

# Segmentierung strukturierter Oberflächen mittels variabler Beleuchtung

*Christoph Lindner, Fernando Puente León, Technische Universität München*

Manuskripteingang: 12. Januar 2006; zur Veröffentlichung angenommen: 26. Januar 2006

Es wird ein neues Verfahren zur beleuchtungsgestützten Segmentierung strukturierter Oberflächen vorgestellt. Als Grundlage dient eine Beleuchtungsserie, d. h. eine Folge von Bildern, die mit gerichtetem Licht aus verschiedenen Richtungen aufgenommen wurden. Daraus wird für jeden Ort der Oberfläche ein Signal extrahiert, welches die Intensität des zugehörigen Bildpunktes als Funktion des Beleuchtungswinkels beschreibt. Aus diesem Signal werden dann Merkmale gewonnen, die eine punktweise Segmentierung der Oberfläche erlauben. Mit Hilfe geeigneter Modelle lässt sich das Reflexionsverhalten der Oberfläche beschreiben sowie die zugehörigen Modellparameter aus dem Intensitätssignal schätzen. Ferner wird der Einfluss der Abtastung des Beleuchtungsraumes auf die Segmentierung untersucht. Einerseits ist es wünschenswert, die Zahl der Beleuchtungswinkel möglichst klein zu halten. Andererseits wird eine Mindestanzahl von Bildern benötigt, um ein zuverlässiges Ergebnis zu erzielen. Die Leistungsfähigkeit des Ansatzes wird anhand realer Messungen demonstriert. Dabei zeigt sich, dass der größere messtechnische Aufwand durch eine deutliche Erhöhung der Ortsauflösung und der Robustheit kompensiert wird.

**Schlagwörter:** Segmentierung, strukturierte Oberflächen, aktive Beleuchtung, photometrisches Stereo

## Segmentation of Structured Surfaces by Using Variable Illumination

This paper presents a new method to perform an illumination-based segmentation of structured surfaces. For this purpose, an illumination series is recorded, i. e. a series of images taken with directional lighting from different directions. For each location of the surface a signal is extracted from the series that describes the intensity of the corresponding point depending on the illumination angle. From this signal features are extracted that enable a pointwise segmentation of the surface. Aided by suitable models, the reflection properties of the surface can be described, and the corresponding model parameters can be estimated from the intensity signal. The influence of sampling the illumination space on the segmentation is investigated. It is desirable to keep the number of illumination angles as small as possible. On the other side, a minimum number of images is needed to achieve a reliable segmentation. The performance of the proposed approach is demonstrated with real images. The results prove that the higher data acquisition expense is compensated by a significant increase of both the spatial resolution and the robustness.

**Keywords:** Segmentation, structured surfaces, active illumination, photometric stereo

## 1 Einleitung

Die Segmentierung von Bildsignalen ist eine grundlegende Aufgabe der Bildverarbeitung. Ihr Ziel ist es, Bilder in disjunkte Bereiche nach definierten Regeln aufzuteilen. Herkömmliche Verfahren basieren auf lokalen statistischen Momenten der Intensitäten für eine bereichsorientierte Segmentierung [1] oder auf Differentiationsoperatoren bei einer konturorientierten Vorgehensweise [2]. In der Sichtprüfung ist jedoch häufig eine Segmentierung strukturierter Oberflächen erwünscht. Hierbei sollen Bereiche gleicher Orientierung oder gleicher Reflektanzeigenschaften als ein Segment identifiziert werden. Dafür sind Standardverfahren nur bedingt geeignet, da die Intensität an einem bestimmten Ort von mehreren Faktoren abhängt [1] – insbesondere von den Beleuchtungsbedingungen [3]. Eine einheitliche beleuchtungsunabhängige Segmentierung ist daher mit herkömmlichen Ansätzen oftmals nicht möglich.

Der hier vorgestellte Ansatz stützt sich auf die Beleuchtungsabhängigkeit der Intensitäten einer Oberfläche. Dazu wird eine Serie von Bildern mit systematisch variierender Beleuchtungsrichtung aufgenommen. Mit Hilfe dieser Bildmenge lassen sich die Orientierung sowie die Reflexionseigenschaften jedes diskreten Oberflächenortes schätzen. Die resultierenden Parameter werden als Merkmale für die Segmentierung verwendet. Der Einfluss der Mächtigkeit der Beleuchtungsserie bzw. der damit verbundenen Abtastrate im Beleuchtungsraum wird in Abschnitt 2.3 untersucht.

Nayar, Ikeuchi und Kanade entwickelten ein Verfahren zur Messung des Reflexionsverhaltens und des Reliefs von Oberflächen, basierend auf photometrischen Ansätzen [13]. Ihr Messaufbau beruht auf einer örtlich ausgedehnten Lichtquelle, die einen Lichtkegel mit einem bestimmten Raumwinkel um eine zentrale Beleuchtungsrichtung erzeugt. Dies entspricht der Überlagerung mehrerer benachbarter Punktlichtquellen in einem bestimmten Winkel und bewirkt eine Faltung der Intensitätsfunktion mit der Beleuchtungsfunktion. Mit dem vorgestellten Messprinzip kann der diffus streuende Anteil des Intensitätssignals vom spiegelnd reflektierten Anteil im eindimensionalen Fall getrennt werden. Auf dieser Grundlage lassen sich die Orientierung und die Reflexionseigenschaften jedes Oberflächenpunktes bestimmen. Eine entscheidende Rolle spielt auch hier die Abtastrate im Beleuchtungsraum, die abhängig von der Beleuchtungsfunktion der örtlich ausgedehnten Lichtquelle ist.

In [4] wurde bereits ein Konzept zur beleuchtungs-gestützten Segmentierung strukturierter Oberflächen vorgestellt; damit wurden die Grundlagen für die vorliegende Arbeit gelegt. Ferner führten McGunigle und Chantler Simulationen zur reflexionsbasierten Segmentierung rauer Oberflächen durch [5]. In ihrer

Arbeit zeigen sie, dass sich die Reflexionseigenschaften der Oberfläche sehr gut als Merkmale für eine Segmentierung eignen. Darüber hinaus wurden Ansätze zur kantenbasierten Segmentierung mittels variabler Beleuchtung veröffentlicht [8]. Anwendung finden diese Verfahren u. a. in der Qualitätsprüfung technischer und ästhetischer Oberflächen [6; 10].

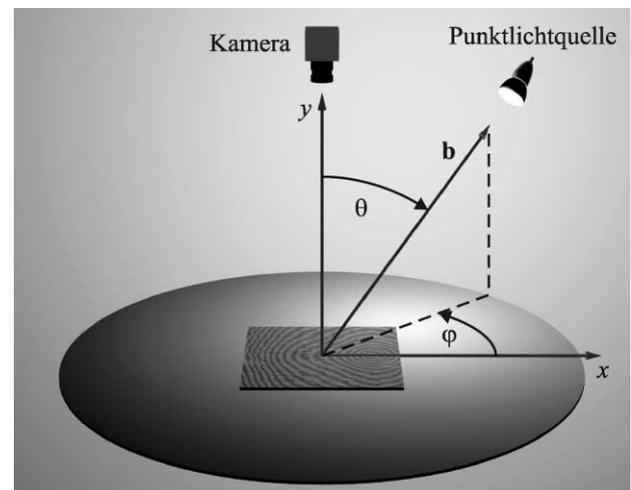
## 2 Grundlagen und Methoden

### 2.1 Beleuchtungsstrategie

Die Wahl der Beleuchtung ist von entscheidender Bedeutung für das vorgestellte Segmentierungsverfahren. Als Basis für die nachfolgende Signalverarbeitung dient eine *Beleuchtungsserie*. Dabei handelt es sich um eine Menge  $\mathcal{D}$  von  $I$  Bildern  $d(\mathbf{x}, \omega_i)$ , die von den Beleuchtungsparametern  $\omega_i$  abhängen:

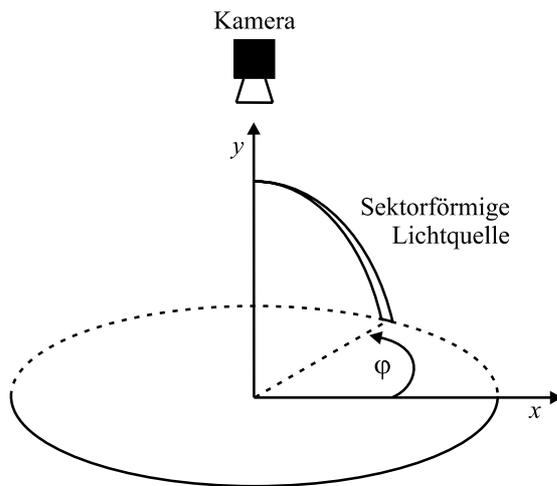
$$\mathcal{D} = \{d(\mathbf{x}, \omega_i), i = 0, \dots, I - 1\}, \quad (1)$$

wobei  $\mathbf{x} = (x, y)^T$  die Ortskoordinaten bezeichnet. Als Beleuchtung wird eine entfernte Punktlichtquelle



**Bild 1:** Entfernte Punktlichtquelle im Raum. Der Beleuchtungsraum wird durch das Azimut  $\varphi$  und den Elevationswinkel  $\theta$  aufgespannt. Der Vektor **b** zeigt in Richtung der Lichtquelle. Die optische Achse der Aufnahmeoptik verläuft entlang der y-Achse.

**Figure 1:** Distant point light source. The illumination space is spanned by the azimuth  $\varphi$  and the elevation angle  $\theta$ . The vector **b** points at the light source. The optical axis of the detector lies on the y-axis.



**Bild 2:** Superposition von Punktlichtquellen zu einer sektorförmigen Beleuchtung, die nur noch vom Azimut  $\varphi$  abhängig ist.  
**Figure 2:** A sector-shaped illumination can be considered as a superposition of point light sources, only dependent on the azimuth  $\varphi$ .

verwendet, deren Beleuchtungsrichtung durch den Vektor  $\omega = (\varphi, \theta)^T$  dargestellt wird. Hierbei beschreibt  $\varphi$  das Azimut und  $\theta$  den Elevationswinkel (siehe Bild 1).

Aus der Beleuchtungsserie wird das Intensitätssignal

$$s_x(\omega) := d(x, \omega) \tag{2}$$

extrahiert, welches die Intensität eines festen Ortes  $x$  als Funktion der Beleuchtungswinkel  $\varphi$  und  $\theta$  beschreibt. Dieses Intensitätssignal stellt die Grundlage der nachfolgenden Überlegungen dar.

Alternativ lässt sich eine Beleuchtungsserie auch mit Hilfe eines variablen Beleuchtungsmusters generieren. Als Beleuchtungsmuster wird hierbei eine beliebige Superposition von Punktlichtquellen bezeichnet.

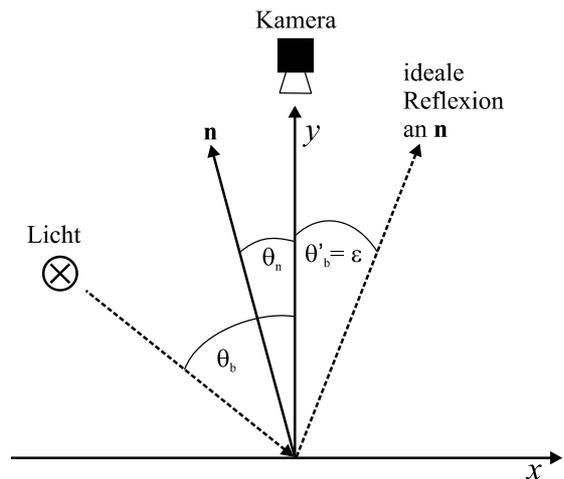
Der im Folgenden präsentierte Algorithmus verwendet ein sektorförmiges Beleuchtungsmuster (Bild 2). Damit wird die Oberfläche bei einem festen Azimut unter allen Elevationswinkeln im Intervall  $\theta_b \in [0^\circ, 90^\circ]$  beleuchtet. Die Kameraintensitäten  $d(x, \omega)$  hängen nur noch vom Azimut, nicht aber vom Elevationswinkel ab. Das Intensitätssignal, erzeugt aus einer Bilderserie mit variablem Azimut, ermöglicht es unter bestimmten Voraussetzungen, die Orientierung der Oberflächennormale bezüglich des Azimuts zu bestimmen.

## 2.2 Reflexionsmodell

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Reflexionsmodell wird durchgehend im Eindimensionalen betrachtet,

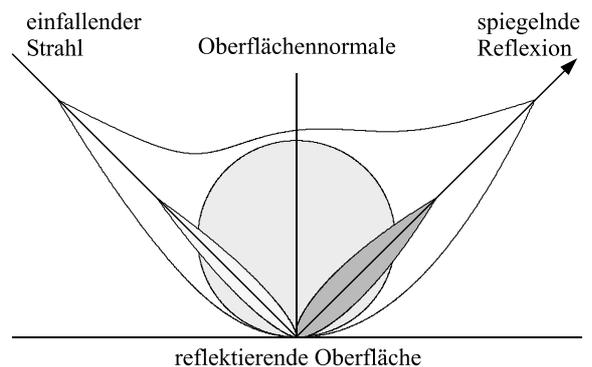
sodass die Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung sowie die Normale des untersuchten Flächenstücks in einer Ebene liegen (Bild 3). Um auf die Angabe des Azimuts verzichten zu können, werden auch negative Elevationswinkel berücksichtigt.

Bei der Bestrahlung einer Oberfläche mit Licht können verschiedene Effekte beobachtet werden, deren Ausprägung abhängig von den Oberflächeneigenschaften



**Bild 3:** Konvention der verwendeten vorzeichenbehafteten Elevationswinkel im eindimensionalen Reflexionsmodell. Der Index b weist auf die Beleuchtungsrichtung hin.

**Figure 3:** Convention of the signed elevation angles used with the one-dimensional reflectance model. The index b denotes the illumination direction.



**Bild 4:** Licht, das auf eine Oberfläche fällt, kann ideal gespiegelt, spiegelnd reflektiert, diffus reflektiert oder zurückgestreut werden.

**Figure 4:** Incident light can be ideally reflected, foreshattered, diffusely reflected or backscattered by a surface.

ten ist. Einfallendes Licht kann ideal gespiegelt werden. In Bild 4 wird dieser Effekt als Pfeil dargestellt. Reale Oberflächen sind oft nicht ideal glatt, sondern weisen mikroskopische Unebenheiten auf, was zu kleinen Abweichungen der Reflexionsrichtung führt. Dieser Effekt wird im Folgenden als *schwach gerichtete Reflexion* bezeichnet und wird durch eine Keule im Bild repräsentiert. Daneben kann ein Teil des einfallenden Lichts zurückreflektiert werden. Im Bild ist dies durch eine entsprechende Keule angezeigt; dieser Effekt wird im Folgenden jedoch vernachlässigt. Ein weiterer wichtiger Effekt ist die Lambert'sche oder ideal diffuse Streuung. In diesem Fall wird die einfallende Strahlung gleichmäßig in jede Richtung gestreut. Ein Kreis verdeutlicht in Bild 4 die Lambert'sche Streuung.

Beim hier vorgestellten Verfahren wird die reflektierte Strahlendichte  $L$  durch eine Überlagerung eines Anteils für diffuse Lambert'sche Streuung  $L_d$  und eines Anteils schwach gerichteter Reflexion  $L_s$  modelliert [1; 11]:

$$L = \lambda \cdot L_s + (1 - \lambda) \cdot L_d \tag{3}$$

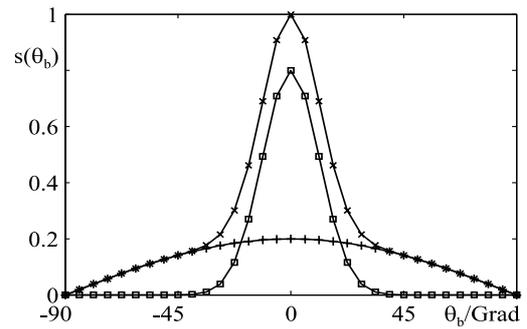
Der Parameter  $\lambda$  beschreibt die relative Verstärkung beider Komponenten. Der Lambert'sche Anteil ist nur vom Einfallswinkel des Lichtes auf die Oberfläche abhängig:

$$L_d = k_d \cdot \cos(\theta_b - \theta_n) \tag{4}$$

Der Anteil der schwach gerichteten Strahlung  $L_s$  wird durch ein einfaches, auf geometrischer Optik basierendes Modell nach Torrance und Sparrow beschrieben, wonach die Oberflächenmikrostruktur aus einer Vielzahl ideal spiegelnder Facetten besteht [11]. Die Orientierung dieser Facetten wird normalverteilt um den Normalenvektor  $\mathbf{n}$  angenommen. Eine Facette spiegelt – entsprechend ihrer Orientierung – einen Teil der auftreffenden Strahlung in eine Richtung, die von der Richtung der idealen Spiegelung am Oberflächenpunkt abweichen kann. Die Strahlendichte  $L_s$  ist deshalb proportional zur Auftrittswahrscheinlichkeit der Abweichung  $\delta$  der Facettenrichtung von  $\mathbf{n}$ . Für einen Sensor, der die Oberfläche unter dem Winkel  $\varepsilon = 2\delta$  abweichend von der Richtung der idealen Spiegelung betrachtet, gilt:

$$L_s(\varepsilon) = k_s \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5}$$

wobei  $\sigma$  ein Maß für die Breite der Streukeule darstellt. Weitere von Torrance und Sparrow [11] beschriebene Effekte, etwa die Abschattung von Facetten, werden hier vernachlässigt oder im Skalierungsfaktor  $k_s$  zusammengefasst. Das Modell setzt weiterhin voraus, dass die Facetten größer als die Wellenlänge des Lichts sind. Wellenoptische Effekte werden hierbei nicht berücksichtigt.



**Bild 5:** Simulation der Reflexion an einem Oberflächenpunkt. Die Intensität  $s(\theta_b)$  ist über dem Beleuchtungswinkel aufgetragen: schwach spiegelnder Anteil ( $\square$ ), Lambert'sche Streuung ( $+$ ), resultierende Gesamtintensität ( $\times$ ).

**Figure 5:** Simulation of the intensity reflected by a surface location. The intensity  $s(\theta_b)$  is plotted as a function of the incident light angle: forscattered light ( $\square$ ), diffuse (Lambert) reflection ( $+$ ), overall reflection ( $\times$ ).

Für kleine Raumwinkel, wie sie bei der Abbildung auf den Sensor auftreten, kann angenommen werden, dass die gemessene Intensität  $s(\theta_b)$  proportional zur Strahlendichte ist [7]:

$$s(\theta_b) \propto L(\theta_b) \tag{6}$$

Unter Berücksichtigung der Winkelkonventionen in Bild 3 lassen sich die Gleichungen (3)–(6) zu folgender Beziehung zusammenfassen:

$$s(\theta_b) = (1 - k) \cos(\theta_b - \theta_n) + k \exp\left(-\frac{(\theta_b - 2\theta_n)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{7}$$

Damit kann, wie in Bild 5 gezeigt wird, der Intensitätsverlauf eines diskreten Ortes über die Beleuchtungsrichtung  $\theta_b$  berechnet werden.

### 2.3 Abtastung des Beleuchtungsraumes

Die Messung des Intensitätssignals, wie es in Bild 5 als Simulation zu sehen ist, erfolgt stets für diskrete Beleuchtungswinkel. Es findet demnach eine Abtastung im Beleuchtungsraum statt. Von besonderem Interesse ist die Frage nach der Mindestanzahl von Abtastpunkten, um die Parameter des Reflexionsmodells für eine gegebene Messung hinreichend genau schätzen zu können. Für Lambert'sche Oberflächen kann gezeigt werden, dass unter bestimmten Voraussetzungen eine Beleuchtung aus zwei Richtungen ausreicht,

um die Modellparameter zu extrahieren [12]. Die folgenden Überlegungen beziehen sich daher auf den schwach spiegelnden Anteil der Reflexion, der mit  $\sigma$  ein wichtiges Merkmal für den nachfolgenden Segmentierungsalgorithmus liefert. Der Einfachheit halber wird auch hier nur der Elevationswinkel  $\theta$  variiert. Die Berücksichtigung des Azimuts würde die mathematische Darstellung aufwendiger gestalten [7; 9], ist jedoch für den entwickelten Algorithmus ohne Bedeutung. Die Fouriertransformierte des spiegelnden Anteils berechnet sich wie folgt:

$$\mathcal{F} \left\{ k \exp \left( -\frac{(\theta_b - 2\theta_n)^2}{2\sigma^2} \right) \right\} = k\sqrt{2\sigma^2\pi} \exp \left( -\frac{f_{\theta_b}^2}{2\sigma_f^2} \right) \exp(-j2\pi 2\theta_n f_{\theta_b}), \quad (8)$$

wobei  $\sigma_f^2 := (4\pi^2\sigma^2)^{-1}$  die Varianz im Frequenzbereich bezeichnet. Wird für das resultierende gaußförmige Betragsspektrum näherungsweise eine Bandbreite von

$4\sigma_f$  angenommen, so erhält man als Abtastbedingung:

$$\Delta\theta_b = \frac{1}{f_{\theta_b}} < \frac{1}{4\sigma_f} = \frac{\pi\sigma}{2} \quad (9)$$

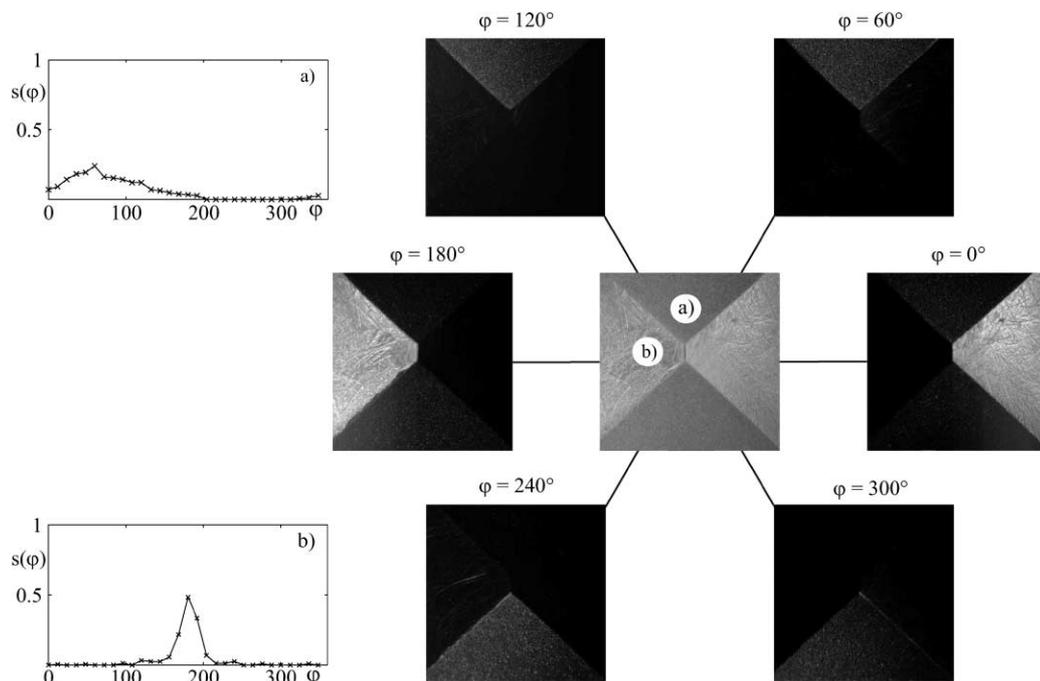
und somit für den Umfang der Bildserie:

$$I > \frac{\pi}{\Delta\theta_b} = \frac{2}{\sigma}. \quad (10)$$

Für  $\sigma \rightarrow 0$  beschreibt  $L_s$  den Grenzfall der idealen Spiegelung, für den gemäß Gl. (9) eine unendlich dichte Abtastung des Beleuchtungsraumes erforderlich wäre. Konsequenterweise muss zur optimalen Abtastung Vorwissen über den kleinsten vorkommenden Reflexionsparameter  $\sigma$  einer Oberfläche vorliegen. In der Praxis kann dieses Wissen aus früher aufgenommenen Beleuchtungsserien ähnlicher Objekte, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, extrahiert werden.

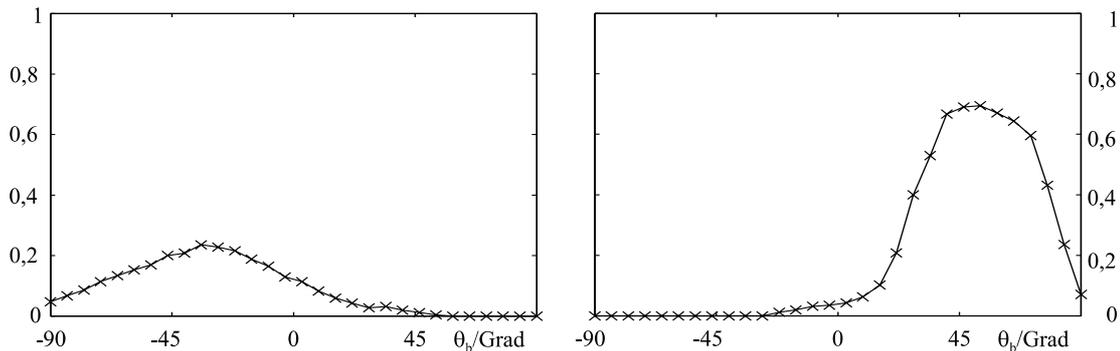
### 3 Segmentierung

Das in Abschnitt 2.2 diskutierte Reflexionsmodell ermöglicht eine Segmentierung der Oberfläche bezüglich



**Bild 6:** Sechs Einzelbilder der Beleuchtungsserie eines pyramidenförmigen Testobjekts bei Beleuchtung mit einem sektorförmigen Beleuchtungsmuster. Links sind zwei Intensitätssignale a) und b) von unterschiedlich orientierten Orten dargestellt. Das Maximum der Intensitätssignale dient zur Abschätzung der Orientierung in  $\varphi$ -Richtung.

**Figure 6:** Six images of an illumination series of a pyramidal test object, taken with a sector-shaped illumination pattern. On the left side, two intensity signals of the location a) and b), which have a different orientation, are plotted. The maximum of the intensity signals is used to estimate the  $\varphi$  direction.



**Bild 7:** Exemplarisch gemessene Intensitätssignale der sandgestrahlten Oberfläche (links) und der polierten Oberfläche (rechts). Die Breite  $\sigma$  der Kurve beträgt links 0,55 und rechts 0,32.

**Figure 7:** Two intensity signals of the sand-streamed surface (left) and the polished surface (right). The width  $\sigma$  of the curve is 0.55 on the left and 0.32 on the right.

ihrer Reflexionseigenschaften Punkt für Punkt. Der hier vorgestellte Algorithmus ermittelt zunächst die Orientierung der Oberflächenpunkte in Azimutrichtung. Dazu wird eine  $\varphi$ -Beleuchtungsserie ausgewertet, die mit Hilfe eines sektorförmigen Beleuchtungsmusters erzeugt wurde (siehe Abschnitt 2.1). Bild 6 zeigt eine Azimutserie eines pyramidenförmigen Objekts aus Aluminium und daraus extrahierte Intensitätssignale zweier Orte der Oberfläche mit unterschiedlicher Orientierung in Azimutrichtung. Das Maximum der Signale kann als Schätzwert für die Orientierung in  $\varphi$ -Richtung herangezogen werden [4]. Diese Operation wird für jeden Oberflächenpunkt durchgeführt.

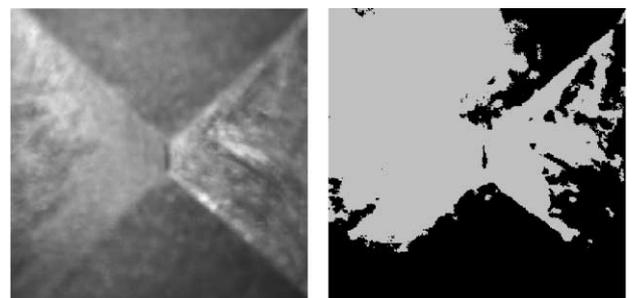
Im zweiten Schritt wird eine mit einer Punktlichtquelle aufgenommene  $\theta$ -Beleuchtungsserie ausgewertet, die jeweils unter dem zuvor bestimmten Azimut aufgenommen wurde. An die Intensitätssignale werden nun durch das Reflexionsmodell berechnete Kurven mit der Methode der kleinsten Quadrate angepasst. Die so ermittelten Parameter des Modells Gl. (7) können als Merkmale für eine Segmentierung dienen. Mögliche Parameter sind:

- die Breite der Streukeule für die spiegelnde Reflexion  $\sigma$ ,
- die Intensität des Maximums,
- die relative Ausprägung  $k$  von Lambert'scher und spiegelnder Reflexion,
- die Position des Maximums [4].

Die Segmentierung erfordert abschließend eine Schwellenwertbildung im eindimensionalen oder eine Ballungsanalyse im mehrdimensionalen Merkmalsraum. Die einzelnen Cluster werden dann den resultierenden Segmenten zugeordnet.

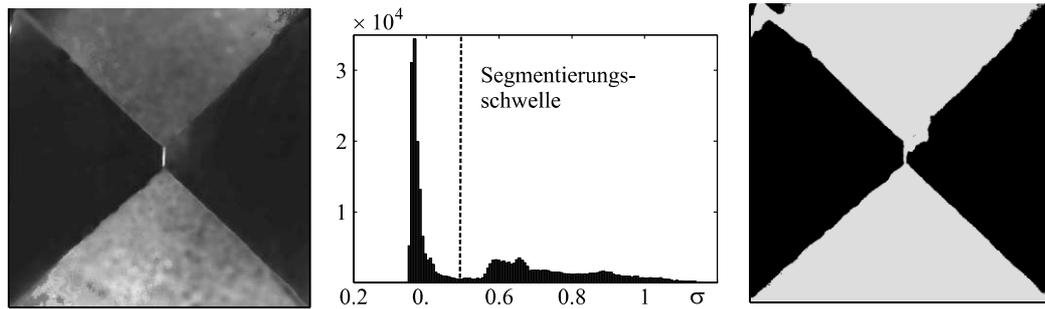
## 4 Ergebnisse

Das Prinzip des Algorithmus soll anhand des pyramidenförmigen Objekts aus Bild 6 erläutert werden. Die jeweils gegenüberliegenden Seiten der Pyramide wurden in gleicher Weise bearbeitet, weshalb alle Punkte dieser Flächen ähnliche Reflektanzeigenschaften aufweisen. Zwei der Seiten wurden durch Sandstrahlen aufgeraut und lassen eine breite Reflexionskeule erwarten, während die beiden anderen Seiten poliert wurden, was zu einer relativ schmalen Streukeule führt; siehe Bild 7. Wird das Testobjekt wie in Bild 8 (links) diffus beleuchtet, so führt eine Schwellenwertbildung zu keinem befriedigenden Ergebnis, da in diesem Bild der Grauwert der Oberfläche nicht mit der Oberflächenstruktur korreliert; siehe Bild 8 (rechts).



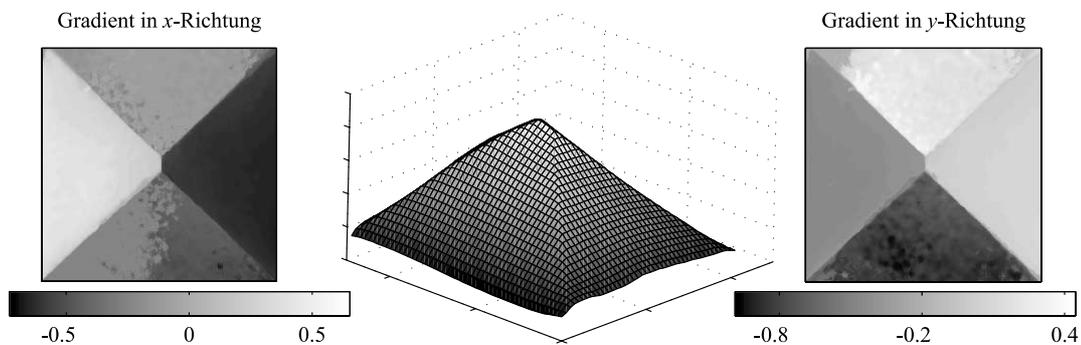
**Bild 8:** Pyramidenförmiges Testobjekt unter diffuser Beleuchtung (links). Segmentierung des Testobjekts durch Binarisierung des linken Bildes (rechts).

**Figure 8:** Pyramidal test object under diffuse illumination (left). Segmentation of the test-object by binarization of the left image (right).



**Bild 9:** Standardabweichung  $\sigma$  der Reflexionskeule, codiert anhand von Grauwerten (links); Histogramm von  $\sigma$  (Mitte); Segmentierung mit dem Schwellenwert 0,5 (rechts).

**Figure 9:** Standard deviation  $\sigma$  of the foreshattered lope, coded by grey values (left); histogram of  $\sigma$  (center); segmentation with the threshold 0.5 (right).



**Bild 10:** Die beiden Gradientenbilder (links und rechts) zeigen die Oberflächengradienten als Grauwerte codiert. Die Pyramidenflächen sind gut erkennbar. In der Mitte ist die dreidimensionale Rekonstruktion des Messobjektes abgebildet.

**Figure 10:** The gradient images (left and right) show the surface gradient coded by grey values. The surfaces of the pyramid can clearly be distinguished. The central image shows a 3D reconstruction of the test object.

Im vorliegenden Beispiel wurde zur Durchführung der reflexionsbasierten Segmentierung lediglich die Standardabweichung  $\sigma$  der Streukeule für die spiegelnde Reflexion herangezogen. Das Histogramm von  $\sigma$  weist zwei ausgeprägte Moden auf; siehe Bild 9 (Mitte). Eine Trennung beider Moden mittels einer einfachen Schwelle zeigt, dass kleinere  $\sigma$ -Werte – d. h. schmale Streukeulen – mit den polierten Flächen korrespondieren, wohingegen die sandgestrahlten Flächen überwiegend eine breite Intensitätsverteilung aufweisen; siehe Bild 9 (rechts). Dies entspricht den zu Beginn dieses Abschnitts formulierten Erwartungen. Auch die beiden exemplarisch entnommenen Intensitätssignale in Bild 7 bestätigen dieses Verhalten. Werden die Werte von  $\sigma$  anhand von Grauwerten codiert, so können die Flächen unterschiedlicher Reflektanz in feinen Abstufungen sichtbar gemacht werden; siehe Bild 9 (links).

Die Orientierung jedes Oberflächenpunktes in  $\theta$ -Richtung kann aus den  $\theta$ -Beleuchtungsserien bestimmt werden, indem wiederum das Maximum des Intensitätssignals als Schätzwert gewählt wird. Damit steht der Normalenvektor an jedem Ort zur Verfügung und kann zur Rekonstruktion der Oberflächen nach dem Verfahren von Frankot und Chellappa [14] herangezogen werden. Das Resultat sowie die beiden Gradientenbilder sind in Bild 10 abgebildet.

## Zusammenfassung

Das vorgestellte Verfahren schätzt die Reflektanzparameter sowie die Normalenvektoren einer Oberfläche punktweise aus Beleuchtungsserien und verwendet diese als Merkmale für ihre Segmentierung. Durch die damit erzielte höhere Ortsauflösung wird eine robustere Segmentierung als mit herkömmlichen Verfahren

erreicht. Um die Streueigenschaften hinreichend genau ermitteln zu können, muss eine Mindestanzahl von Bildern aufgenommen werden. An einem Messbeispiel wurde die prinzipielle Praxistauglichkeit des Verfahrens demonstriert. Künftig sollen Strategien zur effizienten zweidimensionalen Abtastung des Beleuchtungsraumes sowie geeignete Methoden zur Klassifikation der extrahierten Merkmale untersucht werden. Ziel ist es, die Beleuchtungsserien so klein wie möglich zu halten, ohne einen vorgegebenen Messfehler zu unterschreiten.

## Literatur

- [1] Haralick, R. M.; Shapiro, L. G.: *Computer and Robot Vision, Vol. II*. Addison-Wesley, Reading, 1992.
- [2] Bässmann, H.; Besslich, P. W.: *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [3] Puente León, F.: Enhanced imaging by fusion of illumination series. In: *O. Loffeld (Hrsg.): Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing*. Proc. SPIE, Vol. 3100, S. 297–308, 1997.
- [4] Lindner, C.; Arigita, J.; Puente León, F.: Illumination-based segmentation of structured surfaces in automated visual inspection. In: *W. Osten, C. Gorecki, E. Novak (Hrsg.): Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*. Proc. SPIE, Vol. 5856, S. 99–108, 2005.
- [5] McGunnigle, G.; Chantler, M. J.: Segmentation of Rough Surfaces using Reflectance. In: *Proc. of the British Machine Vision Conference, Vol. 1*. Manchester, S. 323–332, 2001.
- [6] Puente León, F.: Determination of the coverage of shot peened surfaces. In: *C. A. Brebbia (Hrsg.): Surface Treatment*. WIT Press, S. 323–332, 2001.
- [7] Heizmann, M.; Beyerer, J.: Sampling the Parameter Domain of Image Series. In: *E. R. Dougherty, J. T. Astola, K. O. Egiazaria (Hrsg.): Image Processing: Algorithms and Systems IV*. Proc. SPIE, Vol. 5672, S. 23–33, 2005.
- [8] Pfeifer, T.; Wieggers, L.: Verfahren zur wissensunabhängigen automatischen Bildoptimierung in der technischen Sichtprüfung. In: *Bildverarbeitung im industriellen Einsatz*. VDI Berichte, Vol. 1572, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 37–42, 2000.
- [9] Sato, I.; Okabe, T.; Sato, Y.; Ikeuchi, K.: Appearance sampling for obtaining a set of basic images for variable illumination. In: *Proc. of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE Computer Society, 2003.
- [10] Racky, J.; Pandit, M.: Active illumination for the segmentation of surface deformations. In: *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE, S. 41–45, 1999.
- [11] Torrance, K. E.; Sparrow, E. M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *J. of the Opt. Soc. of America*, Vol. 57(9), S. 1105–1114, 1967.
- [12] Tagare, H. D.; deFigueiredo, R. J. P.: A theory of photometric stereo for a class of diffuse non-Lambertian surfaces. *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13(2), S. 133–152, 1991.
- [13] Nayar, S. K.; Ikeuchi, K.; Kanade, T.: Determining shape and reflectance of Lambertian, specular, and hybrid surfaces using extended sources. *International Workshop on Industrial Applications of Machine Intelligence and Vision*, IEEE, S. 169–175, 1989.
- [14] Frankot, R. T.; Chellappa, R.: A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms. *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10(4), S. 439–451, 1988.



**Dipl.-Ing. Christoph Lindner** ist wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik der Technischen Universität München.

**Hauptarbeitsgebiete:** Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, Signalverarbeitung und Automatisierungstechnik.

**Adresse:** Technische Universität München, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Theresienstr. 90/N5, 80333 München, Fax: +49-89-289 23348, E-Mail: christoph.lindner@tum.de



**Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León** leitet das Fachgebiet Verteilte Messsysteme an der Technischen Universität München.

**Hauptarbeitsgebiete:** Mess- und Automatisierungstechnik, Signalverarbeitung, automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, Mustererkennung, Datenübertragung und Informationsfusion.

**Adresse:** Technische Universität München, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Theresienstr. 90/N5, 80333 München, Fax: +49-89-289 23348, E-Mail: f.puente@tum.de