

# Untersuchung zum messtechnischen Genauigkeitspotenzial einer Lichtfeldkamera

THOMAS LUHMANN, CHRISTIAN JEPPIG & BENJAMIN HERD

*Zusammenfassung: Der Beitrag befasst sich mit der messtechnischen Leistungsfähigkeit einer Lichtfeldkamera. Lichtfeldkameras erlauben die Erfassung einer 3D-Punktwolke mit nur einer Bildaufnahme. Dazu wird ein separates Mikrolinsenfeld zwischen Bildsensor und Objektiv angebracht, das ein virtuelles Zwischenbild auf den eigentlichen Bildsensor abbildet. In diesem Bild werden tiefenabhängige Parallaxen sichtbar, die sich durch Bildkorrelation messen lassen. Dazu ist eine hinreichende Oberflächentextur erforderlich. Die Genauigkeit der ermittelten 3D-Koordinaten liegt bei ca. 3,5mm in einer Aufnahmeentfernung von ca. 50cm.*

## 1 Einleitung

Als Lichtfeld bezeichnet man den dreidimensionalen Raum, in dem an jeder Position  $(X,Y,Z)$  die dort vorhandene Strahldichte  $L$  definiert ist. Die Verteilung dieser Strahldichte entlang von Lichtstrahlen wird auch als plenoptische Funktion  $L(X,Y,Z,\Theta,\phi)$  bezeichnet. Sie besitzt neben der Raumposition zwei Winkel, welche die Richtung des Lichtstrahls beschreiben. Man spricht von einem 4D-Lichtfeld, wenn die Funktion auf eine Referenzebene bezogen wird, in der die Strahldichte an jedem Punkt  $x,y$  definiert ist:  $L(x,y,\Theta,\phi)$  (JÄHNE, 2012). Mit einer Lichtfeldkamera (auch plenoptische Kamera genannt) nach Abbildung 1 wird nun ein Teil des Lichtfeldes aufgefangen und im Bildsensor so abgebildet, dass Farbwert, Raumrichtung und Entfernung eines Objektpunktes rekonstruierbar sind. So wird es möglich, nicht nur eine 3D-Beschreibung des aufgenommenen Objektes aus nur einem Bild abzuleiten, sondern auch nachträglich eine beliebige Fokusebene zu definieren. Damit kann ein auf eine beliebige Entfernung fokussiertes Bild berechnet werden bzw. die Schärfentiefe nachträglich erhöht werden.

Lichtfeldkameras haben mit Beginn der digitalen Fotografie ein reges Forschungsinteresse geweckt. Durch immer leistungsstärkere Computer und Grafikkarten ist es seit einigen Jahren möglich, die erforderlichen Berechnungen zur Bestimmung von z.B. refokussierten Bilder so zu beschleunigen, dass eine Echtzeitberechnung der Bilder möglich ist.

Zu den Anbietern solcher Lichtfeldkameras gehören u.a. Raytrix und Lytro. Die Anwendungsbereiche dieser Kameras reichen von der Inspektion von Bauteilen bis hin zur Fotografie. Durch die Erfassung von 3D-Informationen mit nur einer Kamera steht die Lichtfeldtechnik in Konkurrenz zu TOF-Kameras, Sensoren mit strukturiertem Licht (Streifen, Zufallsmuster) und photogrammetrischen Systemen (Stereo- oder Mehrbildsysteme). Übersichten über sog. 3D-, Range- oder Tiefenkameras finden sich u.a. in REMONDINO (2011) oder LANGMANN et al. (2012).

In diesem Beitrag wird das messtechnische Potential einer Lichtfeldkamera am Beispiel der Raytrix R5 untersucht. Dabei werden auf Basis der von der Raytrix-Software (RxLive) berechneten Tiefenkarten metrische Informationen abgeleitet und durch Referenzmessungen auf ihre Genauigkeit bezüglich der Kenngrößen aus der VDI/VDE 2634 untersucht. Als Ergebnis der Untersuchungen kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen einer Tiefenkarte der Lichtfeldkamera und der Einheit Meter hergestellt werden.

Der Beitrag stellt zunächst das Grundprinzip der Lichtfeldtechnik vor, so wie es in der untersuchten Kamera realisiert ist. Anschließend werden Ergebnisse von Genauigkeitstests präsentiert, die das Messvolumen, die erreichbare Genauigkeit und die Voraussetzungen an die Objektoberfläche näher beleuchten. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei ca. 3,5mm bei einer Messentfernung von 50cm, so dass das Aufnahmeprinzip derzeit nur für Anwendungen geringer Genauigkeitsanforderungen einsetzbar ist.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Funktionsprinzip

Eine plenoptische Kamera unterscheidet sich von einer herkömmlichen Kamera durch ein Mikrolinsenarray, welches sich nicht direkt auf der Sensoroberfläche befindet, sondern in einem definierten Abstand vor der Bildebene angebracht ist (Abbildung 1). Je nach Aufnahmeentfernung wird das Bild eines Objektpunkts von verschieden vielen Mikrolinsen aufgefangen und auf den Bildsensor abgebildet. Dort entsteht ein facettenhaftes Bild mit Mehrfachabbildungen, über die eine entfernungsabhängige Parallaxe bestimmt wird. Diese wiederum kann zur Berechnung des 3D-Punktes verwendet werden.

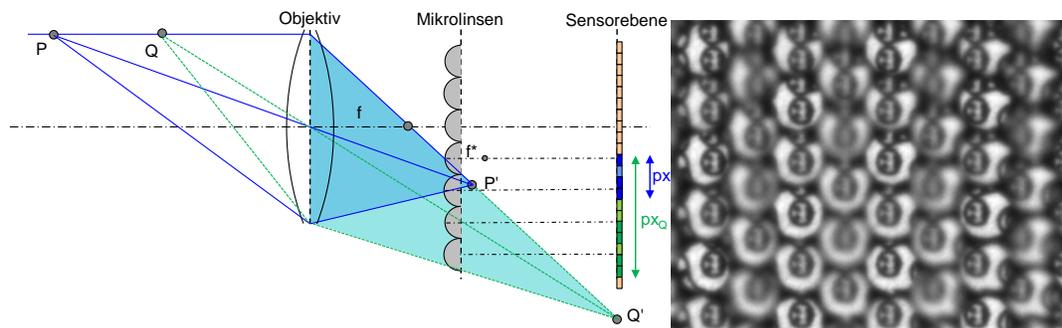


Abbildung 1: Prinzip der Lichtfeldkamera und beispielhaftes Facettenbild

Abbildung 2 zeigt die Abbildung eines punktförmigen Musters in einer Lichtfeldkamera bei verschiedenen Aufnahmeentfernungen. Deutlich ist zu erkennen, dass ein weiter entfernt liegendes Objekt durch weniger Mikrolinsen abgebildet wird, was im Einklang mit der Prinzipskizze in Abbildung 1 steht. Prinzipiell kann das Mikrolinsenfeld in die Fokusebene eines Punktes (hier P' bzw. Q'), davor oder dahinter angebracht werden.

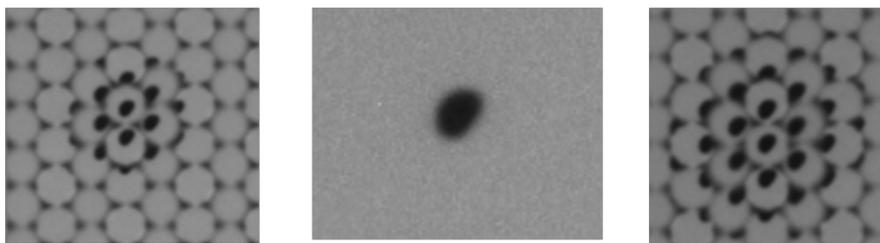


Abbildung 2: Abbildung eines Punktes (mittleres Bild) in 35 cm (links) und 25 cm Abstand (rechts)

Anhand der Abtastung dieses Lichtfeldes mit Hilfe einer plenoptischen Kamera ist es möglich eine Reihe von Anwendungen zu realisieren. Hierzu gehören beispielsweise die virtuelle

Refokussierung auf einen Punkt einer Szene (NG, 2005; NG, 2006.), die virtuelle Blendenänderung sowie die Ermittlung von 3D-Informationen einer Szene (WANNER et al., 2012).

## **2.2 Bestimmung von Tiefenkarten**

Bei der Bestimmung von Tiefenkarten können, wie bei der Berechnung von Bildern mit erhöhter Tiefenschärfe, verschiedene Methoden verwendet werden. Es ist nicht bekannt nach welchem Verfahren die Tiefenkarten bei Raytrix erzeugt werden. Mögliche Methoden zur Berechnung von Tiefenkarten sind jedoch aus der Photogrammetrie und der Computergrafik bekannt und können direkt auf eine plenoptische Kamera übertragen werden. Hierbei ist lediglich anzumerken, dass das aufgezeichnete Mikrolinsenbild ein verkleinertes Abbild des Objektes darstellt, welches durch das Hauptobjektiv aufgezeichnet wurde.

Ein globaler Ansatz zur Schätzung von Tiefenkarten wird in WANNER (2012) vorgestellt.

## **3 Kalibrierung**

Von den vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten der Lichtfeldtechnik ist die Ermittlung von 3D-Informationen für die Messtechnik besonders relevant. Vor allem ist die vergleichsweise kompakte Ausführung einer plenoptischen Kamera im Vergleich zu anderen optischen 3D-Messsystemen wie Stereokamerasysteme oder Streifenprojektionssysteme von Interesse. Aufgrund dieses Vorteils könnten sich Anwendungen in engen oder schwer zugänglichen Bereichen anbieten, da diese für größere Systeme nicht zugänglich sind. Damit sind Lichtfeldkameras prinzipiell vergleichbar mit TOF-Kameras, haben jedoch den Vorteil, dass sie leicht für größere Bildsensoren oder auch in Hochgeschwindigkeitskameras realisiert werden können.

Bei der hier untersuchten Raytrix R5 Kamera handelt es sich um eine herkömmliche Kamera, die mit einem zusätzlichen Linsenfeld vor dem Sensor ausgestattet wurde. Die Brennweite des Hauptobjektives beträgt 24mm bei einem Öffnungswinkel von  $14^\circ$ . Der Sensor besteht aus 2560 x 1920 Pixeln. Auf dem Linsenarray vor dem Sensor sind vier verschiedene Brennweiten vorhanden. Jede dieser Mikrolinsen deckt dabei eine Fläche von ca. 36 Pixeln in der Höhe und ca. 36 Pixeln in der Breite ab.

### **3.1 Kalibrierung des Tiefenbildes**

Für eine messtechnische Untersuchung einer Lichtfeldkamera ist zunächst die Rückführung auf die Einheit Meter zu gewährleisten. Die Untersuchungen basieren auf Tiefenkarten, die von der Software „RxLive“ berechnet werden. Diese Karten enthalten in Grauwerten codierte Tiefeninformationen einer mit der Kamera aufgenommenen Szene. Die Güte dieser Tiefenkarten ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Ein Einflussfaktor ist beispielsweise die Texturierung des zu beobachtenden Objektes. Verfügt ein Objekt über keine oder nur schwache Texturen, so können für diese texturschwachen Bereiche nur schwer Tiefeninformationen ermittelt werden. Daher wurden bei allen Versuchen künstliche Texturen auf die zu beobachtenden Objekte aufgebracht. Neben den Objekteigenschaften ist die Kamera ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Erstellung von Tiefenkarten. Änderungen am Objektiv ziehen Veränderungen der Tiefenkarte nach sich. Dies wird bei einer Umfokussierung des Objektivs der

Kamera deutlich. Wird der Fokus variiert, so ändert sich die Abbildung innerhalb der Kamera, wodurch sich Parallaxen zwischen zwei Mikrolinsenbildern deutlich verändern.

Weiteren Einfluss hat die verwendete Software zur Erstellung von Tiefenkarten aus Rohdaten einer plenoptischen Kamera. Untersucht wurden Tiefenkarten mit einer Auflösung von 640x480 Pixel, die mit den Software-Optionen „Resolution High“ und „Post-Process High“ entstanden sind.

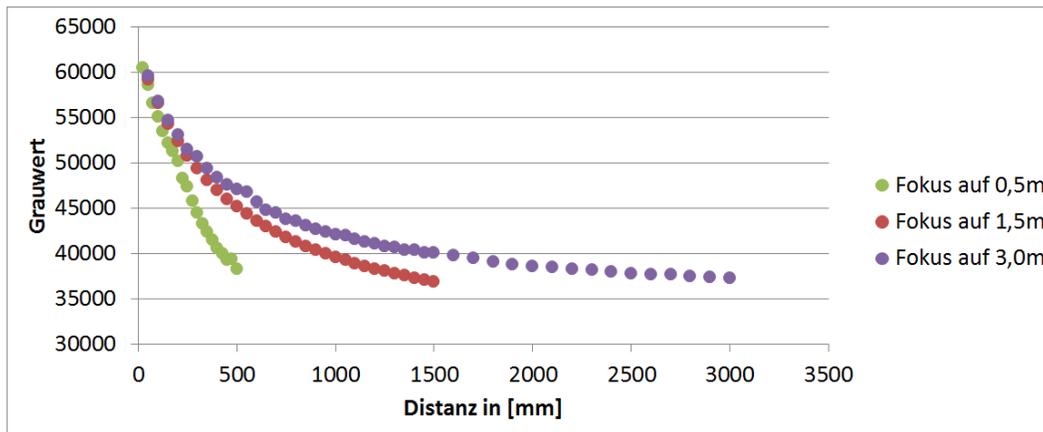


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Grauwert des Tiefenbildes und Objektentfernung bei unterschiedlichen Fokuseinstellungen

Für die Rückführung auf die Einheit Meter wird ein ebenes Objekt entlang der optischen Achse der Kamera verschoben. Die Entfernung zwischen Kamera und Objekt wird mittels eines Gliedermaßstabes bestimmt. Hierbei wird die Strecke zwischen der Vorderkante des Objektivs bis zur Ebene, die rechtwinklig zur optischen Achse steht, gemessen. Als Entfernungswert im Tiefenbild wird ein gemittelter Grauwert in der Bildmitte verwendet. Aus diesen Messungen resultiert eine Zuordnung zwischen Grauwert und Entfernung. Werden diese Zuordnungen grafisch dargestellt (Abbildung 3), so ist ein nicht linearer Zusammenhang zwischen gemessener Entfernung und Tiefenkarte festzustellen. Weiterhin kann deutlich ein fokusabhängiger Funktionsverlauf erkannt werden. Auf Basis dieser Messungen kann angenommen werden, dass es sich bei den Tiefenkarten um eine grauwertcodierte Parallaxe handelt. Auf Basis dieser Annahme kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen Grauwert und Entfernung bestimmt werden. Bei Stereonormalbildern kann aus einer gemessenen Parallaxe  $px'$ , der Kenntnis über die Basis  $b$  zwischen den Kameras und den gemeinsamen Brennweiten  $c$  die Aufnahmeentfernung  $h$  nach folgendem Zusammenhang bestimmt werden:

$$h = b \cdot c / px'$$

Wird dies auf die vorliegende Problematik übertragen, so müssen Anpassungen an der Formel vorgenommen werden. Zum einen wird die Entfernung  $h$  nicht vom Projektionszentrum zum Objekt gemessen, wodurch ein Offset berücksichtigt werden muss. Zum anderen sind die Parameter  $b$  und  $c$  unbekannt. Weiterhin sind Grauwerte keine metrische Größe. Darüber hinaus ist nicht bekannt, ob ein Offset in den grauwertcodierten Parallaxen vorliegt. Aus diesen Überlegungen folgt ein neuer funktionaler Zusammenhang:

$$h = \Delta h + n / (g + \Delta g)$$

Dabei stellt  $\Delta h$  ein Offset in der gemessenen Entfernung  $h$  dar,  $n$  ist eine Hilfsgröße für das Produkt aus Basis und Kamerakonstante sowie eines Skalierungsfaktors für die Grauwerte,  $g$  ist ein Grauwert der Tiefenkarte und  $\Delta g$  steht für einen Grauwertoffset.

Die unbekannt Parameter der Funktion werden für die durchgeführten Messungen innerhalb einer Ausgleichung bestimmt. Aus den resultierenden Ergebnissen wird deutlich, dass bei der Fokussierung auf weit entfernte Objekte die Standardabweichung der Ausgleichung schlechter wird. Betrachtet man die Rohdaten der Kamera, so kann erkannt werden, dass bei entfernteren Objekten, deren Abbildung unmittelbar vor der Fokusebene des Hauptobjektives liegt, kaum noch Überlappungen zwischen den Einzelbildern der Mikrolinsen vorhanden sind. Nahe Objekte werden hingegen in vielen dieser Einzelbilder dargestellt. Durch die Fokusänderung des Hauptobjektives wird somit der Messbereich festgelegt. Weiterhin ist die laterale Auflösung von der Fokusebene des Hauptobjektives abhängig. Für die Bestimmung von Tiefeninformationen ist es notwendig Parallaxen in den Facettenbildern zu messen. Die Genauigkeit dieser Parallaxenmessung ist unabhängig von der Objektentfernung. Die Kamera muss jedoch umfokussiert werden, wenn ein anderer Arbeitsbereich erfasst werden soll, da nur Objekte innerhalb einer beschränkten Aufnahmeentfernung gemessen werden können. Das bedeutet, dass durch Umfokussierung der Maßstab zwischen Bildraum und Objektraum geändert wird und sich eine Unsicherheit im Bildraum abhängig von diesem Maßstab im Objektraum auswirkt. Dies wird bei der Betrachtung der Standardabweichungen  $s_0$  a posteriori der Kalibrierung des Tiefenbildes deutlich. Bei einem Messbereich bis 100cm beträgt die resultierende Standardabweichung ca. 10mm und bei einem Messbereich bis 300cm liegt diese bereits bei ca. 26mm, bei der Nutzung der in Abbildung 3 dargestellten Messwerte.

### 3.2 Photogrammetrische Kalibrierung der Kamera

Für eine dreidimensionale Rekonstruktion eines Messobjektes ist es erforderlich neben den Entfernungsinformationen weiterhin die Richtungsinformation zu bestimmen. Hierzu können die "focus-on-depth"-Bilder der Lichtfeldkamera genutzt werden. Dabei handelt es sich um refokussierte Bilder, die aus den Rohdaten der Lichtfeldkamera bestimmt werden. Die Bilder unterliegen der Zentralperspektive, so dass diese für eine Kalibrierung im photogrammetrischen Sinne genutzt werden können. Unter Kenntnis der inneren Orientierung ist es möglich, durch Kombination mit den Entfernungsinformationen aus dem "depth image" mit der inneren Orientierung aus den "focus-on-depth"-Bildern eine Punktwolke des Objektes zu bestimmen.

Zur Kalibrierung der Kamera wurden 10 Bilder eines 3D-Testfeldes aufgenommen. Bei der Kalibrierung wurden die Punkte des Testfeldes als Sollkoordinaten in die Ausgleichung eingeführt. Die Punkte des Testfeldes wurden vorab mit einer Nikon D2x aufgenommen und in einer freien Bündelausgleichung mit einer Standardabweichung  $<4\mu\text{m}$  in allen Koordinatenrichtungen eingemessen.

Bei der Kalibrierung der RayTrix Kamera konnten folgende Parameter der inneren Orientierung der Lichtfeldkamera bestimmt werden: Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, drei radial-symmetrische Parameter sowie zwei Parameter der radial-asymmetrischen und tangentialen

Verzeichnung. Durch Hinzunahme der Parameter für Affinität und Scherung wurde die Bündelausgleichung singulär und konnte nicht bestimmt werden.

## 4 Genauigkeitsuntersuchung

Für diese Untersuchung werden Ergebnisse aus einer Kalibrierung der Tiefenkarte sowie eine photogrammetrische Kalibrierung der Lichtfeldkamera verwendet. Die Kalibrierung der Tiefenkarte wird für eine Aufnahmeentfernung bis 50cm durchgeführt. Die erreichte Standardabweichung im Objektraum beträgt hierbei 5mm. Zusätzlich wird eine photogrammetrische Kalibrierung der inneren Orientierung der Kamera durchgeführt. Das  $\sigma_0$  der Bündelausgleichung beträgt  $1/20$  Pixel.

Unter Kenntnis der inneren Orientierung ist es möglich, für jedes Pixel der Lichtfeldkamera einen Bildstrahl zu definieren, auf dem sich der korrespondierende Objektpunkt befindet. Durch Nutzung der Maßstabsinformation aus der Tiefenkarte können die dreidimensionalen Objektkoordinaten bestimmt werden. Wird dies für jedes Pixel durchgeführt, so erhält man eine Punktwolke des Objektes.

Anhand dieser Punktwolke werden Genauigkeitsuntersuchungen nach der VDI 2634 Blatt 2 durchgeführt und dabei Ebenheitsmess- und Kugelantastabweichung bestimmt. Zur Bestimmung dieser Parameter wird eine hohe Nachbearbeitung der Tiefenkarte innerhalb der Raytrix Software aktiviert. In Abbildung 4 sind zwei Punktwolken aus einem Tiefenbild zu sehen. Es ist deutlich das hohe Rauschen der Punktwolke mit geringer Nachbearbeitung zu erkennen. Mit zunehmender Entfernung zwischen Kamera und Messobjekt wächst das Rauschen soweit an, dass eine Unterscheidung zwischen Messobjekt und Hintergrund nicht weiter möglich ist.

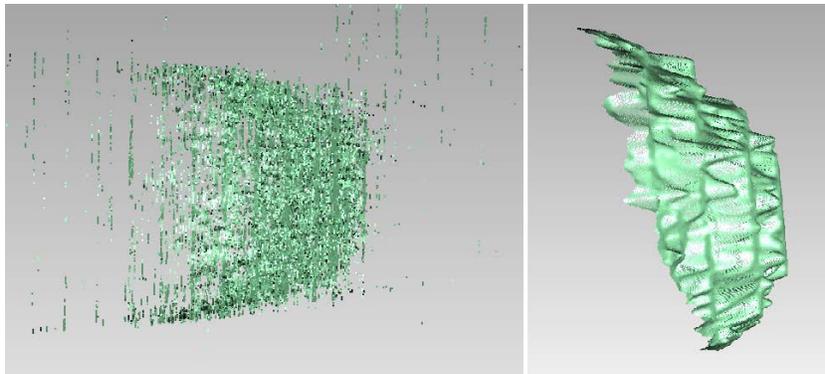


Abbildung 4: Vergleich zweier Punktwolken einer Kugel in 20cm Entfernung zur Kamera. Links mit geringer Nachbearbeitung der Tiefenkarte, rechts mit starker Nachbearbeitung der Tiefenkarte

### 4.1 Ebenheitsmessabweichung

Zur Bestimmung der Ebenheitsmessabweichung wird eine texturierte Metallplatte verwendet, die in unterschiedlichen Entfernungen zur Kamera aufgenommen wurde. Insgesamt werden an 11 Positionen Ebenen erfasst. Die gemessenen Positionen können Abbildung 5 entnommen werden. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Genauigkeit der Messungen entfernungsabhängig ist. Im Nahbereich bei ca. 10cm kann eine Ebene mit einer Standardabweichung von 0,4mm bestimmt werden. Bei einer Entfernung von 50cm wächst diese auf ca. 3,5mm an. Wie die Standardabweichung so ist auch die Ebenheitsmessabweichung (Spanne) entfernungsabhängig. Im Nahbereich liegt diese bei ca. 3,5mm, wohingegen sie bei

entfernteren Objekten bis auf ca. 25cm anwächst. Eine Auflistung der Parameter für alle Positionen kann Tabelle 1 entnommen werden.

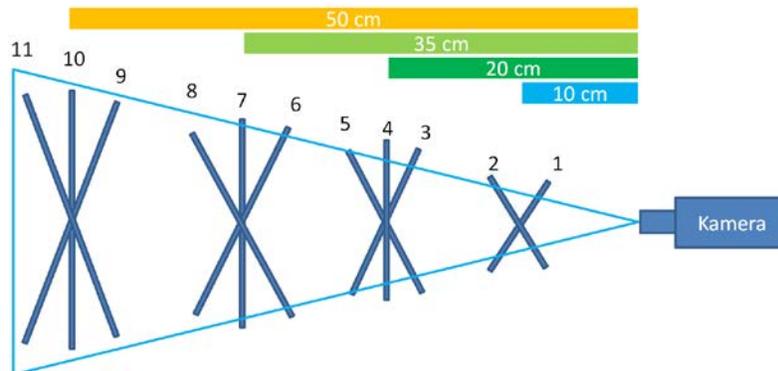


Abbildung 5: Übersicht der gemessenen Ebenen

Ebenen Nr.	Std.abw.	Spanne
1	0,4	3,7
2	0,4	3,3
3	1,4	9,4
4	0,5	3,4
5	0,8	5,6
6	1,5	12,1
7	1,4	13,8
8	1,6	10,9
9	3,0	25,2
10	3,8	23,3
11	3,4	24,5

Kugel Nr.	Std.abw.	Spanne
1	0,83	5,42
2	1,06	5,59
3	1,48	6,86
4	1,11	7,81
5	1,68	9,29
6	1,31	7,66
7	1,28	7,41
8	1,74	10,42

Tabelle 1: Ergebnisse der Ebenheitsmessabweichung mit Standardabweichung und Spanne links, Ergebnis der Antastabweichung einer Kugel mit Standardabweichung und Spanne der Messungen rechts

## 4.2 Bestimmung der Kugelantastabweichung

Zur Bestimmung der Kugelantastabweichung wird eine Kugel mit einem Durchmesser von 4cm verwendet. Wie zuvor bei der Ebenheitsmessabweichung wird die Kugel an verschiedenen Positionen bis 50cm Aufnahmeentfernung positioniert und die Antastabweichung bestimmt. Zur Bestimmung der Antastabweichung wird ein Sollradius der Kugel von 19,8mm eingeführt. Dieser Radius wurde mittels eines Streifenlichtprojektors ermittelt. Die Standardabweichung der Kugelausgleichung beträgt 0,13mm. Somit ist die Kugel als Referenzobjekt für die Lichtfeldkamera geeignet. Insgesamt wurde die Kugel an acht Positionen erfasst (Abbildung 6). Für jede dieser Positionen wurde eine Ausgleichskugel mit festem Radius bestimmt. Die ermittelten Standardabweichungen geben hierbei nicht die geringe Qualität der Punktwolke wieder. Betrachtet man die geglättete Punktwolke in Abbildung 4, so kann eine deutliche Stufenbildung in der Punktwolke erkannt werden. Bei größeren Entfernungen verstärkt sich dieser Effekt. Insbesondere Messungen bei größerer Objektentfernung wie 50cm werden

hierdurch mit einer Standardabweichung von 1,7mm und einer Antastabweichung von 10mm deutlich zu optimistisch geschätzt.

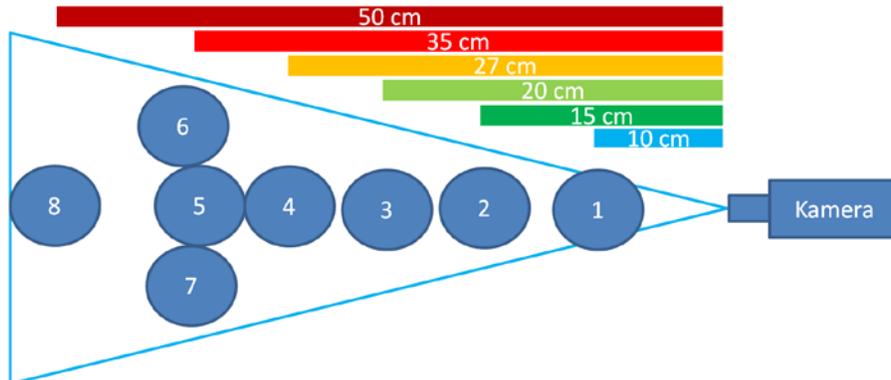


Abbildung 6: Übersicht der gemessenen Kugelpositionen

## 5 Fazit und Ausblick

Die Untersuchung der Lichtfeldkamera Raytrix R5 hat eine grundsätzliche Eignung der Lichtfeldkameratechnik für messtechnische Zwecke gezeigt. Eine Untersuchung der zu erreichenden Genauigkeiten einer solchen Kamera wurde exemplarisch für die vorgestellte Kamera unter Verwendung der Firmensoftware RxLive durchgeführt. Die erreichte Standardabweichung bei einer Entfernung bis 50cm betrug hierbei ca. 3,5mm bei einer Ebenheitsmessabweichung von ca. 25mm. Für diese Untersuchungen wurde ein erster Ansatz zur Kalibrierung einer Lichtfeldkamera vorgestellt. Hierzu wurden getrennt zunächst das "depth image" und die innere Orientierung mit Hilfe eines "focus-on-depth" Bildes kalibriert. Durch die Kombination der beiden Kalibrierungen ist es möglich, eine Punktwolke aus den Ergebnisbildern der Lichtfeldkamera abzuleiten. In einer Erweiterung wäre es denkbar, die erforderlichen Parameter simultan innerhalb eines Kalibrierungsprozesses zu bestimmen. Weiterhin ist es vorstellbar alternative Verfahren zur Bestimmung der Tiefenkarte zu verwenden.

## 6 Literatur

- JÄHNE, B. (2012). Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung. 7. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 711 S.
- LANGMANN, B., HARTMANN, K., LOFFELD, O. (2012). Depth camera technology comparison and performance evaluation. Proceedings of the 1st International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods, pp. 438-444, DOI: 10.5220/0003778304380444
- NG, R. (2005). Fourier slice photography. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Vol. 24. No. 3.
- NG, R. (2006). Digital light field photography, phd theses, Stanford university, Stanford, USA
- REMONDINO, F. (2011): Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing* 2011, 3, 1104-1138; doi:10.3390/rs3061104
- WANNER, S., GOLDLUECKE, B. (2012). Globally consistent depth labeling of 4D light fields. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 41-48.