

Der Einfluss der Lichtquellengeometrie auf die Entfernungsmessung von PMD-Kameras

Stephan NESER und Arno SEYFARTH

Zusammenfassung

PMD-Sensoren haben interessante Anwendungen in der industriellen Qualitätskontrolle. Diese Anwendungen erfordern kurze Arbeitsabstände und stellen hohe Anforderungen an die Tiefenauflösung. Bei geringen Abständen verursacht die ausgedehnte Geometrie der Lichtquelle systematische Abweichungen im Entfernungssignal, die mit Hilfe von Computersimulationen untersucht werden. Die gefundenen Abweichungen liegen bei Arbeitsabständen von 500 mm in der Größenordnung von 2,5 mm. Erste Vergleiche zwischen den Simulationen und realen Daten zeigen eine qualitative Übereinstimmung.

1.1 Einführung

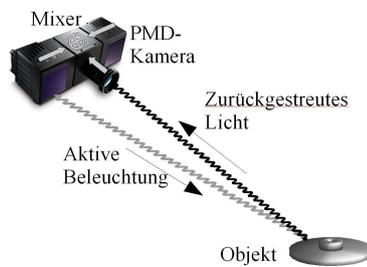


Abb. 1: Das PMD-Prinzip.

Mit den Photonic-Mixer-Devices (PMD) stehen seit Mitte der neunziger Jahre (Schwartz 1997) Systeme zur Verfügung, die ohne Scanprozess oder Stereobildanalyse orts aufgelöste 3D-Daten mit Videobildrate liefern. Die Integration von optischem Sensor und Auswertelektronik auf einem Chip, erlaubt PMD-Sensoren in jedem Pixel eine Entfernungsbestimmung durch die Messung der Lichtlaufzeit von der Lichtquelle zum Objekt und zurück in die Kamera. Dazu wird die Szene mit amplitudenmoduliertem Infrarotlicht beleuchtet, in der Regel mit IR-LEDs. Jedes Pixel des PMD-Sensors verfügt über einen Mixer

der die Phasendifferenz zwischen dem abgestrahlten (Referenz) und dem vom Objekt rückgestreuten Licht detektiert. Daraus ergibt sich für jeden Punkt die Lichtlaufzeit und so die Entfernung d zwischen Sensorpixel und Objekt (Abb. 1) zu

$$d = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\omega} \cdot \Delta\Phi, \quad (1)$$

wobei ω die Kreisfrequenz der Modulation, c die Lichtgeschwindigkeit und $\Delta\Phi$ die Phasendifferenz zwischen Referenz und rückgestreutem Licht ist. Der Faktor $\frac{1}{2}$ wird für die Umrechnung vom Lichtweg, der ja Hin- und Rückweg beinhaltet, in die Entfernung benötigt. Aktuelle PMD-Kameras erreichen Entfernungsauflösungen von ca. 3 mm, ältere Modelle, wie die hier verwendete PMD19k, erreichen ca. 6 mm. Diese Auflösungen sind für viele Anwendungen ausreichend, die Zahl der potentiellen Applikationen steigt jedoch mit der erzielbaren Tiefenauflösung stark an. Die Verbesserung der Tiefenauflösung war daher Gegenstand zahlreicher Arbeiten: Untersucht wurden die statistischen Messfehler (LANGE 2000), systematische Fehler aufgrund höherer Harmonischer in der aktiven Beleuchtung (RAPP 2008, LINDNER 2008) und der Einfluss der Reflektivität der

(RAPP 2008, LINDNER 2008) und der Einfluss der Reflektivität der abgebildeten Oberfläche auf die Abstandsmessung (SABOV 2007).

In der industriellen Qualitätskontrolle existieren viele Prüfaufgaben die kurze Arbeitsabstände mit Tiefenaufösungen im Millimeterbereich erfordern und die mit der PMD-Technologie stark vereinfacht werden könnten, z.B. die Segmentierung von kontrastarmen Objekten im Tiefenbild oder die Aufnahme von ortsaufgelösten Tiefenbildern in Echtzeit. Im Hinblick auf solche Aufgaben soll in dieser Arbeit eine weitere Quelle systematischer Fehler untersucht werden: die Geometrie der Lichtquelle. Ähnliche Simulationen wurden bereits von PETERS 2007 durchgeführt, jedoch mit anderer Schwerpunktsetzung.

Der Grundgedanke ist folgender: der Lichtweg setzt sich aus dem Hinweg (Lichtquelle \rightarrow Objekt) und dem Rückweg (Objekt \rightarrow Sensor) zusammen. Die Annahme aus Gleichung 1, dass der Abstand von Kamera zu Objekt der halben Lichtlaufzeit bzw. Phasendifferenz entspricht, ist nur gültig wenn Hin- und Rückweg gleich lang sind. Dies ist bei ausgedehnten Lichtquellen in der Regel nicht erfüllt (Abb.1). Die Größenordnung des resultierenden Messfehlers kann mit einem einfachen Modell abgeschätzt werden (Abb 2a): Dazu wird eine LED betrachtet die um d_{LED} gegen das Kamerazentrum verschoben ist. Das Objekt sitzt auf der Kameraachse im Abstand z . Das Licht der LED muss zum Objekt die Strecke $d = (z^2 + d_{LED}^2)^{1/2}$ zurücklegen. Der gemessene Wert entspricht dann dem Mittelwert $(d+z)/2$ und der Messfehler ist gerade $(d-z)/2$. Das Ergebnis ist in Abb. 2b aufgetragen. Im Nahbereich zwischen 300 und 1000 mm ergeben sich Abweichungen (z.B. 4.95 mm bei $Z = 500$ mm), die signifikant über der Entfernungsauflösung aktueller PMD-Kameras liegen. Zu größeren Abständen hin sinkt die Abweichung unter die Auflösungsgrenze und kann vernachlässigt werden.

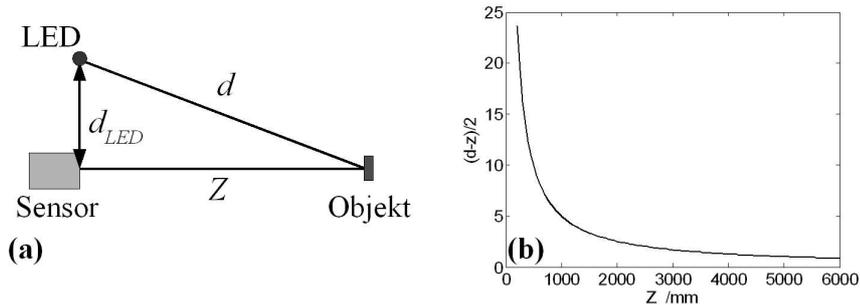


Abb. 2 Längenmessfehler bei dezentraler Beleuchtung mit einer LED (a) Anordnung von Kamera, LED und Objekt (b) Resultierende Abweichung als Funktion des Abstands.

2 Simulationen

Als Methode zur Untersuchung dieser Effekte eignen sich Simulationen, da sie eine große Flexibilität bei der Auswahl der zu untersuchenden Konfigurationen ermöglichen. Zudem kann der Einfluss der Lichtquellengeometrie von anderen systematischen Fehlerquellen isoliert werden. Die Grundkonfiguration der Simulationen zeigt Abb. 3a. Die Kamera blickt auf eine diffus streuende Ebene im Abstand Z_0 . Die Beschränkung auf eine Ebene erleichtert später die Interpretation der Ergebnisse.

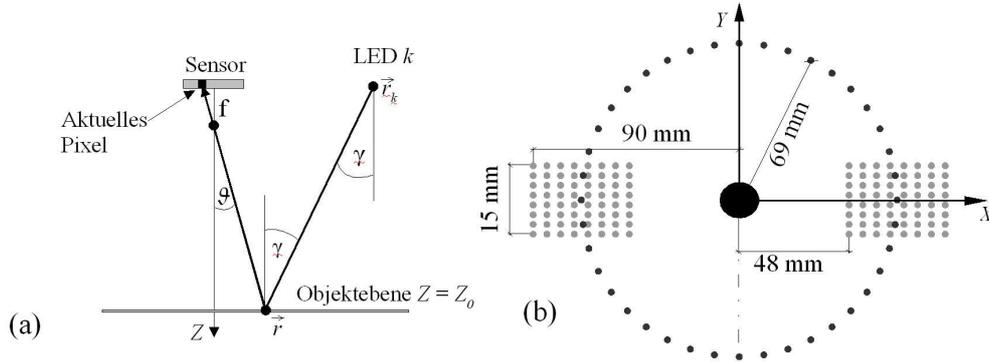


Abb. 3: Geometrie der Simulation. **(a)** Sensor, Objektebene und Lichtweg. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde nur eine LED eingezeichnet. **(b)** LED-Konfigurationen: helle Punkte: PMD19k, dunkle Punkte: KREIS. Der große Punkt in der Mitte bezeichnet das Kamerazentrum.

Die Abbildung auf den Sensor wird mit dem Lochkameramodell beschrieben, als interne Parameter werden die der PMD[vision]©19k-Kamera (PMD19k) der Firma PMD-Technologies (160×120 Pixel à $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, $f = 12\text{mm}$, Hauptpunkt in der Sensormitte) verwendet: die Simulation liefert so ein Entfernungsbild, das dem der PMD19k entspricht. Als Beleuchtung dienen N LEDs, die an den frei wählbaren Orten $\{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N\}$ ¹ positioniert sind. Die Hauptabstrahlrichtung der LEDs liegt stets in Z-Richtung. In dieser Arbeit werden zwei LED-Konfigurationen untersucht, die Originalkonfiguration der PMD19k und zum Vergleich eine kreisförmige Anordnung (Abb. 3b).

Die Berechnung des Entfernungsbildes erfolgt pixelweise: Zunächst wird der einem Pixel zugeordnete Punkt \mathbf{r} auf der Objektebene ermittelt. Dann wird für jede LED (Abb. 3a) die Intensität und die Phasenlage am Ort \mathbf{r} bestimmt. Aus der Summation über alle LEDs folgen dann die Gesamtintensität $I(\mathbf{r})$ und die resultierende Phasenlage $\Phi(\mathbf{r})$ am Ort \mathbf{r} . Im letzten Schritt wird noch die Phasenverschiebung entlang des Rückwegs zum Pixel hinzugefügt. Mit (1) folgt dann die resultierende Entfernung d für diesen Pixel. Im Folgenden soll diese Berechnung näher ausgeführt werden: Alle LEDs im System werden als Punktstrahler mit der gleichen Modulationsfrequenz ν und Phase $\Phi_0 = 0$ modelliert. Die k -te LED erzeugt eine Welle mit der Intensität

$$I_k(\vec{r}, t) = I_0 \cdot I_{LED}(\gamma_k(\vec{r})) \cdot \frac{\sin(\omega t - \Phi_k(\vec{r}))}{\|\vec{r} - \vec{r}_k\|^2}, \quad (2)$$

wobei I_0 die Amplitude der Welle angibt und $I_{LED}(\gamma)$ die Winkelabhängigkeit der Leuchtdichtenstrahlung beschreibt. $\omega = 2\pi\nu$ ist die Kreisfrequenz der Modulation und $\gamma_k(\mathbf{r})$ der Winkel zwischen $\mathbf{r} - \mathbf{r}_k$ und der Abstrahlrichtung der LED (i.e. der Z-Achse). Der Nenner beschreibt die quadratische Abschwächung der Welle mit zunehmendem Abstand zum Abstrahlpunkt, und

¹ Im Folgenden werden Vektoren im Text in Fettdruck und in den Formeln mit Vektorpfeil markiert.

$$\Phi_k(\vec{r}) = \frac{\omega}{c} \cdot \|\vec{r} - \vec{r}_k\| \quad (3)$$

ist die Phase der LED k am Ort \mathbf{r} . Um die Gesamtintensität $I(\mathbf{r}, t)$ zu erhalten, muss über alle Lichtquellen summiert werden:

$$I(\vec{r}, t) = \sum_{k=1}^N a_k(\vec{r}) \cdot \sin(\omega t + \Phi_k(\vec{r})) . \quad (4)$$

Der Faktor $a_k(\mathbf{r})$ beschreibt die Amplitude der LED k am Ort \mathbf{r} . Um die Abschwächung der Intensität durch das schräge Auftreffen der Welle auf die Ebene zu berücksichtigen (Lambertsches Gesetz), wurde noch ein Faktor $\cos(\gamma_k)$ hinzugefügt:

$$a_k(\vec{r}) = \frac{I_0 \cdot I_{LED}(\gamma_k(\vec{r})) \cdot \cos(\gamma_k(\vec{r}))}{\|\vec{r} - \vec{r}_k\|^2} . \quad (5)$$

Damit ist die Lichtintensität am Ort \mathbf{r} bekannt. Für Simulationen wird nur die Phase $\Phi(\mathbf{r})$ von $I(\mathbf{r}, t)$ benötigt. Mit dem Additionstheorem für den Sinus erhält man für die resultierende Phase der überlagerten Wellen:

$$\Phi(\vec{r}) = \arctan \left(\frac{\sum_{k=1}^N a_k(\vec{r}) \cdot \sin(\Phi_k(\mathbf{r}))}{\sum_{k=1}^N a_k(\vec{r}) \cdot \cos(\Phi_k(\mathbf{r}))} \right) . \quad (6)$$

Da die Phase am Ort der LEDs per Definition Null ist, ist $\Phi(\mathbf{r})$ zudem identisch mit der resultierenden Phasendifferenz $\Delta\Phi(\mathbf{r})$ zwischen der Lichtquelle und dem Ort \mathbf{r} . Nun fehlt noch die Phasendifferenz $\Delta\Phi_r$ für den Rückweg von \mathbf{r} zum Sensor. Mit dem Lochkamera-modell ergibt sich:

$$\Delta\Phi_r(\vec{r}) = \frac{\omega}{c} \cdot (Z_0 + f) \cdot \cos(\vartheta) , \quad (7)$$

wobei ϑ der Winkel zwischen \mathbf{r} und der Z-Achse, Z_0 der Abstand der Objektebene vom Kamerazentrum und f die Brennweite des Objektivs sind. Die gesamte Phasenverschiebung ist dann gerade die Summe der Einzelphasen und als gemessener Abstand vom Sensor zum Punkt \mathbf{r} ergibt sich

$$d = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\omega} \cdot (\Delta\Phi(\vec{r}) + \Delta\Phi_r(\vec{r})) , \quad (8)$$

wobei der Faktor $\frac{1}{2}$ analog zu Gleichung 1 die Aufteilung der Laufstrecke in Hin- und Rückweg berücksichtigt. Der gefundene Abstand d beschreibt den Abstand zwischen dem Sensorpixel und dem abgebildeten Punkt \mathbf{r} . Für die betrachtete Ebene im Abstand Z_0 ändert

sich d daher mit der Blickrichtung: $d = Z_0/\cos(\vartheta)$. Im Folgenden wird daher die Z-Komponente von d oder zur Bewertung der Fehler die Größe $\Delta Z = Z - Z_0$ betrachtet.

3 Ergebnisse

3.1 Simulation verschiedener Lichtquellengeometrien

Im ersten Simulationslauf wurden drei verschiedene Lichtquellengeometrien untersucht. Der Abstand der Objektebene betrug $Z_0 = 500$ mm. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 aufgetragen. Das erste Szenario **IDEAL** (Abb. 4a) enthält eine LED im Kamerazentrum. Das zweite Szenario **PMD19k** (Abb. 4b) simuliert die Lichtquelle der PMD19k-Kamera und das dritte Szenario **RING** einen um das Kamerazentrum zentrierten Ring von 80 LEDs mit Radius 69 mm (Abb. 3b). Der Radius des Kreises entspricht dem Abstand der Schwerpunkte der beiden Teillichtquellen der PMD19k. Abb. 4d zeigt Schnitte durch die PMD- und KREIS-Daten entlang der in Abb. 4bc schwarz markierten Linien.

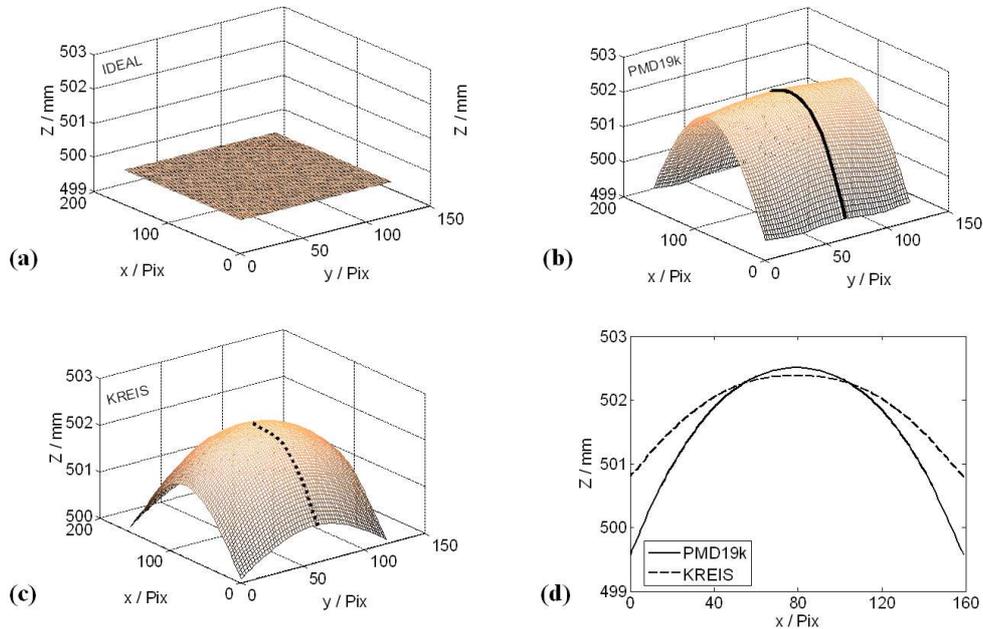


Abb. 4: Simulation dreier Lichtquellengeometrien: (a) IDEAL (b) PMD19k (c) KREIS (d) Schnitte durch (b) und (c) entlang der schwarz eingezeichneten Linien

Erwartungsgemäß reproduzieren die Ergebnisse im Szenario IDEAL die Objektebene, d.h. für alle Bildpunkte wird $Z = Z_0$ gefunden, da Hin- und Rückweg des Lichts identisch sind. In den beiden anderen Szenarien zeigen sich systematische Abweichungen vom Idealfall. Sie folgen in beiden Fällen der Symmetrie der Lichtquelle: Bei KREIS sind sie radialsymmetrisch, bei PMD19k spiegelsymmetrisch bezüglich der y-Achse. Die größten Abwei-

chungen zum Sollwert sind in der Bildmitte zu finden (PMD19k: 2.5mm, KREIS: 2.37 mm), zum Bildrand hin wird die Abweichung geringer. Die Minima sind -0.58 mm für PMD-19k und -0.01mm für KREIS, jeweils in den Ecken.

3.2 Abhängigkeit von Z_0

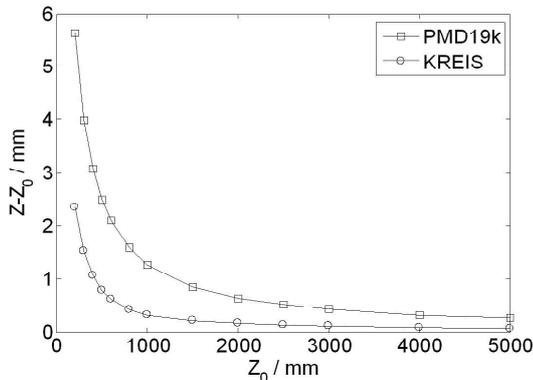


Abb. 5: Abstandsabhängigkeit des systematischen Fehlers in der Bildmitte.

Eine weitere Simulation untersucht die Abhängigkeit der Abweichungen vom Abstand Z_0 für die beiden Szenarien PMD19k und KREIS. Dazu wurden die Z_0 -Werte im Intervall [200 mm, 5000 mm] variiert. In Abb. 5 ist der Verlauf von $\Delta Z(Z_0)$ für beide Szenarien aufgetragen. Der qualitative Verlauf der Kurven entspricht dem des Modells aus Abschnitt 1, die gefundenen ΔZ -Werte sind jedoch durchwegs kleiner. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der mittlere Abstand der LEDs für beide Konfigurationen geringer ist als die im Modell angenommenen 100mm. Für alle Abstände sind zudem die ΔZ -Werte des

KREIS-Szenarios kleiner als die von PMD19k, obwohl durch die Wahl des Radius von 69 mm der mittlere Abstand der LEDs vom Kamerazentrum in beiden Szenarien identisch ist.

3.3 Abhängigkeit vom Abstrahlverhalten der LEDs

Um zu klären, welchen Einfluss die Winkelverteilung des verwendeten LED-Typs auf die Messabweichungen besitzt, wurde im Szenario PMD19k das Abstrahlverhalten der LEDs modifiziert: Als Intensitätsverteilungen wurden Gaußverteilungen mit Halbwertsbreiten von 10° , 25° , 50° und 75° verwendet (Abb. 6a). Abb. 6b zeigt die erhaltenen Schnitte durch das Entfernungsbild, entlang der in Abb. 4b gezeigten Linie. Es zeigt sich eine signifikante Abhängigkeit der Resultate vom Abstrahlverhalten der LEDs: Zwar bleibt der gefundene Maximalwert in der Bildmitte nahezu konstant, der Abfall zum Bildrand hin wird jedoch mit steigender Breite der Abstrahlkurve stetig kleiner. Dieses Verhalten kann wie folgt erklärt werden: Bei schmalen Winkelverteilungen tragen nur die LEDs signifikant zur Phase eines Objektpunkts bei, die diesen Punkt unter einem hinreichend kleinen Winkel sehen. Umgekehrt werden LEDs deren Licht in einem größeren Winkel auftritt in der Mittelung unterdrückt. In der PMD19k Konfiguration führt dies an den rechten und linken Bildrändern dazu, dass nur das benachbarte Leuchtfeld zur Mittelung beiträgt und die gemessene Entfernung abfällt. Bei breiten Winkelverteilungen, tragen auch am Bildrand LEDs beider Leuchtfelder zur Mittelung bei, der Abfall zum Rand hin wird daher kleiner.

3.4 Vergleich mit realen PMD-Bildern

Zum Vergleich von realen und simulierten PMD-Aufnahmen, wurde mit einer PMD19k-Kamera eine weiße Ebene im Abstand von 500 mm, als Mittelwert von 50 Einzelbildern,

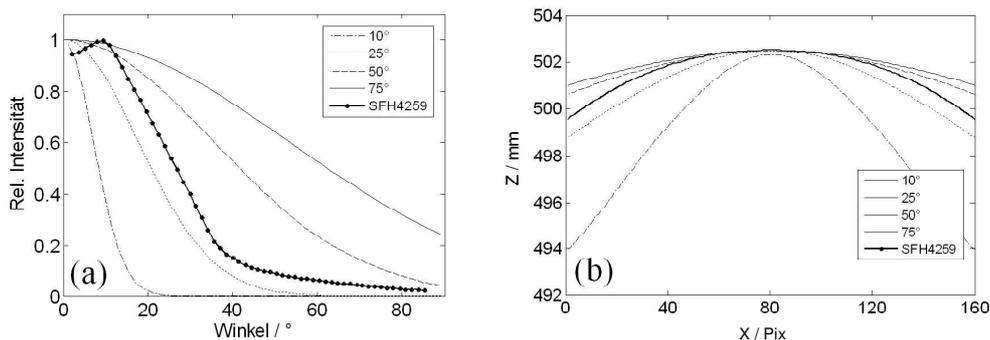


Abb. 6: Einfluss des LED-Abstrahlverhaltens für die PMD19k-Lichtquellengeometrie (a) Winkelverteilungen (b) Schnitte durch die Ergebnisbilder, entlang der in Abb. 4b markierten Linie

aufgenommen. Die Aufnahme (Abb. 7a) zeigt einen derart ausgeprägten Fixed-Pattern-Noise, dass ein direkter Vergleich zu den Simulationen nicht sinnvoll erscheint. Dieses Problem lässt sich jedoch umgehen: In einer zweiten Aufnahme, ebenfalls über 50 Bilder gemittelt, war das rechte LED-Feld der Kamera abgedeckt. Durch Subtraktion der beiden Bilder lassen sich alle systematische Einflüsse entfernen die nicht auf die Änderung der Lichtquellengeometrie zurückzuführen sind. Die Ergebnisse dieser Prozedur sind in Abb. 7b zu sehen, Abb.7c zeigt zum Vergleich die Ergebnisse einer entsprechenden Simulation. Die beiden Bilder zeigen eine qualitative Übereinstimmung, jedoch unterschätzt die Simulation den Anstieg zum rechten Rand hin um ca. 5mm. Dies deutet darauf hin, dass beim Ablenden des Leuchtfeldes noch andere, nicht-geometrische Effekte eine Rolle spielen. Da sich durch das Abdecken des Leuchtfeldes die Intensitätsverteilung auf der Ebene ändert, könnte dieser Effekt von der von (SABOV 2007) untersuchten Abhängigkeit der gemessenen Entfernung von der Lichtintensität herrühren.

4 Diskussion und Ausblick

Motiviert durch potentielle Anwendungen in der industriellen Fertigungskontrolle wurden in der vorliegenden Arbeit die Effekte der Lichtquellengeometrie auf PMD-Messungen im Nahbereich ($< 1\text{m}$) untersucht. Es wurde gezeigt, dass diese Effekte für Objektentfernungen unter einem Meter die Entfernungsmessung von PMD-Kameras signifikant beeinflussen. Dabei spielt sowohl die räumliche Anordnung der LEDs, als auch deren Abstrahlverhalten eine Rolle. Für die untersuchten Konfigurationen waren die Abweichungen bei $Z_0 = 500\text{mm}$ mit 2,5 mm noch an der Auflösungsgrenze der aktuellen Kamerageneration, lassen sich aber wie in 4.4 gezeigt auch bei älteren Kameramodellen zumindest qualitativ nachweisen. Für die in der industriellen Fertigungskontrolle erforderlichen Entfernungsauflösungen im mm-Bereich sind jedoch Verfahren zur Korrektur dieser Fehler – oder entsprechend optimierte Lichtquellen nötig. Wie die vorliegenden Simulationen zeigen, eignen sich dazu insbesondere kreisförmige LED-Anordnungen und LEDs mit breiter Winkelverteilung. Durch die Verkleinerung des Radius der Lichtquelle können die systematischen Fehler zudem weiter verkleinert werden. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Lichtquellengeometrie nur einen kleinen Teil der systematischen Fehlerquellen des PMD-

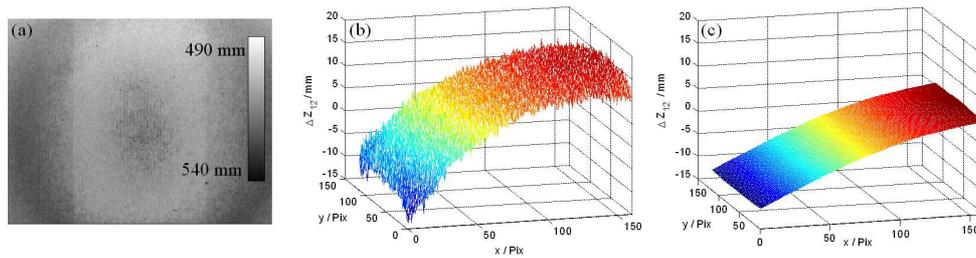


Abb. 7: Vergleich von Simulation mit realen Aufnahmen. (a) Bild einer Ebene bei $Z_0 = 500$ mm, aufgenommen mit PMD19k, über 50 Bilder gemittelt. (b) Differenz zwischen einer Aufnahme mit abgedeckten Leuchtfeld und einer Aufnahme mit voller Beleuchtung (c) Simulation von (b).

Abbildungsprozesses ausmacht und eine Optimierung die Gesamtheit der Fehler minimieren sollte. An dieser Stelle stößt die rein geometrische Simulation an ihre Grenzen, für die weitere Optimierung müssen daher, wie z.B. in (PETERS 2007), auch die Details des PMD-Messprozesses in die Simulationen einbezogen werden.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Konrad Sandau und Matthias Schröter für die gründliche Durchsicht des Manuskripts.

6 Literatur

- LANGE, R. (2000): *3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology*; Dissertation Universität Siegen, 2000
- LINDNER, M., A. KOLB, T. RINGBECK (2008): *New Insights into the Calibration of ToF-Sensors*, In IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Workshop on ToF Camera based Computer Vision (TOF-CV), 2008, pages 1-5
- PETERS, V. et al. (2007): *Modeling and Bistatic Simulation of a High Resolution 3D PMD-Camera*, EUROSIM 2007 (6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation), Ljubljana, Slovenia, 9.-13.09.2007.
- RAPP, H. (2008): *Experimental and Theoretical Investigation of Correlating TOF-Camera Systems*, Diplomarbeit am Institut für Wissenschaftliches Rechnen / Prof. Dr. Jähne (IWR), Universität Heidelberg 2008
- SABOV, A., J. KRÜGER, J. (2007): *Improving the Data Quality of PMD-based 3D Cameras*, in Lensch, H.P.A. ; Max-Planck-Institut für Informatik, Saarbrücken: Vision, modeling, and visualization 2007. November 7 - 9, 2007, Saarbrücken, Germany/VMV 2007
- SCHWARTE, R. et al. (1997), *New optical four-quadrant phase-detector integrated into a photogate array for small and precise 3D-cameras*, SPIE Proceedings Vol. 3023, S. 119, 1997