

Kalibrierung und Genauigkeitsuntersuchung einer fokussierten plenoptischen Kamera

NICLAS ZELLER¹, FRANZ QUINT² & UWE STILLA³

Zusammenfassung: In diesem Artikel wird zunächst die Berechnung der Tiefeninformation in einer fokussierten plenoptischen Kamera dargestellt. Hierbei wurden Eigenschaften der Tiefenauflösung erstmals analytisch beschrieben. Anschließend werden Kalibriermethoden hergeleitet und experimentell untersucht. Zur Kalibrierung der optischen Abbildung wird hierbei eine bereits von herkömmlichen Kameras bekannte Kalibriermethode verwendet. Für die Tiefeninformation werden drei unterschiedliche Kalibriermethoden erarbeitet und in Experimenten miteinander verglichen. Zwei dieser Methoden basieren auf einem Modell, welches den Zusammenhang zwischen virtueller Tiefe, welche die plenoptische Kamera liefert, und tatsächlichem Objektstand beschreibt. Im dritten Ansatz wird dieser Zusammenhang mittels Taylor-Approximation angenähert. Die beiden modellbasierten Ansätze zeigen wesentliche Vorteile gegenüber der Taylor-Approximation. Des Weiteren wurde die Tiefenauflösung der plenoptischen Kamera für unterschiedliche Hauptlinsenbrennweiten untersucht und mit der analytischen Beschreibung verglichen.

1 Einleitung

Das Prinzip der plenoptischen Kamera zur Aufnahme von vierdimensionalen Lichtfeldern ist bereits seit über hundert Jahren bekannt. Erste Veröffentlichungen stammen von IVES (1903) und LIPPMANN (1908). Allerdings ist es erst seit wenigen Jahren durch die nun verfügbare Rechenleistung, vor allem in Form der parallel arbeitenden Grafikprozessoren, möglich, die aufgenommenen Lichtfelder schritthaltend auszuwerten.

Im Wesentlichen gibt es heute zwei unterschiedliche Arten von Lichtfeldkameras, welche auf einem Mikrolinsenarray (MLA) vor dem Bildsensor basieren. Eine ist die von NG (2006) entwickelte „nichtfokussierte“ plenoptische Kamera und die andere die von LUNSDAINE & GEORGIEV (2008) beschriebene fokussierte plenoptische Kamera. Zweite wird oft auch als plenoptische Kamera 2.0 bezeichnet und zeichnet sich vor allem durch eine sehr hohe Auflösung des synthetisierten Bilds aus. Dies ist bei der Berechnung von Tiefeninformation, wie von PERWASS & WIETZKE (2012) beschrieben, sehr von Vorteil.

Um ein Kamerasystem als Messgerät verwenden zu können, ist eine Kalibrierung unumgänglich. DANSEREAU ET AL. (2013) beschreiben die Kalibrierung der von NG (2006) entwickelten Lytro-Kamera, während JOHANNSEN ET AL. (2013) die Kalibrierung einer fokussierten plenoptischen Kamera der Firma Raytrix (PERWASS & WIETZKE (2012)), vor allem für den Nahbereich, vorstellen. Die hier entwickelten Kalibriermethoden basieren ebenfalls auf einer Raytrix-Kamera, dienen allerdings zur Kalibrierung in einem größeren Entfernungsbereich als die von JOHANNSEN ET AL. (2013) beschriebene Methode.

- 1) Niclas Zeller, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe; E-Mail: niclas.zeller@hs-karlsruhe.de
- 2) Franz Quint, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe; E-Mail: franz.quint@hs-karlsruhe.de
- 3) Uwe Stilla, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: stilla@tum.de

Dieser Artikel stellt bisher nicht dokumentierte Eigenschaften der Tiefenauflösung einer fokussierten plenoptischen Kamera analytisch dar. Anschließend wird zur Kalibrierung der optischen Abbildung ein Lochkameramodell zugrunde gelegt und so intrinsische Parameter sowie Verzeichnungsparameter bestimmt. Weiterhin werden unterschiedliche Ansätze zur Kalibrierung der Tiefeninformation in einem Tiefenbereich von ca. 0,7 m bis 5 m neu erarbeitet und miteinander verglichen. Die Bestimmung von Verzeichnungsparametern der Tiefeninformation, wie von JOHANNSEN ET AL. (2013) beschrieben, wurde hier nicht weiter untersucht, da deren Auswirkung im betrachteten Tiefenbereich klein gegenüber den statistischen Fehlern ist.

Die vorgestellten Experimente wurden alle am Beispiel der Kamera Raytrix R5 durchgeführt. Hierbei wurde die Auswirkung unterschiedlicher Brennweiten auf die Tiefeninformation untersucht und die Genauigkeit der einzelnen Methoden verglichen.

Der Artikel ist wie folgt aufgebaut: Zunächst wird in Abschnitt 2 das Prinzip einer fokussierten plenoptischen Kamera und die analytische Genauigkeitsuntersuchen beschrieben. In Abschnitt 3 wird kurz die Kalibrierung der optischen Abbildung vorgestellt und es werden drei Methoden zur Tiefenkalibrierung erarbeitet. Die Genauigkeit der einzelnen Methoden wird in Abschnitt 4 anhand von durchgeführten Messungen untersucht. Abschnitt 5 gibt einen kurzen Ausblick für Verbesserungen und Weiterentwicklungen.

2 Das Prinzip einer fokussierten plenoptische Kamera

Anders als eine herkömmliche Kamera, welche lediglich die Intensität des einfallenden Lichts auf dem Sensor zweidimensional abbildet, nimmt eine plenoptische Kamera das Lichtfeld im Inneren einer Kamera als vierdimensionale (4D) Funktion auf. Über die Abbildungsgleichung der Hauptlinse lässt sich das Lichtfeld außerhalb der Kamera berechnen. GORTLER ET AL. (1996) zeigen, dass im freien Raum eine Beschreibung des Lichtfelds als 4D-Funktion ausreichend ist, da sich hier die Intensität entlang eines Strahles nicht ändert. Somit kann ein Strahl im Lichtfeld durch zwei Positions- und zwei Winkelkoordinaten beschrieben werden. Anhand des 4D-Lichtfelds, welches eine plenoptische Kamera aufnimmt, ist es möglich die Tiefenkarte einer Szene zu berechnen oder nachträglich Bilder mit unterschiedlichen Fokusebenen, bzw. ein totalfokussiertes Bild zu synthetisieren.

Da dieser Artikel sich mit der Kalibrierung einer fokussierten plenoptischen Kamera befasst, wird im Folgenden auch nur dieses Prinzip vorgestellt.

Abb. 1 (links) zeigt die Projektion eines Objekts im Abstand a_L vor einer Linse auf das scharfe Abbild im Abstand b_L hinter der Linse. Der Zusammenhang zwischen Bildweite b_L und Objektweite a_L kann durch die Abbildungsgleichung für dünne Linsen nach Gl. (1) beschrieben werden.

$$\frac{1}{f_L} = \frac{1}{a_L} + \frac{1}{b_L} \quad (1)$$

Für das Verständnis der plenoptischen Kamera ist es einfacher, lediglich den Strahlengang im Inneren der Kamera zu betrachten, wie in Abb. 1 (rechts) gezeigt. Anders als bei einer herkömmlichen Kamera, wo der Sensor direkt in der Abbildungsebene im Abstand b_L zur Hauptlinse platziert ist, wird dieser im Fall einer fokussierten plenoptischen Kamera in einem Abstand kleiner als b_L platziert. Zusätzlich befindet sich vor dem Sensor ein Mikrolinsenarray

(MLA), welches die Abbildungsebene scharf auf dem Sensor abbildet. Eine Besonderheit der hier untersuchten Raytrix-Kamera ist, dass das MLA aus Linsen mit drei unterschiedlichen Brennweiten besteht, welche unterschiedliche Objektweitenbereiche scharf auf dem Sensor abbilden. Dadurch wird in der aus dem Rohbild synthetisierten Abbildung eine größere Schärfentiefe erreicht.

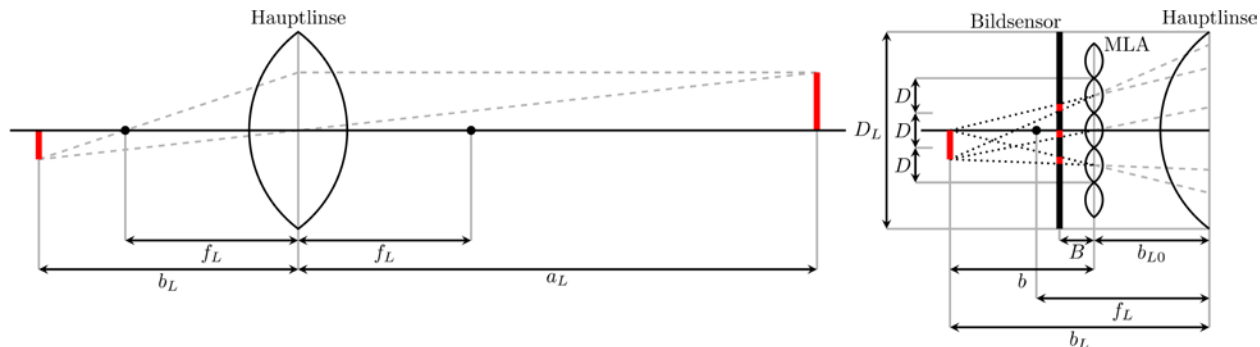


Abb. 1: Links: Konstruktion der Abbildung einer idealen dünnen Linse. Rechts: Abbildungsprinzip im Inneren einer fokussierten plenoptischen Kamera.

Im folgenden Abschnitt 2.1 soll das Prinzip der Tiefenberechnung aus dem Rohbild beschrieben werden. Für diese Beschreibungen wird das MLA als Lochgitter angesehen, was den Strahlengang etwas vereinfacht, im Fokusbereich der Kamera aber auch zulässig ist. Für die Beschreibung der Bildsynthese wird auf PERWASS & WIETZKE (2012) verwiesen.

2.1 Schätzen der Tiefeninformation

Wie in Abb. 1 (rechts) zu sehen, erzeugt jede der drei mittleren Mikrolinse eine Abbildung der virtuellen Hauptlinsenabbildung, welche hinter dem Sensor entstehen würde. Anhand der scharfen Abbildung eines Punktes auf zwei oder mehreren Mikrolinsebildern kann durch Triangulation der Abstand b zwischen MLA und virtueller Hauptlinsenabbildung berechnet werden. Hierbei berechnet sich b wie in Gl. (2) gegeben, wobei p_x der Parallaxe des Punktes in den beiden Mikrolinsebildern, d dem Abstand der Projektionszentren beider Mikrolinse und B dem Abstand zwischen MLA-Ebene und Sensor entspricht. Für zwei direkt aneinander angrenzende Mikrolinse entspricht der Abstand d der Mikrolinseapertur D . Da in der Regel allerdings nicht benachbarte Mikrolinsebilder miteinander verglichen werden, ändert sich der Abstand d dementsprechend.

$$b = \frac{d \cdot B}{p_x} \rightarrow v = \frac{d}{p_x} = \frac{b}{B} \quad (2)$$

Da der Abstand B zwischen MLA und Sensor in der Regel nicht bekannt ist, wird der Abstand zur virtuellen Abbildung b auf B normiert angegeben. Dieser normierte Tiefenwert wird als virtuelle Tiefe v bezeichnet. Um die virtuelle Tiefe berechnen zu können, muss ein Punkt der virtuellen Abbildung noch von mindesten zwei Mikrolinse scharf abgebildet werden. Dadurch ergibt sich bei der hexagonalen Anordnung des MLA mit drei unterschiedlichen Brennweiten, wie es in einer Raytrix-Kamera vorkommt, eine minimale virtuelle Tiefe $v_{min} = 2$, wie PERWASS & WIETZKE (2012) zeigen. Da ein Punkt in der Regel von mehr als zwei Mikrolinse scharf abgebildet wird, kann die Parallaxe über mehrere Mikrolinsebilder geschätzt und somit mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden.

2.2 Tiefengenaugigkeit

Anders als z.B. bei einer binokularen Stereokamera lässt sich die Tiefengenaugigkeit einer plenoptischen Kamera nicht als stetige Funktion des Objektabstands a_L beschreiben, da, je nach virtuellem Tiefenbereich, Mikrolinsen mit anderem Basisabstand d zur Tiefenberechnung verwendet werden.

Durch ableiten von Gl. (2) nach der Parallaxe p_x lässt sich die Genauigkeit der virtuellen Tiefe für ein Mikrolinsenpaar in Abhängigkeit der gemessenen Parallaxe p_x wie folgt abschätzen:

$$\Delta v \approx \left| \frac{\partial v}{\partial p_x} \right| \cdot \Delta p_x = \frac{d}{p_x^2} \cdot \Delta p_x = \frac{v^2}{d} \cdot \Delta p_x \quad (3)$$

Aus Gl. (3) geht hervor, dass die Genauigkeit der virtuellen Tiefe v quadratisch mit derselben abnimmt. Allerdings werden Punkte mit größerer virtueller Tiefe von Mikrolinsenpaaren mit größerem Basisabstand d gesehen, wodurch sich die Genauigkeit wiederum verbessert. Somit fällt die Auflösung der virtuellen Tiefe nicht stetig, aber im Mittel etwa linear mit der virtuellen Tiefe ab.

Die Bildweite b_L , welche linear von der virtuellen Tief v abhängt, bildet sich über die Abbildungsfunktion für dünne Linsen auf die Objektweite a_L ab. Gl. (4) zeigt den Zusammenhang zwischen einem Bildweitenbereich Δb_L und dem zugehörigen Objektweitenbereich Δa_L .

$$\Delta a_L \approx \left| \frac{\partial a_L}{\partial b_L} \right| \cdot \Delta b_L = \frac{f_L^2}{(b_L - f_L)^2} \cdot \Delta b_L = \frac{(a_L - f_L)^2}{f_L^2} \cdot \Delta b_L = \frac{(a_L - f_L)^2}{f_L^2} \cdot B \cdot \Delta v \quad (4)$$

Für eine konstante Bildweite a_L verbessert sich die Tiefenauflösung ungefähr proportional zum Quadrat der Hauptlinsenbrennweite f_L wie Gl. (5) zeigt.

$$\Delta a_L \approx \frac{(a_L - f_L)^2}{f_L^2} \cdot B \cdot \Delta v \approx \frac{a_L^2}{f_L^2} \cdot B \cdot \Delta v \quad \text{für } a_L \gg f_L \quad (5)$$

Für eine konstante Brennweite f_L hingegen nimmt die Tiefenauflösung quadratisch mit der Objektweit a_L ab. Da allerdings große Objektweiten einer kleinen virtuellen Tiefe entsprechen, verhält sich die Tiefengenaugigkeit in Abhängigkeit der Objektweite a_L etwas gutmütiger als in Gl. (5) beschrieben.

3 Kamerakalibrierung

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Methoden zur Kalibrierung einer fokussierten plenoptischen Kamera vorgestellt. Hierbei wird zunächst die Kalibrierung der optischen Abbildung betrachtet ohne die Tiefeninformation mit einzubeziehen. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen virtueller Tiefe und Objektabstand kalibriert.

3.1 Kalibrierung der Kameraabbildung

Zur Kalibrierung der optischen Abbildung wurde der synthetisierten Abbildung wie bei einer herkömmlichen Kamera das Modell einer Lochkamera zugrunde gelegt. Die intrinsischen Parameter des Lochkamera-Modells sowie zusätzliche Verzeichnungsparameter wurden mittels OpenCV bestimmt. Die in OpenCV implementierten Funktionen realisieren im Wesentlichen die von ZHANG (1999) beschriebene Methode. Zur Korrektur von Linsenverzeichnungen kommt allerdings das von BROWN (1971) beschriebene Modell zum Einsatz.

3.2 Kalibrierung der Tiefeninformation

Über die Abbildungsgleichung für dünne Linsen, wie in Gl. (1) gegeben, lässt sich der Zusammenhang zwischen Bildweite b_L und Objektweite a_L in Abhängigkeit der Brennweite f_L berechnen. Diese Gleichung wird auch dem Abbildungsmodell zwischen dem gemessenen Objektabstand o und der virtuellen Tiefe v zugrunde gelegt. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, dass eine reale Optik in der Regel keiner dünnen Linse entspricht und somit Größen wie die Position der Linsenhauptebene nicht explizit bestimmt werden können, oder, dass die Optik einer dicken Linse mit zwei Hauptebenen entspricht. Ebenso kann die effektive Bildweite b_L der angenommenen dünnen Linse auch über das Kameragehäuse hinausragen.

Wie Abb. 1 (rechts) zeigt, ergibt sich zwischen der virtuellen Tiefe v und der Bildweite b_L der in Gl. (6) gegebene lineare Zusammenhang. Hierbei entspricht b_{L0} dem Abstand zwischen der Hauptebene der Hauptlinse und dem MLA.

$$b_L = v \cdot B + b_{L0} \quad (6)$$

Da die Hauptebene der Hauptlinse nicht explizit bestimmt werden kann, kann die Objektweite a_L auch nicht gemessen werden. Daher wird die Objektweite a_L als die Summe aus einem messbaren Objektabstand o und einem unbekanntem aber konstanten Offset a_{L0} , wie in Gl. (7) gegeben, beschrieben.

$$a_L = o + a_{L0} \quad (7)$$

Durch Einsetzen von Gl. (6) und (7) in die Abbildungsgleichung für dünne Linsen (Gl. (1)) lässt sich der Objektabstand o als Funktion der virtuellen Tiefe v beschreiben:

$$o = ((f_L)^{-1} - (v \cdot B + b_{L0})^{-1})^{-1} - a_{L0} \quad (8)$$

Aus Gl. (8) ist zu entnehmen, dass der nichtlineare Zusammenhang zwischen der von der plenoptischen Kamera gelieferten virtuellen Tiefe v und dem messbaren Objektabstand o von mehreren unbekanntem Koeffizienten abhängt. Da lediglich die Brennweite f_L mit einer gewissen Toleranz bekannt ist, muss die Funktion anhand von Kalibrierpunkten geschätzt werden. Zur Bestimmung des Zusammenhangs wurden daher zwei modellbasierte Ansätze sowie ein Polynomfitting-Ansatz untersucht.

3.2.1 Kalibrierung basierend auf einem physikalischen Modell

Im ersten modellbasierten Ansatz werden die in Gl. (8) vorkommenden physikalischen Parameter direkt geschätzt. Allerdings existiert für Gl. (8) keine eindeutige Lösung in Abhängigkeit der vier Koeffizienten f_L , B , b_{L0} und a_{L0} . Daher wird die Brennweite f_L als bekannt angenommen und anschließend die drei verbleibenden Parameter iterativ geschätzt.

Es wird zunächst der Schätzwert \hat{a}_{L0} auf einen Startwert gesetzt und anschließend für jeden gemessenen Objektabstand $o^{\{i\}}$ die zugehörige Bildweite $b_L^{\{i\}}$ berechnet. Basierend auf den berechneten Bildweiten $b_L^{\{i\}}$ und den zugehörigen virtuellen Tiefen $v^{\{i\}}$ können anhand der Methode des kleinsten Fehlerquadrats die Parameter B und b_{L0} , wie in Gl. (9) bis (11) gegeben, geschätzt werden.

$$\begin{pmatrix} \hat{B} \\ \hat{b}_{L0} \end{pmatrix} = (\mathbf{X}_{Ph}^T \cdot \mathbf{X}_{Ph})^{-1} \cdot \mathbf{X}_{Ph}^T \cdot \mathbf{y}_{Ph} \quad (9)$$

$$\mathbf{y}_{Ph} = (b_L^{\{0\}} \quad b_L^{\{1\}} \quad b_L^{\{2\}} \quad \dots \quad b_L^{\{N\}})^T \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_{Ph} = \begin{pmatrix} v^{\{0\}} & v^{\{1\}} & v^{\{2\}} & \dots & v^{\{N\}} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}^T \quad (11)$$

Anhand der geschätzten Parameter \hat{a}_{L0} , \hat{B} und \hat{b}_{L0} lässt sich mittels Gl. (7) und (8) zu jeder virtuellen Tiefe $v^{\{i\}}$ die zugehörige Objektweite $\hat{a}_L^{\{i\}}$ berechnen. Aus der Differenz der berechneten Objektweiten $\hat{a}_L^{\{i\}}$ und den gemessenen Objektabständen $o^{\{i\}}$ berechnet sich der korrigierte Schätzwert \hat{a}_{L0} wie folgt:

$$\hat{a}_{L0} = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{i=0}^N \hat{a}_L^{\{i\}} - o^{\{i\}} \quad (12)$$

Mit dem neuen Schätzwert \hat{a}_{L0} lassen sich erneut die Bildweiten $b_L^{\{i\}}$ berechnen und \hat{B} und \hat{b}_{L0} schätzen. Die Schätzung wird solange weitergeführt, bis sich \hat{a}_{L0} zwischen zwei Iterationsschritten prozentual nur noch geringfügig ändert.

Bei dieser Methode muss die Brennweite der Hauptlinse nicht exakt bekannt sein, da es für jede Brennweite größer als null eine optimale Lösung gibt. Allerdings verschieben sich hierbei die geschätzten Parameter und weichen somit von den tatsächlichen physikalischen Größen ab.

3.2.2 Kalibrierung basierend auf einem Verhaltensmodell

Der zweite modellbasierte Kalibrieransatz basiert ebenfalls auf der in Gl. (8) definierten Funktion. Dieser schätzt aber nicht mehr explizit die physikalischen Parameter sondern lediglich eine Funktion mit dem gleichen Verhalten.

Durch umformen von Gl. (8) erhält man die in Gl. (13) gegebene Funktion. Da sowohl der Objektabstand o als auch die virtuelle Tiefe v messbare Größen sind, kann $u = o \cdot v$ als weitere messbare Variable definiert werden. Der Objektabstand o lässt sich somit als Linearkombination von u und v ausdrücken.

$$o = o \cdot v \cdot \frac{B}{f_L - b_{L0}} + v \cdot \frac{B \cdot a_{L0} - B \cdot f_L}{f_L - b_{L0}} + \frac{b_{L0} \cdot a_{L0} - a_{L0} \cdot f_L - b_{L0} \cdot f_L}{f_L - b_{L0}} \quad (13)$$

Da im Prinzip nicht die physikalischen Größen, sondern nur die Abbildungsfunktion von virtueller Tiefe v auf den Objektabstand o von Interesse sind, lassen sich die physikalischen Größen wie in Gl. (14) gegeben, zu den Koeffizienten c_0 , c_1 und c_2 zusammenfassen.

$$o = u \cdot c_0 + v \cdot c_1 + c_2 \quad (14)$$

Die Koeffizienten sind hierbei wie folgt definiert:

$$c_0 = \frac{B}{f_L - b_{L0}} \quad (15)$$

$$c_1 = \frac{B \cdot a_{L0} - B \cdot f_L}{f_L - b_{L0}} \quad (16)$$

$$c_2 = \frac{b_{L0} \cdot a_{L0} - a_{L0} \cdot f_L - b_{L0} \cdot f_L}{f_L - b_{L0}} \quad (17)$$

Da die Variablen o , v und u messbar sind, können die Koeffizienten c_0 , c_1 und c_2 anhand von Kalibrierpunkten mit der Methode des kleinsten Fehlerquadrats analog zu Gl. (9) bis (11) geschätzt werden. Durch Umformen von Gl. (14) erhält man den Objektabstand o als Funktion der virtuellen Tiefe v wie in Gl. (18) gegeben.

$$o = \frac{v \cdot c_1 + c_2}{1 - v \cdot c_0} \quad (18)$$

3.2.3 Polynombasierte Kalibrierung

Im dritten Ansatz wird das der Abbildung von virtueller Tiefe v auf den Objektabstand o zugrundeliegende Modell komplett außer Acht gelassen. Es ist bekannt, dass jede differenzierbare Funktion als Taylor-Reihe entwickelt und somit als Polynom unendlicher Ordnung beschrieben werden kann. In dem hier beschriebenen Ansatz wird der Objektabstand o daher ebenfalls als Polynom in Abhängigkeit der virtuellen Tiefe definiert, dessen Koeffizienten mit der Methode des kleinsten Fehlerquadrats, analog zu den vorangegangenen Ansätzen, geschätzt werden. Gl. (19) gibt die Definition des Polynoms an, welches die Abbildungsfunktion zwischen v und o approximiert.

$$o \approx \sum_{i=0}^M k_i \cdot (v)^i \quad (19)$$

Bei dieser Methode ist ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Funktion und der Ordnung des Polynoms zu finden. In Abschnitt 4 wird diese Methode basierend auf Polynomen von unterschiedlicher Ordnung untersucht und mit den beiden modellbasierten Ansätzen verglichen.

4 Experimente

Die zuvor beschriebenen Ansätze zur Kalibrierung einer plenoptischen Kamera wurden anhand von aufgenommenen Datensätzen untersucht. Zunächst wird im Abschnitt 4.1 auf die Kalibrierung der optischen Abbildung, durch welche sowohl intrinsische als auch Verzeichnungsparameter geschätzt werden, eingegangen. Im darauffolgenden Abschnitt 4.2 werden die einzelnen Ansätze zur Tiefenkalibrierung ausgewertet. Außerdem wird die Genauigkeit der Tiefeninformation für unterschiedliche Brennweiten der Hauptoptik dargestellt.

4.1 Kalibrierergebnis der intrinsischen und Verzeichnungsparameter

Zur Bestimmung der intrinsischen und der Verzeichnungsparameter wurde ein Schachbrettmuster mit 7 mal 10 Feldern aufgenommen. Somit erhält man pro aufgenommenes Schachbrettmuster 54 Referenzpunkte (Eckpunkte von jeweils 4 aneinander angrenzenden Feldern). Zur Kalibrierung wurde das Muster aus insgesamt 50, möglichst unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen und daraus die kameraspezifischen intrinsischen und Verzeichnungsparameter sowie zu jedem Muster die extrinsischen Parameter bestimmt.

Die Kalibrierung wurde für zwei Brennweiten der Hauptoptik: $f_L = 35$ mm und $f_L = 12$ mm durchgeführt. Hierbei wurden für beide Optiken jeweils drei Kalibrierungen durchgeführt um so die Konsistenz der Parameter zu bestimmen. Tab. 1 zeigt die daraus resultierten Ergebnisse.

Für alle Kalibrierungen konnten Reprojektionsfehler mit einer Standardabweichung σ_{Rep} kleiner 1 Pixel erreicht werden. Der Reprojektionsfehler ergibt sich aus der Differenz eines aufgenommenen Bildpunkts und der, durch die geschätzten Parameter definierten, Projektion des zugehörigen 3D-Punkts in Weltkoordinaten auf die Bildebene. Für einer Kalibrierung erhält man somit $N = 2700$ Reprojektionsfehlerwerte $e_{Rep}^{\{i\}}$, aus welchen sich die Standardabweichung σ_{Rep} wie folgt berechnet:

$$\sigma_{Rep} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(e_{Rep}^{\{i\}} \right)^2} \quad (20)$$

Die in Tab. 1 angegebenen Ergebnisse zeigen, dass vor allem das Projektionszentrum (c_x, c_y) über die drei Kalibrierungen sehr stark schwankt. Grund hierfür ist, dass mit Zunahme der Brennweiten f_x und f_y die planare Homographie, welche die projektive Abbildung der Lochkamera beschreibt, allmählich in eine affine Homographie übergeht. Durch den zunehmenden Verlust der zentralprojektiven Eigenschaften werden somit die intrinsischen Parameter sehr sensitiv gegenüber Messfehlern.

Brennweite	f_x [Pixel]	f_y [Pixel]	c_x [Pixel]	c_y [Pixel]	σ_{Rep} [Pixel]
$f_L = 12\text{mm}$	1058,8	1064,3	494,0	496,9	0,703
	1053,8	1060,9	488,4	528,4	0,870
	1048,1	1053,9	475,8	502,4	0,830
$f_L = 35\text{mm}$	3259,1	3262,3	520,7	346,6	0,332
	3261,6	3261,0	430,0	389,5	0,333
	3284,0	3291,0	426,3	323,6	0,342

Tab. 1: Ergebnis der geschätzten intrinsischen Parameter der Kamera Raytrix R5

4.2 Ergebnisse der Tiefenkalibrierung

Die Kalibrierung der Tiefeninformation sowie die anschließende Genauigkeitsuntersuchung wurden ebenfalls für die Brennweiten $f_L = 35\text{ mm}$ und $f_L = 12\text{ mm}$ durchgeführt. Zur Kalibrierung der Tiefeninformation wurde, anhand des zuvor schon verwendeten Schachbrettmusters, eine Messreihe von Objektabständen aufgenommen.

Für die Brennweite $f_L = 35\text{ mm}$ wurde das Schachbrett in 50 unterschiedlichen Objektabständen, gleichmäßig im Bereich von ca. 0,7 m bis 5 m verteilt, aufgenommen. Für die Brennweite $f_L = 12\text{ mm}$ wurden ebenfalls 50 Messwerte, allerdings im Bereich von ca. 0,7 m bis 4 m Objektabstand, aufgenommen.

Die Größe der im Bild abgebildeten Schachbrettfelder ist umgekehrt proportional zur Objektweite a_L . Hierdurch lässt sich für jede einzelne Ecke des Schachfelds eine relative Objektweite berechnen. Da das Schachbrett insgesamt 54 Ecken besitzt, ergeben sich für jeden Objektabstand 54 Messwerte. Zusätzlich wurde für jedes Schachbrett der Abstand zu einem definierten Punkt auf Höhe der Kamera gemessen. Anhand dieser Referenzwerte wurden die relativen Objektabstände in absolute Werte umgerechnet, welche anschließend zur Kalibrierung verwendet wurden.

Im Folgenden wird lediglich das Kalibrierergebnis für die Brennweite $f_L = 35\text{ mm}$ vorgestellt, das Ergebnis für $f_L = 12\text{ mm}$ ist aber vergleichbar. Abb. 2 (links) zeigt das Ergebnis der einzelnen Kalibriermethoden unter Verwendung der Brennweite $f_L=35\text{ mm}$. Für jede Kalibriermethode ist hier der Objektabstand über der virtuellen Tiefe aufgetragen. In Grün sind alle aufgenommenen Messpunkte dargestellt. Für die Kalibrierung wurden jedoch lediglich die Punkte von fünf aufgenommenen Schachbrettmuster verwendet, welche in Rot dargestellt sind. Die Kurvenverläufe zeigen, dass sowohl das physikalische Modell, als auch das Verhaltensmodell anhand der fünf Objektabstände mit guter Genauigkeit geschätzt werden kann. Im Bereich zwischen 0,7 m und 5 m liegen beide Kurven innerhalb der Streuung der Tiefenwerte. Zusätzlich wurde die Abbildungsfunktion durch ein Polynom der Ordnung 3 sowie eines der Ordnung 6 geschätzt. Hier sind die fünf Objektdistanzen nicht ausreichend, um die Parameter der Abbildungsfunktion zu bestimmen.

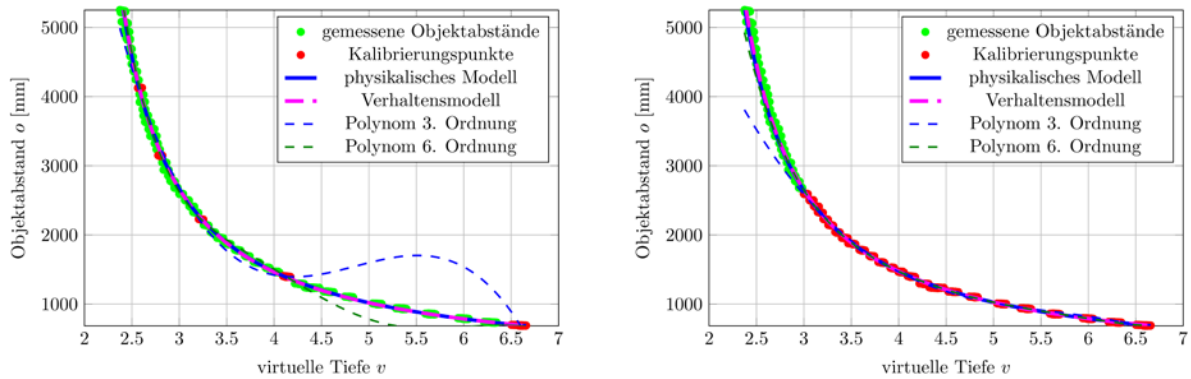


Abb. 2: Abbildungsfunktion zwischen virtueller Tiefe v und Objektstand o (in mm). Links: Abbildungsfunktionen wurden durch 5 Objektdistanzen im Bereich von ca. 0,5 m bis 5 m geschätzt. Rechts: Abbildungsfunktionen wurden durch Objektdistanzen bis ca. 2,6 m Objektstand geschätzt.

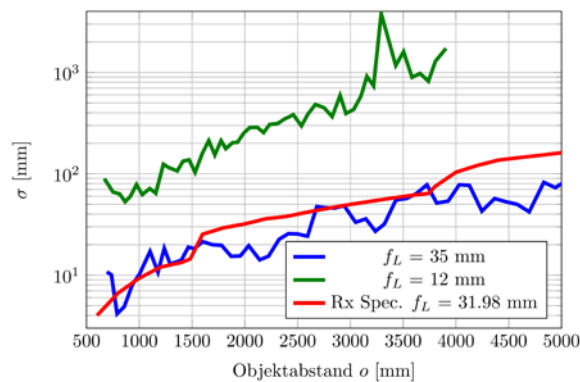


Abb. 3: Tiefengenauigkeit einer Raytrix R5 Kamera bei verschiedenen Brennweiten der Hauptoptik ($f_L = 35$ mm und $f_L = 12$ mm)

In einem zweiten Versuch wurden nur die Messwerte der Objektdistanz im Bereich von ca. 0,7 m bis 2,6 m zur Kalibrierung verwendet. Das daraus resultierende Ergebnis ist in Abb. 2 (rechts) gezeigt. Für Objektdistanzen bis ca. 2,6 m, also dort wo auch Messpunkte zur Kalibrierung verwendet wurden, beschreiben alle vier Funktionen die Abbildung der virtuellen Tiefe v auf den Objektstand o mit großer Genauigkeit. Im Bereich größer 2,6 m weichen die beiden polynombasierten Ansätze allerdings sehr stark von den gemessenen Werten ab. Sowohl das physikalische Modell, als auch das Verhaltensmodell liegen über die komplette gemessene Objektdistanz innerhalb der Streuung der Tiefenwerte. Diese beiden Ansätze sind daher auch dann sehr gut geeignet, wenn es nur für kleine Objektdistanzen möglich ist, Messwerte zur Kalibrierung aufzunehmen, die Kamera aber auch größere Distanzen zuverlässig auswerten soll.

Abb. 3 zeigt die gemessene Toleranz der Tiefenwerte der Kamera für die Brennweiten $f_L = 35$ mm und $f_L = 12$ mm. Zusätzlich ist in das Diagramm die von der Fa. Raytrix angegebene, theoretisch erreichbare Genauigkeit für die Brennweite $f_L = 31,98$ mm bei einer maximalen Fokusdistanz von 10 m angegeben. Da für die Brennweite $f_L = 12$ mm der Fehler in der Tiefeninformation für zunehmende Objektdistanzen viel stärker zunimmt, wurden die Ordinate logarithmisch skaliert. Im Diagramm ist für die jeweils 50 gemessenen Tiefenstufen die Wurzel der mittleren, quadratischen Abweichung der Messwerte von der geschätzten Abbildungsfunktion σ aufgetragen. Als Abbildungsfunktion wurde für beide Brennweiten das Verhaltensmodell verwendet.

Für die Brennweite $f_L = 35$ mm stimmen die gemessenen Werte sehr gut mit der von der Fa. Raytrix angegebenen Genauigkeit überein. Allerdings kann nicht gewährleistet werden, dass die im Experiment gemessene Objektdistanz genau dem vom Hersteller vorgegebenen Abstand zwischen Objekt und Sensor entspricht. Somit kann es sein, dass die vom Hersteller vorgegebene Genauigkeit um einen geringen, konstanten Wert auf der x-Achse verschoben ist.

Die bei der Brennweite $f_L = 12$ mm gemessenen Genauigkeit ist ca. um den Faktor 10 schlechter als bei $f_L = 35$ mm. Dies entspricht in etwa der Abschätzung aus Abschnitt 2.2, gemäß der $\frac{35^2}{12^2} = 8,5 \approx 10$.

5 Fazit und Ausblick

Der Artikel liefert eine analytische Abschätzung der Genauigkeit der Tiefenbestimmung mit einer fokussierten plenoptischen Kamera in Abhängigkeit von kameraspezifischen Parametern wie der Hauptlinsenbrennweite f_L . Außerdem wurde gezeigt, dass das synthetisierte Bild der Kamera auf das Modell einer Lochkamera zurückgeführt werden kann und somit zugehörige intrinsische und Verzeichnungsparameter berechnet werden können. Hauptsächlich wurden drei unterschiedliche Methoden zur Kalibrierung der Tiefeninformation einer plenoptischen Kamera vorgeschlagen, wobei zwei dieser Methoden das der Kamera zugrundeliegende Modell sehr gut beschreiben. In folgenden Arbeiten gilt es zum einen, die Methode zur Schätzung der intrinsischen und Verzeichnungsparameter zu verbessern, da hier eine deutliche Toleranz in den Schätzwerten, vor allem für Tele-Optiken, auftritt. Die plenoptische Kamera soll in Zukunft für Navigationsanwendungen verwendet werden.

6 Literaturverzeichnis

- BROWN, D. C., 1971: Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **37** (8), S. 855-866.
- DANSEREAU, D. G.; PIZARRO, O. & WILLIAMS, S. B., 2013: Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, S. 1027-1034.
- GORTLER, S. J.; GRZESZCZUK, R.; SZELISKI, R.; COHEN, M. F., 1996: The lumigraph. *Proceedings of the 23rd annual conference on computer graphics and interactive techniques*, S. 43-54.
- IVES, F. E., 1903: Parallax stereogram and process of making same. US Patent 725567.
- JOHANNSEN, O.; HEINZE, C.; GOLDLUECKE, B. & PERWASS, C., 2013: On the calibration of focused plenoptic cameras. *GCPR Workshop on Imaging New Modalities*, S. 302-317.
- LIPPMANN, G., 1908: Epreuves réversibles. *Photographies intégrales. Comptes Rendus De l'Académie Des Sciences De Paris*, **146**, S. 446-451.
- LUNSDAINE, A. & GEORGIEV, T., 2008: The focused plenoptic camera. *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, S. 1-8.
- NG, R., 2006: Digital light field photography. PhD-Thesis, Stanford University.
- PERWASS, C. & WIETZKE, L., 2012: Single lens 3S-camera with extended depth-of-field. *Human Vision and Electronic Imaging*, **17**.
- ZHANG, Z., 1999: Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, **1**, S.666-673.