eine Standard-Lichtfeldkamera-Tiefenschätzung benutzt werden, um direkt die Entfernung zwischen Kamera und Oberfläche für jedes Pixel bzw. für jeden Sichtstrahl zu messen. Die Menge der Tiefenwerte  $d_{\text{direkt}}$  schätzt dabei  $\|\mathbf{s}\|$  und kann anschließend direkt genutzt werden, um die deflektometrische Normalenschätzung zu regularisieren. Wenn die Messprobe jedoch voll spiegelnd ist, kann die Lichtfeldkamera nicht direkt die Entfernung zur Oberfläche bestimmen. Für ebene Spiegel wird sie stattdessen die Entfernung  $\|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{r}\|$  der reflektierten Referenzszenen als Tiefe  $d_{\text{ref}}$  schätzen. Dennoch kann mithilfe des Wissens über den deflektometrischen Messaufbau und mit der Registrierung von Kamerasichtstrahlen zu Monitorpixeln aus der indirekten Lichtfeld-Tiefenmessung die direkte Entfernung zur Oberfläche berechnet werden. Mit den Messungen  $\mathbf{m} = \mathbf{s} + \mathbf{r}$  und  $d_{\text{ref}} \triangleq \|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{r}\|$  folgt:

$$\|\mathbf{m} - \mathbf{s}\|^2 = \|\mathbf{s}\|^2 + \|\mathbf{m}\|^2 - 2\mathbf{m}^T \mathbf{s}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \|\mathbf{m} - \mathbf{s}\|^2 &= \|\mathbf{r}\|^2 = (d_{\text{ref}} - \|\mathbf{s}\|)^2 \\ &= d_{\text{ref}}^2 - 2d_{\text{ref}} \|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{s}\|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Durch Gleichsetzen von (1) und (2) und mit  $\hat{s} = \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}$  ergibt sich eine Schätzung für die Distanz  $\|\mathbf{s}\|$  zur Oberfläche:

$$d_{\text{indirekt}} = \frac{1}{2} \frac{\|\mathbf{m}\|^2 - d_{\text{ref}}^2}{\mathbf{m}^T \hat{\mathbf{s}} - d_{\text{ref}}}. \quad (3)$$

Durch die im Abschnitt 2 beschriebenen besonderen Eigenschaften der Lichtfeldkamera wird es hierbei möglich, im Gegensatz zu einem Stereokamera-Aufbau selbst bei teilspiegelnden Oberflächen sowohl die Entfernung zur Oberfläche als auch die Entfernung der Reflexion gleichzeitig sehr robust zu schätzen. Zusätzlich stehen neben der reinen Lichtfeld-Tiefenschätzung auch noch andere Möglichkeiten zur Verfügung, um auf Oberflächenpunkte zu schließen. Es kann z.B. die Lichtfeldkamera als Kamera-Array interpretiert werden, womit ein Multi-Stereo-Deflektometrie-Ansatz realisiert werden kann, bei dem die Tiefe  $d_{\text{multi}}$  erhalten wird [10]. Somit stehen für eine deflektometrische Messung drei unabhängige Messungen der Spiegeloberfläche zur Verfügung, welche gemeinsam zur Regularisierung der deflektometrischen Normalenschätzung genutzt werden können.

## 4 Rekonstruktion der Oberfläche

Prinzipiell können die Tiefenmessungen aus Abschnitt 3 direkt genutzt werden, um die Oberfläche beispielsweise

durch eine Mittelwertbildung zu rekonstruieren. Da jedoch Multi-Stereo-Messsysteme wie die Lichtfeldkamera in ihrer Messgüte durch die effektive Stereo-Basisweite begrenzt sind, erreicht man mit dieser Tiefenschätzung nicht die gewünschte Genauigkeit. Dem gegenüber misst die Deflektometrie Neigungen bzw. Oberflächennormalen in einer um Größenordnungen höheren Präzision, benötigt aber Oberflächenpunkte zur Regularisierung [2]. Es ist daher sinnvoll, sich nicht nur auf die Tiefenschätzung zu verlassen. Stattdessen können die dichten deflektometrischen Messungen der Oberflächennormalen mit den verschiedenen Tiefenschätzungen, die möglicherweise auch nur spärlich vorliegen, fusioniert werden. Das Problem lässt sich durch eine Energie-Minimierung modellieren:

$$\arg \min_{\mathbf{s}, \mathbf{n}} \int_S \|\mathbf{n} - \mathbf{n}_{\text{mess}}(\mathbf{s})\|^2 + \sum_i w_i \|\mathbf{s} - \mathbf{s}(d_i)\|^2 dS. \quad (4)$$

Die gesuchte Oberfläche soll minimalen Abstand zu den Regularisierungspunkten  $d_i$  besitzen und gleichzeitig soll der Unterschied von berechneten zu deflektometrisch gemessenen Normalen  $\mathbf{n}_{\text{mess}}$  minimiert werden. Dies löst die Mehrdeutigkeit der Deflektometrie auf und resultiert in einem robusteren Gesamtergebnis für die 3D-Rekonstruktion.

Da die Tiefen- und Neigungsinformationen pixelweise auf einem diskreten Gitter angeordnet sind, macht es Sinn, das Problem als diskrete Gradientenintegration zu formulieren und die gemessenen Oberflächenpunkte auf eine Tiefenkarte  $z(x, y)$  zu projizieren. Aufgrund der in der Lichtfeldkamera auftretenden perspektivischen Projektion muss hierzu eine Variablensubstitution durchgeführt werden, damit der Oberflächengradient aus den gemessenen Oberflächennormalen bestimmt werden kann [8]:

$$\tilde{z} := \log z, \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_n := \nabla \tilde{z}(x, y) = -\frac{1}{xn_1 + yn_2 + fn_3} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

wobei  $\mathbf{n}_{\text{mess}} = (n_1, n_2, n_3)^T$ ,  $f$  die Fokusslänge der Kamera bezeichnet und wir den Akzent  $\tilde{\phantom{x}}$  für den Rest des Abschnitts vernachlässigen. Da (4) ein schlecht gestelltes Problem ist, würde eine Minimierung kein sinnvolles Fusionsergebnis liefern. Es müssen zusätzliche regularisierende Annahmen zur Oberfläche getroffen werden. In vielen Bereichen der Bildverarbeitung wird die *Totale Variation* als beliebte Regularisierungsmethode genutzt, da sie Unstetigkeiten in den Daten abbilden kann und gleichzeitig verrauschte Messungen glättet [5]. Sie hat jedoch den Nachteil, dass schräge Ebenen eine ungewollte, treppenförmige Struktur ausbilden können. Im Gegensatz dazu vermeidet die *Totale Generalisierte Variation* (TGV) diesen Effekt, indem sie Lösungen höherer Ordnung zulässt [4]. Der TGV-Term minimiert den Abstand

zwischen dem Oberflächengradienten und einem Gradienten  $\mathbf{g}$ . Zusätzlich kann  $\mathbf{g}$  durch einen Datenterm in die Nähe des deflektometrisch gemessenen Gradienten  $\mathbf{g}_n$  gedrängt werden [1]. Gleichzeitig wird eine Abweichung der Oberfläche von den gemessenen Tiefen  $z_i$  bestraft. Das diskrete Optimierungsproblem ergibt sich zu:

$$\min_{z, \mathbf{g}} \sum_i w_i \|z - z_i\|_2^2 + w_n \|\mathbf{g} - \mathbf{g}_n\|_2^2 + \text{TGV}_\alpha^2(z, \mathbf{g}), \quad (7)$$

mit  $\text{TGV}_\alpha^2(z, \mathbf{g}) = \alpha_1 \|\nabla z - \mathbf{g}\|_1 + \alpha_0 \|\mathcal{E}\mathbf{g}\|_1$ , dem Gradienten  $\nabla$  und einem symmetrisierten Operator  $\mathcal{E} = \frac{1}{2}(\nabla + \nabla^T)$ , welche in Kombination Ableitungen 2. Ordnung repräsentieren [4], Gewichtungsfaktoren  $w_i, w_n, \alpha_0, \alpha_1$  und Tiefenmessungen  $z_i \in \{z_{\text{direkt}}, z_{\text{indirekt}}, z_{\text{multi}}\}$ . Problem (7) ist konvex, aber unstetig, weshalb wir es als äquivalentes konvex-konkaves Sattelpunktproblem formulieren und mithilfe eines Primal-Dual-Algorithmus optimieren [5]:

$$\min_{z, \mathbf{g}} \max_{\mathbf{p}, \mathbf{q}} \langle \nabla z - \mathbf{g}, \mathbf{p} \rangle + \langle \mathcal{E}\mathbf{g}, \mathbf{q} \rangle + H_1(z) + H_2(\mathbf{g}) - \delta_P(\mathbf{p}) - \delta_Q(\mathbf{q}), \quad (8)$$

mit  $H_1(z) = \sum_i w_i \|z - z_i\|_2^2$ ,  $H_2(\mathbf{g}) = w_n \|\mathbf{g} - \mathbf{g}_n\|_2^2$  und

$$\delta_P(\mathbf{p}) = \begin{cases} 0, & \|\mathbf{p}\|_\infty \leq \alpha_0 \\ \infty, & \|\mathbf{p}\|_\infty > \alpha_0 \end{cases}, \quad \delta_Q(\mathbf{q}) = \begin{cases} 0, & \|\mathbf{q}\|_\infty \leq \alpha_1 \\ \infty, & \|\mathbf{q}\|_\infty > \alpha_1 \end{cases}.$$

Mithilfe der zu  $\nabla, \mathcal{E}$  adjungierten Divergenzoperatoren  $\text{div}_\nabla, \text{div}_\mathcal{E}$  kann das Problem durch iterativen Gradientenabstieg in den Primal-Variablen  $z, \mathbf{g}$  und Gradientenaufstieg in den Dual-Variablen  $\mathbf{p}, \mathbf{q}$  gelöst werden [4, 5]:

---

Primal-Dual-Optimierung:

---

**Initialisierung:**  $z^1 = \bar{z}^1 = \frac{1}{N} \sum_i z_i$ ,  $\mathbf{g}_n = \mathbf{g}(z^1)$ ,  
 $\mathbf{g}^1 = \bar{\mathbf{g}}^1 = \mathbf{g}_n$ ,  $\mathbf{p}^1 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{q}^1 = \mathcal{E}\mathbf{g}_n$

- 1: **for**  $k = 1, 2, 3, \dots, k_{\text{max}}$  **do**
  - 2: Gradientenaufstieg in den Dual-Variablen
  - 3:  $\mathbf{p}^{k+1} = \text{prox}_{\delta_P}(\mathbf{p}^k + \sigma_p(\nabla \bar{z}^k - \bar{\mathbf{g}}^k))$
  - 4:  $\mathbf{q}^{k+1} = \text{prox}_{\delta_Q}(\mathbf{q}^k + \sigma_q \mathcal{E} \bar{\mathbf{g}}^k)$
  - 5: Aktualisiere gemessenen Gradienten mit Glg. (6)
  - 6:  $\mathbf{g}_n = \mathbf{g}(z^k)$
  - 7: Gradientenabstieg in den Primal-Variablen
  - 8:  $z^{k+1} = \text{prox}_{H_1}(z^k - \sigma_z \text{div}_\nabla \mathbf{p}^{k+1})$
  - 9:  $\mathbf{g}^{k+1} = \text{prox}_{H_2}(\mathbf{g}^k - \sigma_g(\text{div}_\mathcal{E} \mathbf{q}^{k+1} - \mathbf{p}^{k+1}))$
  - 10: Extrapolation
  - 11:  $\bar{z}^{k+1} = 2z^{k+1} - z^k$
  - 12:  $\bar{\mathbf{g}}^{k+1} = 2\mathbf{g}^{k+1} - \mathbf{g}^k$
  - 13: **end for**
- 

Die Proximal-Operatoren lassen sich durch Lösen des separaten Problems  $\text{prox}_F(\tilde{\mathbf{x}}) := \arg_{\mathbf{x}} \min \frac{\|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\|^2}{2} + F(\mathbf{x})$

auch in geschlossener Form angeben [5]:

$$\text{prox}_{\delta_P}(\tilde{\mathbf{p}}) = \frac{\tilde{\mathbf{p}}}{\max\left(1, \frac{|\tilde{\mathbf{p}}|}{\alpha_1}\right)}, \text{prox}_{H_1}(\tilde{z}) = \frac{\tilde{z} + 2\sigma_z \sum_i w_i z_i}{1 + 2\sigma_z \sum_i w_i},$$

$$\text{prox}_{\delta_Q}(\tilde{\mathbf{q}}) = \frac{\tilde{\mathbf{q}}}{\max\left(1, \frac{|\tilde{\mathbf{q}}|}{\alpha_0}\right)}, \text{prox}_{H_2}(\tilde{\mathbf{g}}) = \frac{\tilde{\mathbf{g}} + 2\sigma_z w_n \mathbf{g}_n}{1 + 2\sigma_z w_n}.$$

Da die deflektometrisch gemessenen Normalen von der Entfernung zur Oberfläche abhängen, wird in jeder Iteration das gemessene Gradientenfeld  $\mathbf{g}_n$  aktualisiert. Nachdem ein Minimum für Glg. (7) gefunden wurde, kann die wahre Oberfläche durch Rücksubstitution aus Glg. (5) zu  $z = \exp(\tilde{z})$  bestimmt werden.

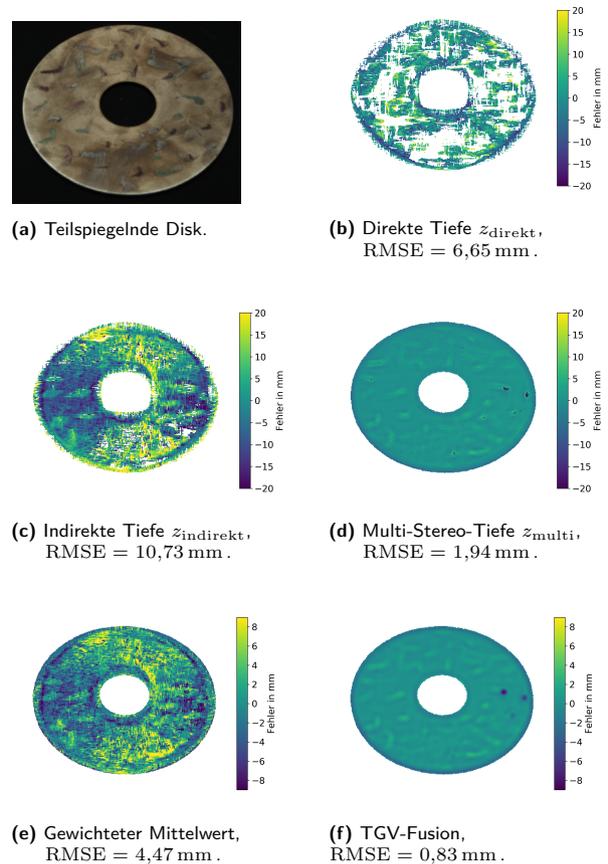
## 5 Ergebnisse

Die vorgestellte Methode wurde anhand von realen Experimenten mit zwei Referenzszenen verifiziert. Zur Aufnahme der Bilder wurde die Lytro Illum Lichtfeldkamera verwendet und als Mustergenerator diente ein handelsüblicher LCD-Monitor (BenQ GW2765HT, Auflösung  $2560 \times 1440$ , Pixelgröße  $0,233 \text{ mm}$ ). Die Registrierung von Kamera- zu Monitorpixeln erfolgte mittels Multi-Frequenz-Phasenschubmustersequenzen [2].

Die erste Testszene besteht aus einer Festplattendisk, die teilspiegelnde Oberflächenbereiche in Form von Farbmarkierungen und Rauheiten zeigt. Da die Disk eine sehr hohe Planarität aufweist, wird die Güte der Rekonstruktion durch Vergleich mit einer idealen Ebene bewertet.

Abbildung 3 zeigt die Vermessung der Disk und das Ergebnis der 3D-Rekonstruktion. Hier sieht man den Rekonstruktionsfehler der Oberflächenrekonstruktion mittels direkter Tiefenschätzung, den Fehler bei Schätzung der reflektierten Entfernung, den Fehler mit Multi-Stereo-Deflektometrie [10] und das Ergebnis der hier beschriebenen Fusion. Die reine Lichtfeld-Tiefenschätzung der diffusen Oberfläche liegt nur spärlich in Bereichen großer Rauheit oder in der Nähe der Farbmarkierungen vor. Alle anderen Bereich werden von der Tiefenschätzung als ungültig bewertet, was durch  $w_i = 0$  in der Fusion berücksichtigt wird. Die indirekte Schätzung über die Reflexion und die Schätzung mittels Multi-Stereo-Deflektometrie sind wesentlich dichter und weniger verrauscht. Obwohl alle Schätzungen Rekonstruktionsfehler im unteren Millimeterbereich aufweisen, kann durch Fusion der Tiefen- und Normalenschätzung der Fehler deutlich reduziert werden. Ein Fehler von  $\text{RMSE} = 822,7 \mu\text{m}$  wird erreicht.

Die zweite Testszene zeigt einen Planspiegel mit sehr hoher Planarität ( $\lambda/20$ ) und soll demonstrieren, dass die



**Abb. 3:** Rekonstruktionsfehler der Festplattendisk im Vergleich zu einer idealen Ebene. (b-d) und (e-f) jeweils mit eigener Skala.

vorgestellte Methode auch für voll spiegelnde Oberflächen gute Resultate liefert. Die Reproduktionsgenauigkeit wird wieder durch Vergleich mit einer idealen Ebene bewertet.

Abbildung 4 zeigt die Vermessung der Szene und das Ergebnis der 3D-Rekonstruktion. Auf dem Planspiegel können keine diffusen Tiefenwerte gefunden werden, was mit  $w_i = 0$  in der Fusion berücksichtigt wird. Die indirekten Tiefenwerte und die Multi-Stereo Schätzung können jedoch beide gute Ergebnisse liefern. Da die indirekte Tiefenschätzung die Referenzszene trianguliert und die Multi-Stereo-Deflektometrie die Oberfläche, liegen zwei Messwerte mit unterschiedlicher Unsicherheit vor, wobei beide zur Verbesserung der Rekonstruktion beitragen können. Wird die Oberfläche nur anhand jeweils einer Tiefenschätzung rekonstruiert, ergeben sich größere Fehler als bei Fusion beider Tiefen, wobei die Abweichungen des mit der vorgestellten Methode rekonstruierten Planspiegels von der idealen Ebene sich im Bereich  $\pm 250 \mu\text{m}$  bewegen. Es ergibt sich ein Fehler von  $\text{RMSE} = 167,10 \mu\text{m}$ .

Um zu zeigen, dass die Fusion zwischen Oberflächenpunkten und Oberflächengradienten einen sehr großen Einfluss auf die Rekonstruktionsgenauigkeit hat, zeigen

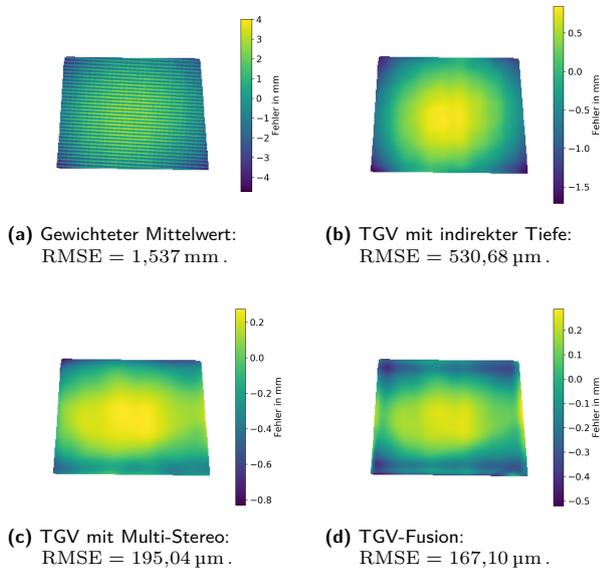


Abb. 4: Planspiegel: Auswertung der Rekonstruktion.

Abbildung 3e und 4a jeweils den Rekonstruktionsfehler, der sich bei Anwendung eines einfachen gewichteten Mittelwertes auf die verschiedenen Tiefenschätzung ergeben würde. Es wird sichtbar, dass das Ergebnis durch die vorgeschlagene Methode deutlich verbessert werden kann.

Bei genauerer Beobachtung der Rekonstruktion des Planspiegels fällt eine Überhöhung in der Mitte auf. Diese ist nicht auf eine Verformung des Spiegels zurückzuführen, sondern wird durch den Messaufbau beeinflusst. Da in unserem Messaufbau der Referenzmonitor über dem Objekt hängt, wird er leicht verbogen, was eine Verzerrung der Ergebnisse zur Folge hat. Ein genaues Modellieren des Referenzmonitors könnte die Rekonstruktionsgenauigkeit daher noch weiter erhöhen.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde demonstriert, wie eine Lichtfeldkamera in einen Deflektometrie-Aufbau zur Messung (teil)spiegelnder Oberflächen integriert werden kann. Die speziellen Eigenschaften der Lichtfeldkamera ermöglichen, es die Entfernung (bzw. die Tiefe) zur teilspiegelnden Oberfläche zu schätzen und simultan die Distanz zur reflektierten Referenzszene zu bestimmen. Dies ermöglicht es, unabhängige Schätzungen der 3D-Struktur derselben Oberfläche zu erhalten. Weiter wurden in diesem Beitrag die verschiedenen Tiefenschätzungen der Lichtfeldkamera zur Regularisierung der deflektometrischen Messung genutzt und mithilfe eines Variationsansatzes fusioniert. Durch Modellieren mittels *Totaler Generalisierter Varia-*

*tion* ließ sich die Oberfläche durch einen Primal-Dual-Algorithmus rekonstruieren. Messungen an realen Oberflächen zeigten letztendlich, dass trotz Tiefeninformation verschiedener Güte die Methode gute Ergebnisse liefert und sowohl diffus spiegelnde als auch voll spiegelnde Oberflächen rekonstruiert werden können.

## Literatur

- [1] D. Antensteiner, S. Štolc und T. Pock. A review of depth and normal fusion algorithms. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(2), 2018. ISSN 1424-8220. 10.3390/s18020431.
- [2] J. Balzer und S. Werling. Principles of shape from specular reflection. *Measurement*, 43(10):1305–1317, 2010. ISSN 02632241. 10.1016/j.measurement.2010.07.013.
- [3] Y. Bok, H.-G. Jeon und I. S. Kweon. Geometric calibration of micro-lens-based light field cameras using line features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(2):287–300, 2017. ISSN 0162-8828. 10.1109/TPAMI.2016.2541145.
- [4] K. Bredies, K. Kunisch und T. Pock. Total generalized variation. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 3(3):492–526, 2010. ISSN 1936-4954. 10.1137/090769521.
- [5] A. Chambolle und T. Pock. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 40(1):120–145, 2011. ISSN 1573-7683. 10.1007/s10851-010-0251-1.
- [6] M. Fischer, M. Petz und R. Tutsch. Vorhersage des Phasenrauschens in optischen Messsystemen mit strukturierter Beleuchtung. *tm - Technisches Messen*, 79(10):451–458, 2012. ISSN 0171-8096. 10.1524/teme.2012.0256.
- [7] L. Huang, M. Idir, C. Zuo und A. Asundi. Review of phase measuring deflectometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 107:247–257, 2018. ISSN 01438166.
- [8] Y. Quéau, J.-D. Durou und J.-F. Aujol. Normal integration: A survey, 2017.
- [9] C. Shin, H.-G. Jeon, Y. Yoon, I. So Kweon und S. Joo Kim. Epinet: A fully-convolutional neural network using epipolar geometry for depth from light field images. In *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018.
- [10] D. Uhlig und M. Heizmann. Multi-Stereo-Deflektometrie mit einer Lichtfeldkamera / Multi-stereo deflectometry with a light-field camera. *tm - Technisches Messen*, 85(s1):s59–s65, 2018. ISSN 0171-8096. 10.1515/teme-2018-0042.
- [11] A. Vianello, G. Manfredi, M. Diebold und B. Jähne. 3d reconstruction by a combined structure tensor and hough transform light field approach. *tm - Technisches Messen*, 84(7-8), 2017. ISSN 0171-8096. 10.1515/teme-2017-0010.
- [12] S. Wanner und B. Goldluecke. Reconstructing reflective and transparent surfaces from epipolar plane images. In *Pattern Recognition*, S. 1–10, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-40602-7.
- [13] Y.-L. Xiao, S. Li, Q. Zhang, J. Zhong, X. Su und Z. You. Optical fringe-reflection deflectometry with bundle adjustment.

*Optics and Lasers in Engineering*, 105:132–140, 2018. ISSN 01438166. 10.1016/j.optlaseng.2018.01.013.

- [14] J. Yang, H. Li, Y. Dai und R. T. Tan. Robust optical flow estimation of double-layer images under transparency or reflection. In *29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 1410–1419, Piscataway, NJ, 2016. IEEE. ISBN 978-1-4673-8851-1. 10.1109/CVPR.2016.157.
- [15] C. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin und Q. Chen. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 109:23–59, 2018. ISSN 01438166. 10.1016/j.optlaseng.2018.04.019.