

Untersuchungen zum Genauigkeitspotenzial einer 3D-TOF-Kamera¹

Studies on the Accuracy Potential of a Time-of-Flight Camera

Christian Wülbern, Christian Jepping

In diesem Beitrag werden Untersuchungen zum Genauigkeitspotenzial einer 3D-TOF²-Kamera (PMD³ CamCube 3.0), die in einem Masterprojekt an der Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth in Oldenburg durchgeführt wurden, beschrieben. Die Ergebnisse geben Aufschluss über das Aufwärmverhalten und das Distanzmessverhalten unter verschiedenen Bedingungen, wie beispielsweise die Auswirkung der Belichtungszeit auf die Distanzmessung. Hierzu sind verschiedene Messreihen realisiert und ausgewertet worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen führen zu einem Messverfahren zur Verbesserung des Distanzrauschens.

Schlüsselwörter: TOF-Kamera, Genauigkeitsuntersuchung

This article presents different investigations on the accuracy potential of a time-of-flight camera (PMD CamCube 3.0), carried out within a master project at the Jade University of Applied Sciences Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth in Oldenburg. The analyses focus an insight about the warm-up conditions of the camera and its accuracy of the distance measurement under changing conditions, for example the effect of the chosen exposure time on its distance measurement. With respect to this different tests are performed and analysed. The results lead to a method on the improvement of the distance noise.

Keyword: Time-of-flight camera, accuracy analyses

1 MOTIVATION

Dreidimensionale Informationen werden in immer mehr Bereichen eingesetzt. Immer wichtiger wird dabei, dass Sensoren in kurzer Zeit komplette Szenen erfassen können und 3D-Informationen hierzu möglichst in Echtzeit ausgeben können. Für diese Anforderungen eignen sich 3D-TOF-Kameras, die Szenen mit mehr als 40000 Pixeln und bis zu 40 Bildern pro Sekunde in dieser Auflösung erfassen können, wie beispielsweise die PMD CamCube 3.0 /PMD Technologies 2009/.

Diese 3D-TOF-Kameras werden in vielen Bereichen eingesetzt, wie zum Beispiel in der Medizin zur Patientenpositionierung bei verschiedenen Anwendungen wie Bestrahlungen /Ringbeck 2009/. Zudem finden sie auch Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Fahrzeugsicherheit. Hier wird zum einen bei drohender Gefahr die Position der einzelnen Insassen ermittelt, um einen optimalen Einsatz der Sicherheitstechnik im Fahrzeug zu gewährleisten. Zum anderen können diese Systeme helfen, Unfälle durch Reaktionen wie einen aktiven Bremsengriff zu verhindern /Schöpp et al. 2007/.

Mit immer leistungsstärker werdenden Modellen, wie auch der hier untersuchten PMD CamCube 3.0, erschließen sich neue Genauigkeitspotenziale und entsprechende Einsatzmöglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen zum Genauigkeitspotenzial und zu möglichen Anwendungsbereichen für ein solches Kamerasystem an der Jade Hochschule in Oldenburg aufgezeigt. Die Arbeiten erfolgten im Rahmen eines Masterprojektes des Masterstudienganges „Geodäsie und Geoinformatik“. Im Folgenden werden insbesondere die Distanzmessung und ihre Einflüsse aus der Umgebung des Messobjektes und des Kamerasystems untersucht. In diesem Rahmen werden optimale Belichtungszeiten und erreichbare Messgenauigkeiten bei verschiedenen Entfernungen und Oberflä-

¹ Überarbeitete Fassung des im Tagungsband „Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012“ (Hrsg. Th. Luhmann, Ch. Müller), Wichmann, VDE-Verlag, Seite 383 ff. veröffentlichten Beitrages.

² Time of flight

³ Photomischdetektor

chenfarben festgestellt. Abschließend wird ein Ansatz zur Verringerung des Messrauschens in den Aufnahmen in Anlehnung an die HDR⁴-Bilder vorgestellt. Grundgedanke der HDR-Fotografie ist, ein Ergebnisbild mit erhöhtem Dynamikbereich zu generieren.

2 PMD-TECHNOLOGIE

Prof. Dr.-Ing R. Schwarte patentierte im Jahr 1996 einen von ihm entwickelten Photomischdetektor /Schwarte 1996/. Dieser Sensor vermag zusätzlich zur Diskretisierung einer Szene in Form von Grauwerten Streckenmessungen für jedes Pixel zum korrespondierenden Objektpunkt durchzuführen. Die Berechnung erfolgt nach dem Prinzip des Time of flight, bei dem die Lichtlaufzeit bestimmt und daraus die Raumstrecke zum entsprechenden Punkt abgeleitet wird. Dabei wird die aufzunehmende Szene mit moduliertem infraroten Licht beleuchtet, das mittels entsprechenden Infrarot-LEDs emittiert wird. Das diffus zurückstrahlende Licht beinhaltet die Entfernungsinformation aufgrund von verschiedenen Laufzeiten in Form von unterschiedlichen Phasenverzögerungen des Intensitätsverlaufes /Schneider 2003/. Im PMD-Chip werden nun das elektronische Referenzsignal (ausgesendetes Signal) und das zurückgestrahlte optische Messsignal miteinander verglichen. Dabei ist die Phase des zurückgestrahlten Signals um den Betrag verschoben, der aus der Laufzeit des Signals zwischen Kamera und Objekt resultiert.

Das hier untersuchte Kameramodell der Firma PMD – CamCube 3.0 – kann nach Herstellerangaben eine Wiederholgenauigkeit von 3 mm bei einer Entfernung von maximal 4 m und einer Reflektivität von 75 % erreichen. Dieses Modell verfügt über den Sensor Photonics® 41k-S mit 204 x 204 Pixel, der zwischen 0,3 m und 7,5 m Aufnahmedistanz eindeutige Distanzen bestimmen kann /PMD Technologies 2009/.

⁴ High Dynamic Range

3 UNTERSUCHUNG ZUR STABILITÄT DER MESSWERTE

Im Folgenden werden die Untersuchungen erläutert, die sich aus dem Einfluss der Umgebung und der Belichtungszeit auf eine Messung ergeben. Weiterhin wurden die Stabilität der Messwerte während der Aufwärmphase der Kamera und das Messrauschen des PMD-Chips nachgewiesen.

3.1 Stabilität der Messwerte während der Aufwärmphase

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde insbesondere die Stabilität der Entfernungsmesswerte der Pixel während der Aufwärmphase näher betrachtet /Benkner 2011/. Dieses geschah durch Erfassung einer weißen Wand in 100 Epochen mit einer Frequenz von einer Aufnahme pro Minute. Dabei befand sich die Kamera nahezu lotrecht vor der Wand in einer typischen Aufnahmeentfernung von ca. 2,5 m. Diese Messwerte der 100 Epochen wurden auf Veränderungen untersucht, die auf Aufwärmefekte zurückzuführen sind. Hierfür wurden die Differenzen zwischen den einzelnen Pixeln der Epoche 1 und der einzelnen Folgeepochen berechnet und darüber die mittleren Differenzen für jede Epoche gebildet. Die Ergebnisse der Mittelwerte sind *Abb. 1* zu entnehmen. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Streckenmessung in der Anfangszeit der Inbetriebnahme der CamCube 3.0 um ca. 5 cm vergrößert. Besonders in den ersten 20 Minuten ist ein Zuwachs von ca. 4 cm erkennbar, der sich ungefähr bis zur 45. Minute auf 5 cm vergrößert. Danach ist lediglich eine Variation im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit von 3 mm erkennbar.

Als Konsequenz aus dieser Versuchsreihe wird eine Aufwärmphase von mindestens 50 Minuten für die PMD CamCube 3.0 empfohlen, die für sämtliche folgenden Versuche eingehalten wurde.

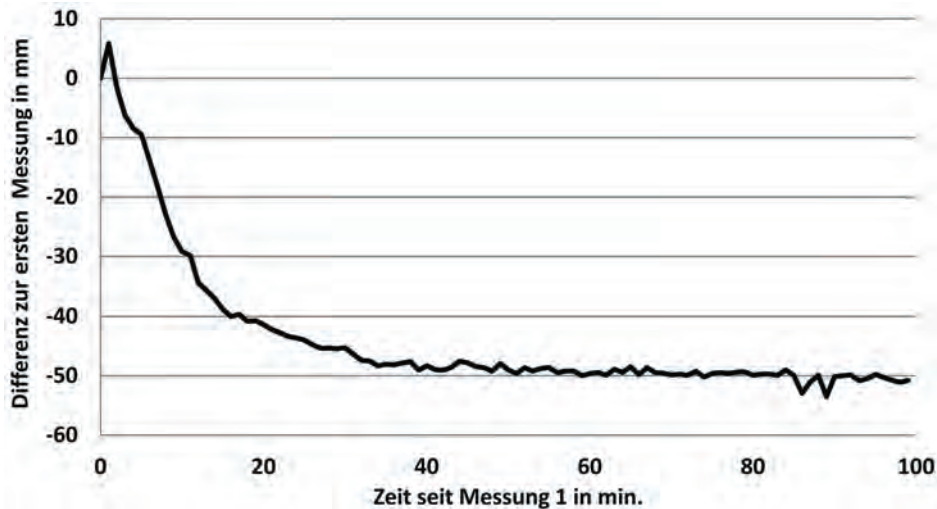


Abb. 1 | Variation der Streckenmessung nach Inbetriebnahme der PMD CamCube 3.0

3.2 Messrauschen der Pixel des PMD

Bei dieser Untersuchung wurde die Standardabweichung der einzelnen Pixel des Messsensors ermittelt. Zentrale Fragestellungen sind hier die Größenordnungen der Standardabweichung und das Aufdecken eventueller Systematiken. Hierfür wurden 20 aufeinanderfolgende Bilder der Messreihe des Langzeitversuches entnommen, die deutlich nach der Aufwärmphase entstanden sind (Abschnitt 3.1). Im Anschluss wurde die Standardabweichung eines jeden Pixels über alle 20 Aufnahmen berechnet und in der *Abb. 2* dargestellt. Im Zentrum des Sensors befindet sich eine Zone mit geringster Standardabweichung ≤ 5 mm. Um diese Zone herum ist ein Ring mit einer Standardabweichung zwischen 5 und 10 mm erkennbar. Die höchsten Standardabweichungen können in den Ecken festgestellt werden, die vereinzelt Werte bis zu 20 mm erreichen können. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Standardabweichungen einem radial-symmetrischen Einfluss unterliegen. Dieser Einfluss könnte aus einem Lichtabfall am Rand nach dem sogenannten \cos^4 -Gesetz resultieren /Luhmann 2010/.

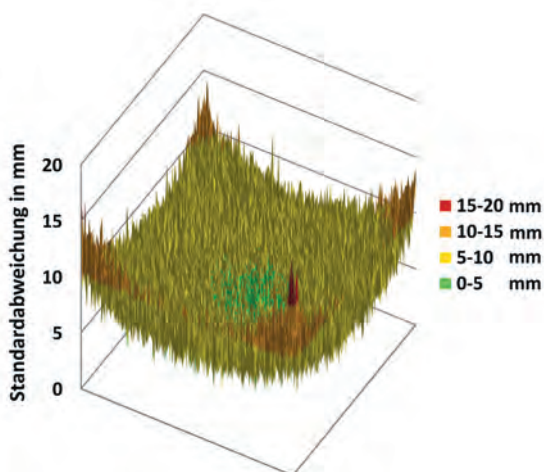


Abb. 2 | Standardabweichungen der Pixel des PMD [mm]

3.3 Auswirkung der Belichtungszeit auf die Messgenauigkeit

In dieser Untersuchung der PMD CamCube 3.0 sollte geklärt werden, welchen Einfluss die Belichtungszeit auf die Messgenauigkeit hat. In verschiedenen Quellen wird erwähnt, dass eine „Unterbelichtung zu starkem Rauschen führt“ und bei „einer Überbelichtung kein zuverlässiger Distanzmesswert ermittelt werden kann“ /Benkner 2011/. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurde eine weiße ebene Wand aus verschiedenen Abständen unter Variation der Belichtungszeit erfasst. Anschließend wurden ausgleichende Ebenen aus den resultierenden Punktwolken approximiert und die Standardabweichungen der Ebenenausgleichungen als Beurteilungskriterium herangezogen. Die berechneten Standardabweichungen eines typischen Beispiels werden in *Abb. 3* in Abhängigkeit von der Belichtungszeit dargestellt. Erkennbar in diesem Beispiel ist ein Minimum der ermittelten Standardabweichungen mit ca. 8,5 mm bei 1 ms Belichtungszeit. Bei kürzerer bzw. längerer Belichtungszeit steigen die Werte auf mehr als 75 mm. Die Ergebnisse weiterer Vergleichsmessungen zeigen ähnliche Verläufe. Es ist zu beobachten, dass bei zunehmender Entfernung die Minima bei höheren Belichtungszeiten auftreten. Analog dazu verhält es sich bei kürzeren Entfernungen, hier tritt das Mini-

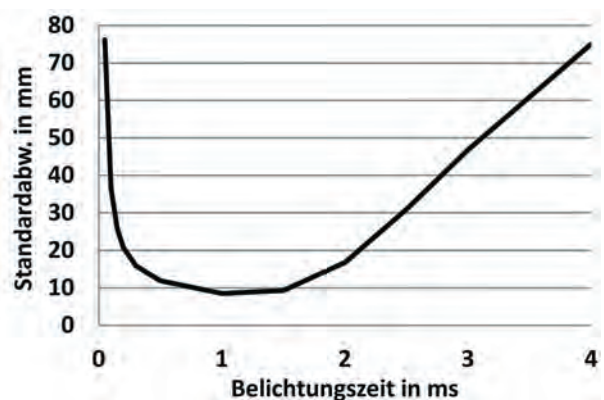


Abb. 3 | Zusammenhang zwischen Standardabweichung (ausgegl. Ebene) und Belichtungszeit

zum bei geringeren Belichtungszeiten auf (Abb. 4). Diese Erkenntnisse zeigen, dass für weiterführende Messungen vorerst optimale Belichtungszeiten für die entsprechenden Entfernungen bestimmt werden müssen, um so Fehlereinflüsse aufgrund falsch gewählter Belichtungen zu minimieren. Daraus kann geschlossen werden, dass Messgenauigkeiten von der Lichtmenge abhängen, die den Sensor erreichen. Daher könnten verschiedene Belichtungszeiten bei unterschiedlichen Reflektanzen bei gleichen Messentfernungen erforderlich sein, um adäquate Genauigkeiten zu erzielen.

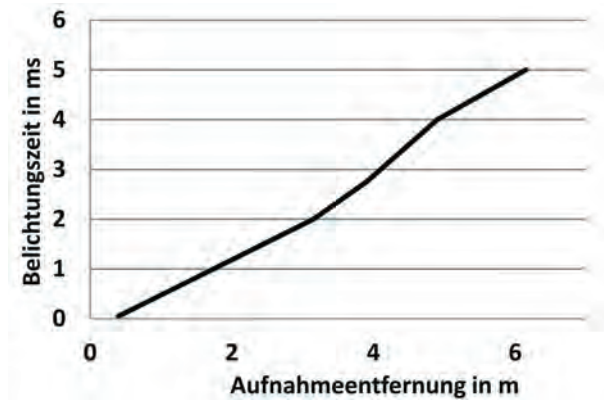


Abb. 4 | Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Entfernung

4 UNTERSUCHUNGEN ZUR DISTANZMESSUNG AUF EINER KOMPARATORSTRECKE

In diesem Kapitel werden Untersuchungen und daraus resultierende Ergebnisse dargestellt, die im Rahmen von Messungen auf einer Komparatorstrecke in Anlehnung an die Untersuchung von /Kahlmann 2007/ erfolgten. Diese Messungen auf der Komparatorstrecke dienen der Bestimmung der optimalen Belichtungszeit und Ebenenbestimmungen bei verschiedenen Messentfernungen und der Quantifizierung der Distanzmessgenauigkeit mittels relativ gemessener Strecken.

Das Datenmaterial, das den folgenden Untersuchungen zu Grunde liegt, wurde mittels des Messaufbaus aus Abb. 5 wie folgt erfasst: Mithilfe eines Schlittens wurden auf einer Komparatorstrecke Sollpositionen angefahren. Auf diesem Schlitten befindet sich eine ebene Messtafel, die im Rahmen der Messungen mit verschiedenen Oberflächenfarben bei gleicher Oberflächenart ausgestattet wurde. Hierfür wurden die Farben Schwarz, Weiß, Rot, Grün, Blau und Grau genutzt. Die Kamera befindet sich in Verlängerung der Komparatorstrecke, sodass die optische Achse parallel zur Komparatorstrecke verläuft und diese das Zentrum der Zieltafel durchstößt. Im Anschluss wurden Messungen der Messtafel an den jeweiligen Sollpositionen durchgeführt. Jede Position wurde durch ein breites Spektrum an Belichtungszeiten erfasst. Nachdem alle Sollpositionen auf der Komparatorstrecke angefahren und erfasst wurden, wurde das Zielzeichen mit einer neuen Oberflächenfarbe ausgestattet und es wurden erneute Messungen der Sollpositionen mit der neuen Oberflächenfarbe durchgeführt. Für die weiteren Auswertungen stehen relative Sollstrecken mit Bezug auf die übergeordnet genau vermessene Komparatorstrecke, bezogen auf die erste Sollposition, zur Verfügung.



Abb. 5 | Messanordnung bei Untersuchungen auf der Komparatorstrecke

4.1 Bestimmung der jeweiligen optimalen Belichtungszeit

Da die Messtafel an sämtlichen Sollpositionen mit einem breiten Spektrum an verschiedenen Belichtungszeiten erfasst wurde, konnte die Bestimmung der optimalen Belichtungszeit in Abhängigkeit zur jeweiligen Aufnahmeentfernung und der Oberflächenfarbe bestimmt werden. Für die Ermittlung wird vorausgesetzt, dass die optimale Belichtung dann erreicht ist, wenn die ermittelte Standardabweichung der ausgeglichenen Ebene der Messpunkte auf der Zieltafel minimal ist (Abschnitt 3.3). Das Ergebnis der Auswertung wird in *Abb. 6* dargestellt.

Das Ergebnis zeigt, dass zwischen den Farben Weiß, Rot, Grün, Blau und Grau lediglich ein geringer Unterschied der optimalen Belichtungszeit bei den entsprechenden Entfernungen auftritt. Lediglich Schwarz benötigt eine weitaus höhere Belichtungszeit. Dies kann mit

der deutlich geringeren Reflektanz der Oberfläche in Zusammenhang gebracht werden.

4.2 Ergebnisse zur Messgenauigkeit bei unterschiedlichen Entfernungen

Im Rahmen der Messgenauigkeit wurde zum einen die Genauigkeit der Streckenmessung in unterschiedlichen Entfernungen und Oberflächenfarben mithilfe von Relativstrecken untersucht, um Aufschluss über die jeweilige Streckenmessgenauigkeit in Abhängigkeit zur gemessenen Strecke zu ermitteln. Hierfür fanden die jeweils mittleren 16 Pixel des Sensors Anwendung. Zum anderen wurden die Standardabweichungen der ausgeglichenen Ebenen an den verschiedenen Sollpositionen untersucht. Sie können u.a. als Indikatoren für eine Beurteilung der Ebenenabweichungen bei unterschiedlichen Entfernungen und verschiedenen Oberflächenfarben dienen. Bei einer Auswertung der Differenzstrecken ist eine deutliche Systematik festzustellen (*Abb. 7*). Für gut reflektierende Oberflächen, wie hier im Beispiel Rot, Grün, Blau und Hellgrau, resultiert eine weitestgehend gleichbleibende Streckenabweichung zur Sollstrecke. Dem gegenüber steht eine schwarze Oberfläche, die eine deutliche Änderung gegenüber den soeben aufgeführten Farben aufweist. Diese konnte lediglich mit einem Verfahren aufgenommen werden, welches in Abschnitt 5 näher beschrieben wird. Eine von der Reflektanz der Oberfläche abhängige Streckenabweichung ist bereits in der Literatur bekannt. Dieser Effekt wird intensitätsabhängiger Effekt genannt. Nach /Lindner 2010/ ist die genaue Ursache für diese Streckenabweichungen nicht geklärt. Es wird jedoch ein Zusammenhang mit dem nicht-linearen Verhalten von Halbleitern vermutet.

Die Ergebnisse der ausgeglichenen Ebenen bei verschiedenen Entfernungen zeigt *Abb. 8*. Es wird deutlich, dass die Genauigkeiten im Wesentlichen von der Entfernung abhängen. So liegen die Standardabweichungen im Nahbereich bis 4 m bei ca. 4 bis 5 mm. Bei steigender Entfernung wächst die Standardabweichung auf ca. 7 mm an. Ein Einfluss der verschiedenen Oberflächenfarben ist nicht erkennbar.

Des Weiteren kann aufgrund der Ergebnisse, die aus den Ebenenausgleichungen resultieren, davon ausgegangen werden, dass es

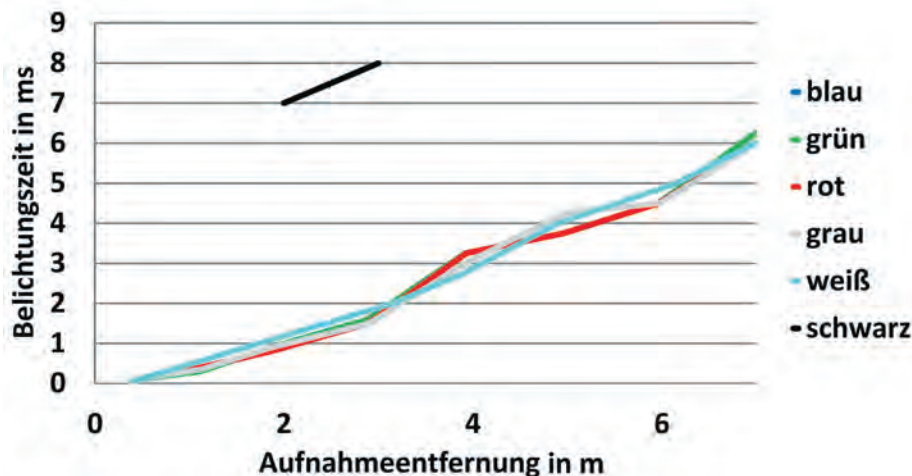


Abb. 6 | Zusammenhang zwischen optimaler Belichtungszeit (bei verschiedenen Oberflächenfarben) und steigender Aufnahmeentfernung

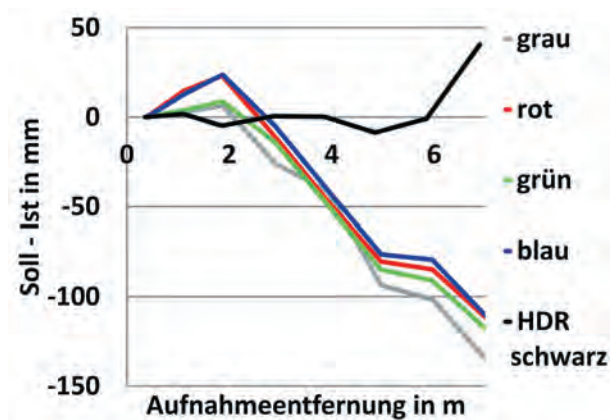


Abb. 7 | Soll-Ist-Vergleich der Streckendifferenzen

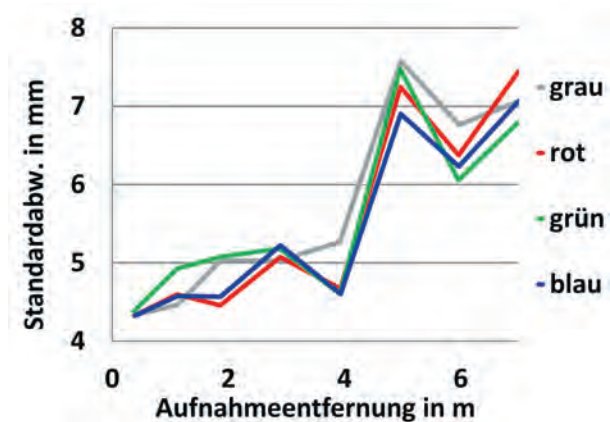


Abb. 8 | Standardabweichungen der ausgeglichenen Ebenen bei verschiedenen Entfernungen

sich bei den Messabweichungen aus *Abb. 7* um eine Systematik handeln muss. Mögliche Gründe könnten hierfür ein zyklischer Phasenfehler und ein Maßstabsfaktor sein.

5 EIN ANSATZ ZUR GENAUIGKEITSSTEIGERUNG

Die Erkenntnisse aus den Abschnitten 3 und 4 haben gezeigt, dass die Belichtungszeit Einfluss auf die Messgenauigkeit hat. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass nicht alle Szenenteile einer Aufnahme identische Belichtungseigenschaften aufgrund verschiedener Oberflächenarten und -ausrichtungen aufweisen. Daraus resultieren verschiedene optimale Belichtungszeiten für verschiedene Szenenteile. Um nun das Messrauschen im gesamten Bild zu minimieren, ist es notwendig, die Belichtungszeit für alle Szenenteile in der gesamten Aufnahme zu optimieren. Um diese Optimierung umsetzen zu können, wird eine Szene mittels diverser Bilder in verschiedenen Belichtungszeiten erfasst. Dies geschieht in Anlehnung an die HDR-Fotografie. In diesem Rahmen werden anschließend die optimal belichteten Pixel aus den einzelnen Aufnahmen extrahiert und in ein Ergebnisbild eingesetzt. Das Ergebnisbild weist nur optimal belichtete Pixel auf, die die zuvor festgelegten Grenzwerte erfüllen. Die entsprechenden Parameter mit ihren Grenzwerten wurden zuvor mithilfe der Messdaten, die auf der Komparatorstrecke ermittelt wur-

den, bestimmt. In diesen Messdaten wurde festgestellt, dass höchste Genauigkeiten nur in einem kleinen Wertebereich der Intensitätswerte erreicht werden konnten. Dieser liegt unmittelbar vor dem Einschalten der SBI⁵-Funktion der PMD Kamera. Es kann nachgewiesen werden, dass bei steigender Überbelichtung das Messrauschen zugenommen hat (Abschnitt 3.3). Das Gleiche ist bei einer Unterbelichtung festzustellen. Somit ist es für ein optimales Rauschverhältnis erforderlich, die Intensitäten auf einem möglichst hohen Wert unterhalb des Einschaltpunktes der SBI-Schaltung zu halten. Da die Intensitätswerte stark von der Belichtung einer Szene abhängen, bedeutet das, dass die Belichtung für einzelne Szenenteile optimiert werden muss.

Ein erster Versuch mit dem vorgestellten HDR-Verfahren ist vielversprechend (Abb. 9 Originalaufnahme und Abb. 10 HDR-Bild). So werden stark rauschende Pixel nicht in das Ergebnisbild überführt. Das ist von Vorteil, wenn mehrere Aufnahmen einer Szene miteinander

⁵ Suppression of Background Illumination. Verringert die Sensorsättigung, sodass die Kamera auch beispielsweise im Freien bei intensivem Sonnenlicht eingesetzt werden kann.

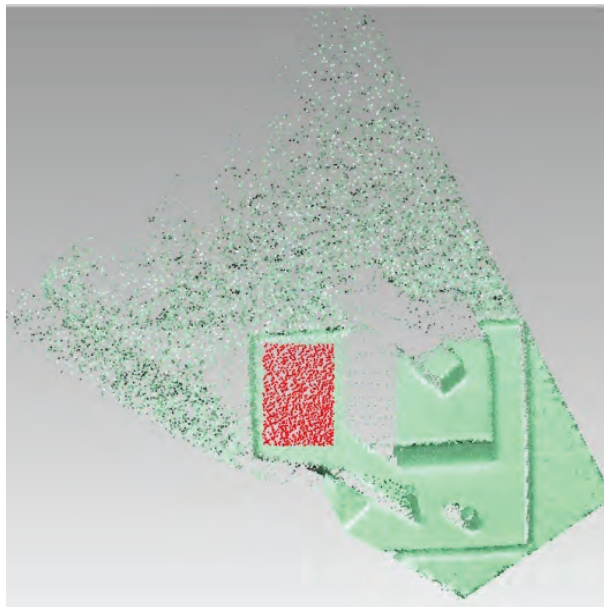


Abb. 9 | Standardbild des Testfeldes

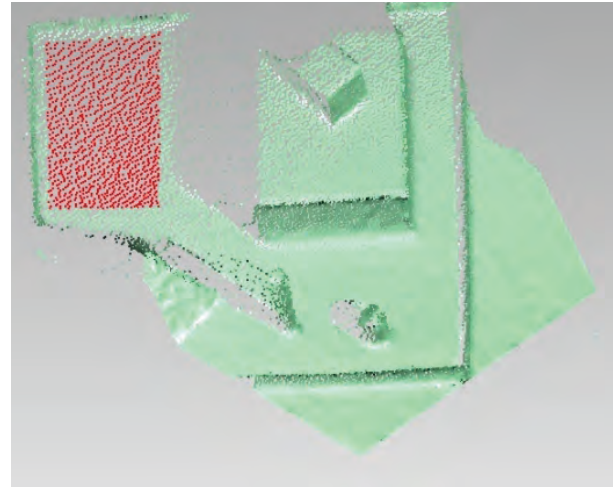


Abb. 10 | HDR-Bild des Testfeldes

der verknüpft werden. So kann die Genauigkeit der gesamten Punktwolke gesteigert werden, da stark verrauschte Informationen verworfen werden. Zudem zeigt sich, dass das Messrauschen auf der Oberfläche deutlich verringert werden kann. Um dies darzustellen, wurden Standardabweichungen für zwei vergleichbare Ebenen einer Szene in einem Standardbild und in einem HDR-Bild im Rahmen einer Ebenenausgleichung berechnet (siehe rote Punktwolken in Abb. 9 und Abb. 10). Es zeigt sich, dass die Standardabweichung im HDR-Bild mit 2,8 mm deutlich geringer ausfällt als die im Standardbild mit 5,5 mm. Zudem scheint die gesamte Oberfläche des Prüffeldes glatter zu sein.

Nach diesen ersten erfolgreichen Versuchen mit den HDR-Bildern zeichnet sich ein Optimierungspotenzial bei der Anzahl der für die HDR-Bilder verwendeten Bilder ab. Zur Klärung der erforderlichen Anzahl von Bildern, die verwendet werden müssten, wurden Belichtungsreihen in unterschiedlichen Entfernungen durchgeführt. Hierbei wurde für jede Entfernung das optimale Belichtungsintervall definiert. Es zeigt sich, dass bei steigender Belichtungszeit ein zulässiges optimales Intervall wächst (Abb. 11).

Aus diesem Zusammenhang lässt sich ableiten, dass bei zunehmender Belichtungszeit ein größerer Unterschied in der Belichtungszeit zweier aufeinanderfolgender Bilder zulässig ist.

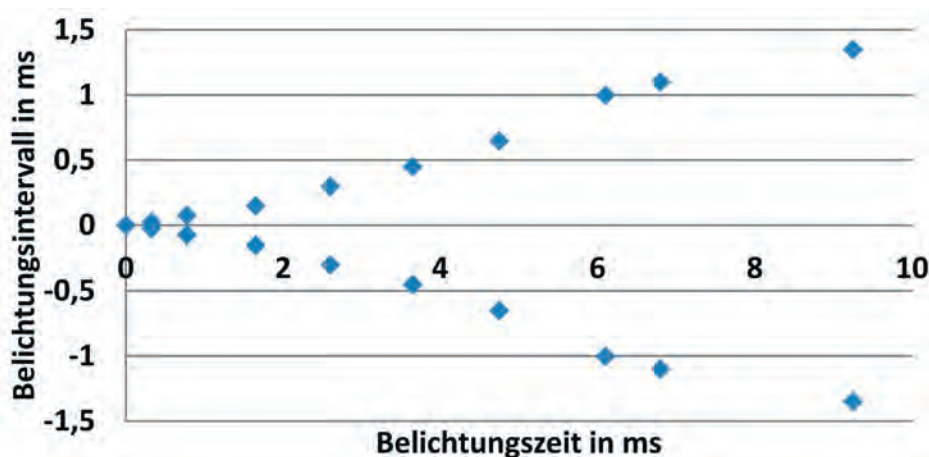


Abb. 11 | Bereich einer optimalen Belichtung mit Intensitätswerten zwischen 20000 und 25000 je Belichtungseinstellung

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Intervall neu zu definieren. Bei geringeren Anforderungen an das Messrauschen ist eine kleinere, untere Grenze der Intensitäten ratsam. Hierdurch könnte wiederum die Anzahl der benötigten Bilder gesenkt werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Untersuchungen zur Stabilität der Messwerte einer PMD CamCube 3.0 zeigen, dass sie eine Aufwärmzeit von ca. 50 Minuten benötigt, um gleichbleibende Messergebnisse zu erzielen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die zentral gelegenen Pixel des Messsensors eine Standardabweichung von ca. 5 mm aufweisen. Die Standardabweichung unterliegt dabei einem radial-symmetrischen Einfluss, der dazu führt, dass die Pixel in den Sensorecken die größten Standardabweichungen mit bis zu 20 mm aufweisen. Weiter konnte ein Zusammenhang zwischen der Belichtungszeit und der Erfassungsgenauigkeit einer Oberfläche festgestellt werden, der abhängig von der Messentfernung ist. Untersuchungen auf einer Komparatorstrecke wurden genutzt, um optimale Belichtungszeiten bei unterschiedlichen Entfernungen und Oberflächenfarben zu ermitteln. Dabei zeigte sich, dass die verschiedenen Farben keine Auswirkung in diesem Versuch auf die Belichtungszeit haben. Zudem konnte mithilfe dieser Messdaten festgestellt werden, dass Entfernungen im Nahbereich zu kurz und ab ca. 2 m Messentfernung zu lang gemessen werden. Dabei wird im Bereich bis ca. 4 m ein Messrauschen von ca. 4,5 mm festgestellt und in dem Bereich ab ca. 4 m bis zur maximalen Messentfernung ein Rauschen von ca. 7,5 mm.

Des Weiteren wurde ein Ansatz zur Verringerung des Messrauschens vorgestellt, der in Anlehnung an die HDR-Fotografie eine Szene in verschiedenen Belichtungszeiten aufnimmt. Danach werden aus diesen Bildern optimal belichtete Pixel entnommen und in ein Ergebnisbild eingesetzt. Erste Ergebnisse zeigen eine Reduktion des Messrauschens.

Die Ergebnisse dieses Beitrags zeigen, dass die PMD CamCube 3.0 Defizite bei der Entfernungsmessung aufweist, die es weiter zu untersuchen gilt. Es ist denkbar, dass Streckenkorrekturen in Form einer Korrekturfunktion beschrieben oder durch Korrekturwerte einer Look-Up-Table angebracht werden könnten. Zudem zeigt der Ansatz zur Verringerung des Messrauschens in Anlehnung an die HDR-Fotografie ein vielversprechendes erstes Ergebnis. Weitere Untersuchungen zum Einsatzpotenzial dieses Ansatzes werden folgen.

LITERATUR

Benkner, S. (2011): *Gestensteuerung und -lokalisierung mit einer PMD-Kamera*. Diplomarbeit, Institut für Informatik der Universität Würzburg, Würzburg.

Kahlmann, T. (2007): *Range Imaging Metrology: Investigation, Calibration and Development*. Dissertation, ETH Zürich No. 17392, Zürich.

Lindner, M. (2010): *Calibration And Real-Time Processing Of Time-Of-Flight Range Data*. Dissertation, Fachbereich 12, Elektrotechnik und Informatik, Siegen.

Luhmann, T. (2010): *Nahbereichsphotogrammetrie*. 3. Auflage, Berlin/Offenbach, Wichmann, ISBN 978-3-87907-479-2.

PMD Technologies (2009): *Datenblatt CamCube 3.0*, Siegen.

Ringbeck, T.; Profittlich, M.; Schaller, C. (2009): *Kameras für die dritte Dimension*. In: *Optik & Photonik*, 3/2009, 30-33.

Schneider, D. (2003): *Der Photomischdetektor zur schnellen 3D-Vermessung für Sicherheitssysteme und zur Informationsübertragung im Automobil*. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Siegen.

Schöpp, H.; Stiegler, A.; May, T.; Paintner, M.; Massanelli, J.; Buxbaum, B. (2007): *3D-PMD Kamerasysteme zur Erfassung des Fahrzeugumfelds und zur Überwachung des Fahrzeuginnenraums*. In: *VDI Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug*, 2007.

Schwarte, R. (1996): *Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle*. Patent, Veröffentlichungsnummer WO1998010255 A1, 1997.

Christian Wülbern, M. Sc.

GMA-WERKSTOFFPRÜFUNG GMBH

Ringstr. 9 | 27624 Bad Bederkesa
christian.wuelbern@web.de



Christian Jepping, M. Sc.

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE
PHOTOGRAMMETRIE UND GEOINFORMATIK

Ginsterweg 7 | 26127 Oldenburg
christian_jepping@web.de



Manuskript eingereicht: 21.03.2013 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet