



BEUTH HOCHSCHULE  
FÜR TECHNIK  
BERLIN

University of Applied Sciences

# Wissenschaftliches Arbeiten WS 12/13

Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera

Autor:	Steffen Buder
Matrikelnr.:	772923
Institution:	Beuth Hochschule für Technik Berlin
Erstellt am:	03.11.2012
Version:	0.1
Datum:	12. Dezember 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Vorhergehende Arbeiten . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fachliches Umfeld</b>	<b>3</b>
2.1	Stereoskopisches Sehen und Parallaxe . . . . .	3
2.2	2Dameratechnik . . . . .	4
2.3	Lichtfeld und plenoptische Funktion . . . . .	4
2.4	Plenoptische Kamera . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Detailausarbeitung</b>	<b>9</b>
3.1	Hardware Implementierung und optische Anforderungen . . . . .	10
3.2	Software Implementierung . . . . .	11
3.2.1	Algorithmik . . . . .	11
3.3	Ergebnisse . . . . .	12
3.4	Diskussion . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Fazit</b>	<b>14</b>
	<b>Glossar</b>	<b>15</b>

# 1 Einleitung

Die nachfolgende Arbeit beschäftigt sich mit der integralen Fotografie. Heutzutage wird das Prinzip von integraler Fotografie von sogenannten plenoptischen Kameras oder auch Lichtfeldkameras umgesetzt.

Die Motivation und Hauptbezugspunkt dieser Arbeit ist eine wissenschaftliche Arbeit der Universität Stanford; „**Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera**“ [1]. In dieser Arbeit wird der Aufbau einer plenoptischen Kamera beschrieben. Dazu gehört die Hardware-Implementierung, sowie die Software-Vorraussetzungen, die geschaffen werden mussten um brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag auf der Refokussierung von Bildern.

Ziel dieser Arbeit ist es ein umfassendes Verständnis für integrale Fotografie zu schaffen und somit die Einsatzmöglichkeiten nachvollziehbar darzulegen. Dazu werden zunächst Fachbegriffe, hauptsächlich aus der geometrischen Optik, geklärt. Anschließend werden technische Umsetzungen, d.h. Anwendungen, der zuvor erläuterten Prinzipien, vorgestellt und in ihrer Funktionsweise möglichst verständlich erklärt.

## 1.1 Vorhergehende Arbeiten

Der Begriff der integralen Fotografie wurde bereits 1908 von Gabriel Lippmann [2] erwähnt. Der Grundgedanke ist relativ simpel und orientiert sich an der natürlichen Art zu sehen. Der Mensch besitzt zwei Augen, dessen Bilder vom Gehirn zusammengesetzt werden. Das gleiche kann man auch mit einer Kamera machen. Bereits eine Kiste mit zwei Löchern (Lochkamera) reicht aus, um zwei Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven zu erzeugen, genau wie das zwei Augen bewerkstelligen. Jedes der beiden Löcher lässt Licht durch und erzeugt somit jeweils ein Bild. Abhängig vom Abstand werden diese beiden Bilder dann gleiche Bildinhalte haben und diese leicht versetzt darstellen. Also aus zwei unterschiedlichen Perspektiven. Diese simple Idee führte zu ersten Experimenten mit dieser Art der Bilderzeugung.

Auch heute noch gibt es stereoskopische Kameras. Ein kostengünstiges Gerät wird beispielsweise von der Firma Holga angeboten (Abb. 1). Diese Kamera bringt 2 Bilder nebeneinander auf einen Mittelformatfilm und produziert so einen 3D-Effekt durch die leicht veränderte Perspektive.



Abbildung 1: Stereoskopische Kamera der Marke Holga  
Quelle: Bild Link

Aufgrund dieses Grundgedankens und erster Versuche Lippmanns folgten bald weitere Arbeiten, die diesen Gedanken wieder aufgriffen und verbesserten.

Ein weiterer Pionier in diesem Gebiet war Herbert E. Ives [3], welcher den Vorschlag von stereoskopischen Bildern durch eine Linse mittels eines Gitters machte. Damit erweiterte er die Idee der doppelten Lochkamera.

Erst seit ca. 20 Jahren ist es möglich die Idee von Lippmann in ein handhabbares Format umzusetzen. Adelson und Wang [4] bauten eine Kamera, die hinter einer Hauptlinse ein Gitter von Mikrolinsen besaß. Das Licht wird somit nochmals gebrochen. Das bringt die Ideen von Lippmann und Herbert E. Ives zusammen. Anstelle des Lochkameraprinzipis von Ives werden nun Linsen verwendet.

Es folgten mehrere Arbeiten, die auf der Arbeit von Adelson und Wang aufsetzten, u.a. der Bericht der Stanford University [1].

## 2 Fachliches Umfeld

Im folgenden Kapitel sollen die Grundlagen für das Verständnis einer plenoptischen Kamera geschaffen werden. Das beinhaltet die Beschreibung heutiger gewöhnlicher Kameras sowie die Klärung von Fachbegriffen. Es folgen möglichst verständliche Definitionen von Lichtfeld und plenoptischer Fotografie, sowie stereoskopische Prinzipien.

### 2.1 Stereoskopisches Sehen und Parallaxe

Wir Menschen besitzen die Eigenschaft räumlich zu sehen. Möglich wird das hauptsächlich dadurch, dass wir zwei Augen besitzen. Der Grund dafür liegt im Wesentlichen darin, dass wir zwei versetzte Bilder sehen. Dabei werden Objekte, abhängig von ihrem Abstand, unterschiedlich stark versetzt erscheinen. Objekte, die dichter am Betrachter sind, sind stärker versetzt, als Objekte in der Ferne.

Die Parallaxe erfasst diesen Umstand in Form eines Winkels. In der Astronomie bspw. ist dies ein gängiges Mittel um die Entfernung von Sternen zu bestimmen.

Man stelle sich, in diesem Zusammenhang, die Augen als jeweils ein Betrachterstandpunkt vor, von dem aus eine Gerade zum betrachteten Objekt führt. Der Winkel zwischen diesen beiden Geraden ist die Parallaxe. Verschiebt man nun das Objekt näher in Richtung der beiden Betrachter vergrößert sich der Winkel. Entsprechend kleiner wird der Winkel, wenn sich das Objekt wegbewegt.

In der Astronomie muss der Abstand der beiden Betrachterstandpunkte natürlich größer sein als der kleine Augenabstand. Deshalb macht man sich die Rotation der Erde um die Sonne zu Nutze und nimmt zwei verschiedene Bilder an zwei verschiedenen Tagen im Jahr. Am besten wenn der Abstand am größten ist, also nach einem halben Jahr.

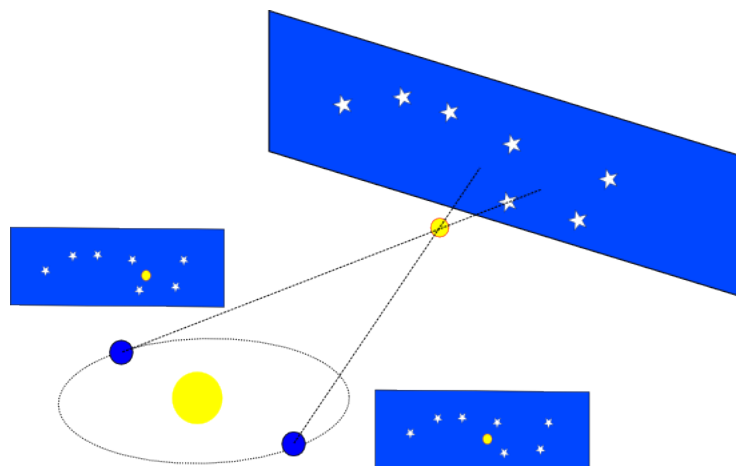


Abbildung 2: Parallaxe - Blick auf einen Stern aus zwei unterschiedlichen Positionen  
Quelle: Bild Link

Diese Form der Entfernungsbestimmung kann auch bei Lichtfeldaufnahmen verwendet werden um die Tiefe von Bildinformation zu ermitteln.

## 2.2 2D Kameratechnik

Die heutige Kameratechnik hat sich im Grunde genommen seit ihrer Erfindung Mitte des 19. Jahrhunderts, wenn man von den Grundelementen ausgeht, kaum verändert. Diese Grundelemente sind ein *Objektiv*, zum Sammeln des einfallenden Lichts, und die *Bildebene*, auf die das gesammelte Licht fällt. Für die Begrenzung des einfallenden Lichts ist die Blende verantwortlich, welche sich im Linsensystem, sprich Objektiv, befindet. Abbildung 3 soll dieses Zusammenspiel der Komponenten verdeutlichen.

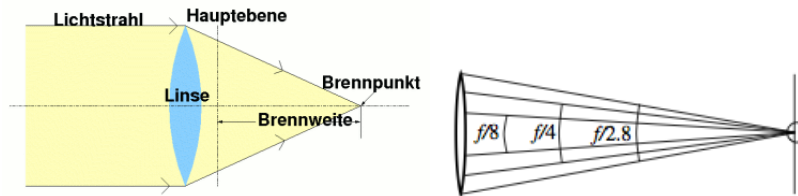


Abbildung 3: Brennweite  
Quelle: Bild Link

Die Abbildung zeigt im linken Bild das einfallende Licht, was vom Objektiv (stark vereinfacht dargestellt) im Brennpunkt (Bildebene) gebündelt wird und somit scharf gestellt ist. Das rechte Bild zeigt die Begrenzung des einfallenden Lichts durch die Blende.

Unter anderem hat die Blende Einfluss auf die Schärfentiefe. Je größer die Blendenzahl ist desto größer wird der Bereich indem Objekte scharf sind.

Diese drei Elemente bilden die Grundlage für das Sammeln des Lichts in der Fototechnik. Um das Foto letztendlich auf den Film oder den Bildsensor zu bringen spielen dann noch die Größen Belichtungszeit und Empfindlichkeit des Sensors oder Film (angegeben als ISO/ASA oder DIN) eine wichtige Rolle.

## 2.3 Lichtfeld und plenoptische Funktion

Das Lichtfeld und die plenoptische Funktion sind zwei Begriffe, die im Prinzip das Gleiche beschreiben, bzw. wird das Lichtfeld mit der plenoptischen Funktion beschrieben.

Um die plenoptische Funktion und das Lichtfeld zu verstehen hilft es die Strahldichte zu verstehen. Diese drückt die Strahlungsintensität (Watt) eines Punktes auf dem strahlenden Körper, abhängig von seiner Richtung, aus. Dieser Grundgedanke geht darauf zurück, dass die von einem Punkt ausgehende Strahlung auf einer Fläche unterschiedlich ist und auch in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich stark ist. Um also die Strahlungsintensität nicht einfach nur als konstanten Wert zu betrachten, werden die Verhältnisse bezüglich der Fläche und der Richtung miteinbezogen um diese Abhängigkeiten zu erfassen. Abbildung 4 zeigt eine Darstellung der Strahldichte.

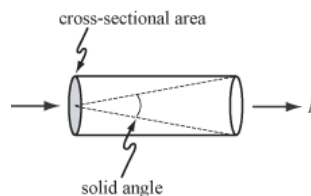


Abbildung 4: Strahldichte  
Quelle: Bild Link

Die plenoptische Funktion ist also die Strahldichte, die von einem Punkt in eine bestimmte Richtung ausgeht. da räumliche Paramter diese Funktion beschreiben. Das heißt, dass für die Strahldichte eines Strahls die Position, ein dreidimensionaler Vektor und die Richtung, ausgedrückt durch zwei Winkel, erforderlich sind und somit eine fünfdimensionale Funktion ergeben.

Für die Betrachtung der plenoptischen Funktion innerhalb eines 4D-Lichtfeldes reichen die  $uv$ - und  $st$ -Koordinaten um Position und Richtung zu beschreiben (Begrenzung durch zwei Ebenen; s.u.).

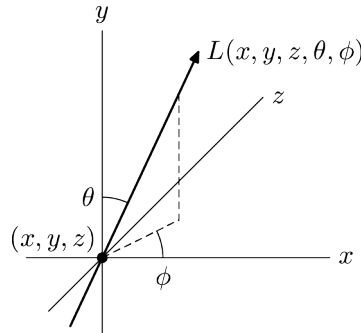


Abbildung 5: Plenoptische Funktion  
Quelle: Bild Link

Bildet man das Integral über eine Menge von Vektoren (Strahldichtevektoren), ausgehend von einem Punkt, erhält man die Bestrahlungsstärke  $E$ , also die Leistung (Watt) pro Quadratmeter.

Diese Betrachtung von solchen Vektoren nimmt man üblicherweise innerhalb eines begrenzten Raumes vor. Ist das der Fall spricht man vom sogenannten Lichtfeld. Diese Begrenzung kann aber beliebig gewählt werden (s. auch [5]). Üblicherweise ist das eine zwei Ebenenbetrachtung, wie auch für plenoptische Kameras. Das führt dazu, dass oft auch vom 4D-Lichtfeld gesprochen wird, da nun von einer  $uv$ -Ebene und einer  $st$ -Ebene ausgegangen wird und alle Strahlen erfasst, die die beiden Ebenen schneiden und der Strahl nun mit 4 Parametern beschrieben werden kann, einer  $uv$ -Koordinate und einer  $st$ -Koordinate. Parallel zu den Ebenen verlaufende Strahlen werden in diesem Lichtfeld nicht erfasst.

Jetzt kann mittels plenoptischer Funktion, die durch das Lichtfeld bestimmt ist, die Strahlungsintensität, ausgehend von einem Punkt und abhängig von der Richtung des Lichtstrahls, bestimmt werden.

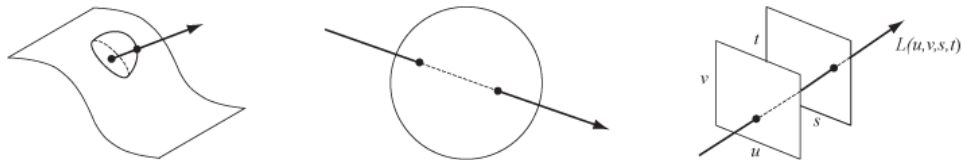


Abbildung 6: Verschiedene Arten Lichtfelder Lichtfeld  
Quelle: Bild Link

[6]

## 2.4 Plenoptische Kamera

Das Prinzip von plenoptischen Kameras wurde bereits 1908 von Gabriel Lippmann [2] beschrieben. Seine Version einer solchen Kamera bestand aus mehreren Objektiven [7]. Damals, als digitale Fotografie noch nicht geboren war, konnten die Vorteile einer solchen plenoptischen Kamera noch nicht im vollen Umfang genutzt werden, da die Zusammenführung der Einzelbilder so nicht ohne Weiteres möglich war und zum Anderen die Größe der Einzelteile dazu führte, dass eine solche Kamera in einem großen Aufbau resultierte. Die Idee wurde über die Jahre des Öfteren wieder aufgegriffen, aber erst seit einigen Jahren ist es technisch möglich eine solche Kamera auf eine handhabbare Größe zu fertigen und die nötige Rechenleistung für einen vertretbaren Preis aufzubringen.

Eine plenoptische Kamera erfasst das Lichtfeld eines Bildes, d. h. das ausgehend von einem Punkt von der Hauptebene einer Kamera die Strahldichte dieses Strahls erfasst wird. In modernen Lichtfeldkameras wird dies erreicht indem die Lichtstrahlen, die durch *ein* Objektiv gehen, nochmals durch ein Mikrolinsenarray gebrochen werden. Das ist vergleichbar mit einem Motiv bzw. Bild, was aus verschiedenen Perspektiven gemacht wird. Jede Linse erzeugt nochmal ein Teilbild eines Bereiches des Ursprungsbildes und das aus verschiedenen Perspektiven. Somit wird das Bild unter einer Mikrolinse in benachbarten Linsen mit leichtem Versatz erscheinen. Zusammengefügt zu einem Einzelbild ergibt das ein Bild mit hoher Tiefeninformation, also zusätzliche Positions- und Richtungsinformationen. Es kommen demnach die Konzepte in Bezug auf das Lichtfeld zum Tragen. Die Idee dahinter ist eigentlich recht einfach und gar nicht so weit hergeholt, da der menschliche Sehapparat auch nicht anders funktioniert (s. Abschnitt 1.1 und 2.1).

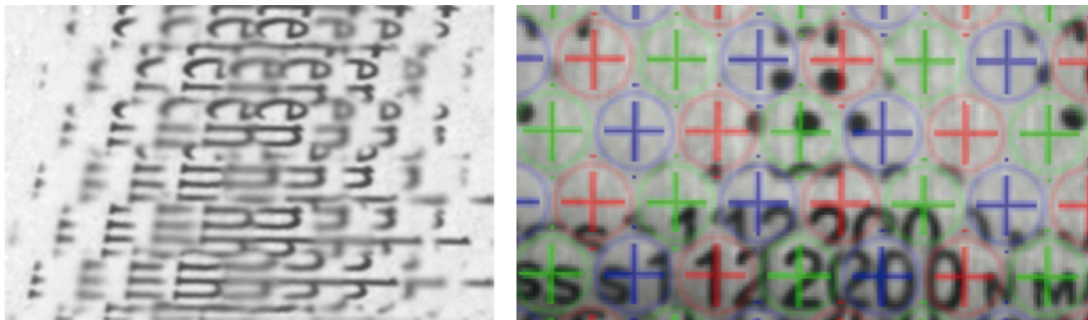


Abbildung 7: Rohbild  
Quelle: [5]

Im Rohbild kann man erkennen wie gewisse Bildinformationen in benachbarten Mikrolinsen doppelt und leicht unterschiedlich aussehen. Das rechte Bild zeigt zusätzlich die Mittelpunkte der Mikrolinsen.

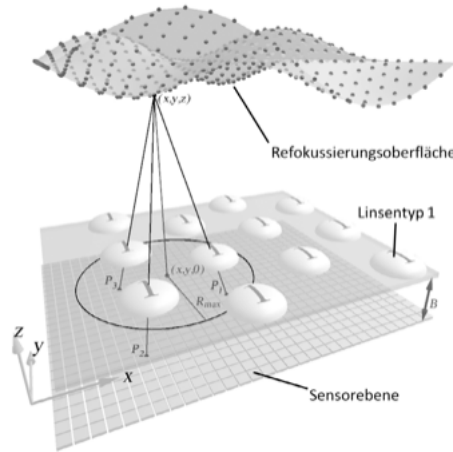


Abbildung 8: Mikrolinsendarstellung  
Quelle: [5]

Abbildung 8 zeigt die Aufzeichnung eines Punktes mit seinem Lichtfeld. Diese Darstellung eignet sich sehr gut für das Verständnis der Tiefeninformationsermittlung und der Aufzeichnung eines Punktes auf der uv-Ebene durch mehrere Mikrolinsen und somit auf verschiedenen Pixeln des Bildsensors.

Eine sehr gute Beschreibung für die Refokussierung des Bildes auf die gewünschte uv-Ebene liefert das Paper der Firma Raytrix:

“Um nun den Grau- oder Farbwert des virtuellen Punktes  $(x,y,z)$  zu berechnen, wobei die z-Koordinate die Fokusebene beschreibt, müssen lediglich die Projektionsstrahlen durch die Zentren der Mikrolinsen des für diesen Fokusbereich zuständigen Mikrolinsentyps berechnet werden. Die Schnittpunkte der Projektionsstrahlen mit der Sensorebene ergeben dann die Positionen der Bildpunkte, aus denen der resultierende Farbwert berechnet wird, z.B. über den Mittelwert.” [5]

Diese Herangehensweise kann der Abbildung 8 entnommen werden. Die uv-Ebene ist hier eine beliebige Oberfläche und soll zeigen, dass es nicht immer eine flache Ebene sein muss.

Mit einer solchen Kamera werden im Grunde genommen 3D-Bilder aufgezeichnet. Daraus können Bilder mit einer sehr hohen Schärfentiefe mit weit offener Blende erzeugt werden. Auch ein Fokussieren der Kamera entfällt. Mit einer solchen Aufnahme kann auch die Fokusebene im Nachhinein angepasst werden (s. auch [7]). Die 3D-Information wird durch die Strahldichte erfasst, d.h. dass ein Bereich des Bildes aus unterschiedlichen Perspektiven erfasst wird und somit ausgehend von einem Punkt auf unterschiedlichen Mikrolinsen unterschiedliche Strahlungsrichtungen des von diesem Punkt ausgehenden Lichts erfasst werden.

Durch die zusätzliche Tiefeninformation ergeben sich also mehrere Vorteile. Die Szene wird 3-dimensional erfasst und das kann mit weit geöffneter Blende erfolgen. Die Lichtempfindlichkeit des Bildsensors (ISO-Wert) kann reduziert werden. Das ist vergleichbar mit analogen Filmen, welche auch eine Empfindlichkeit besitzen. Und genauso wie Filme leiden auch heutige Bildsensoren an einem erhöhten Bildrauschen, wenn die Empfindlichkeit erhöht wird. Mit einer plenoptischen Kamera kann aufgrund des starken Lichteinflusses bei weit offener Blende die Lichtempfindlichkeit und somit das Bildrauschen vermindert werden.

Durch die Richtungsinformation der einfallenden Strahlen kann die Fokusebene sowie die Schärfentiefe nachträglich verändert werden. Dabei spricht man vom Anpassen der virtuellen uv-Ebene. Desweiteren kann auch der Blickwinkel nachträglich geändert werden.



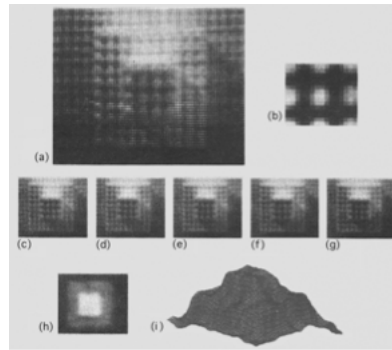


Abbildung 9: Digitalisierte Aufnahme eines Lego-Pyramide mittels Lichtfeldkamera  
Quelle: „Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera“ [4]

Momentan gibt es zwei Unternehmen, welche sich der Herstellung von Lichtfeldkameras widmen. Die erste Firma die solche Kameras kommerziell herstellte, ist das Kieler Unternehmen Raytrix, das diese Art von Kamera für Industriekunden entwickelt. Seit 2012 widmet sich auch das amerikanische Unternehmen Lytro, dessen Gründer Ren Ng ein Autor des Papers ist, mit der Herstellung solcher Kameras, mit Fokus auf die Zielgruppe der Privatanwender.

Abbildung 10 zeigt eine moderne Lichtfeldkamera der Firma Lytro.



Abbildung 10: Lytro Lichtfeldkamera  
Quelle: Bild Link [8]

### 3 Detailausarbeitung

Der im Stanford-Bericht [1] beschriebene Aufbau einer plenoptischen Kamera soll im folgenden Kapitel im Detail beschrieben werden und mit einer Diskussion und weiterführender Literatur abgeschlossen werden. Im Wesentlichen werden darin die Implementierung einer plenoptischen Kamera beschrieben, sowie die Grundlagen für das Verständnis angesprochen. Der Inhalt soll hier grob wiedergegeben werden.

Die Motivation dieser an der Stanford University entstandenen Arbeit liegt wahrscheinlich an dem vor ca. 20 Jahren aufkommenden Interesse an solchen Kameras, aber der erst seit wenigen Jahren wirklichen Machbarkeit dieser, da Bildsensoren immer höher auflösen, Rechenleistung immer günstiger und die Fertigung von Mikrolinsen immer kleiner wird. Adelson und John Y. A. Wang haben bereits 1992 eine plenoptische Kamera gebaut [4], was im Grunde genommen die Vorlage für das zu Grunde liegende Paper ist.

Der eigentliche Fokus der Arbeit, bei der Verarbeitung der Lichtfeldaufnahmen, liegt auf der Refokussierung des Bildes, also der nachträglichen Anpassung der Schärfentiefe, sprich ein Verschieben der virtuellen uv-Ebene. Abbildung 11 soll das verdeutlichen.

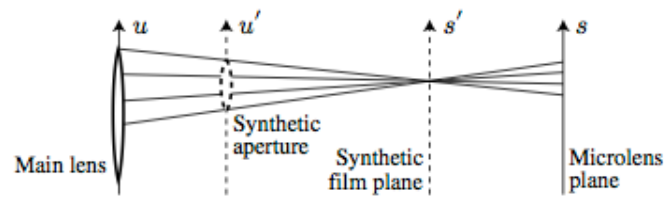


Abbildung 11: Darstellung der virtuellen uv-Ebene  
Quelle: [1]

### 3.1 Hardware Implementierung und optische Anforderungen

Für die Kamera wurde ein Contex 645 Mittelformatkameragehäuse verwendet, um einen Bildsensor verwenden zu können, der groß genug ist. Da ein Bildpunkt auf dem Ursprungsbild durch die Mikrolinsen mehrere Pixel einnehmen. Der im Versuchsaufbau verwendete Abstand zum Mikrolinsenarray ist genau die Brennweite des verwendeten Objektivs. Jede Mikrolinse deckt einen Bereich von 12x12 Pixel auf dem Bildsensor ab, was die Genauigkeit der Messung des Lichtfeldes beeinflusst. Insgesamt werden 296x296 Mikrolinsen verwendet, die zusammen einen Bereich von 4000x4000 Pixel abdecken.

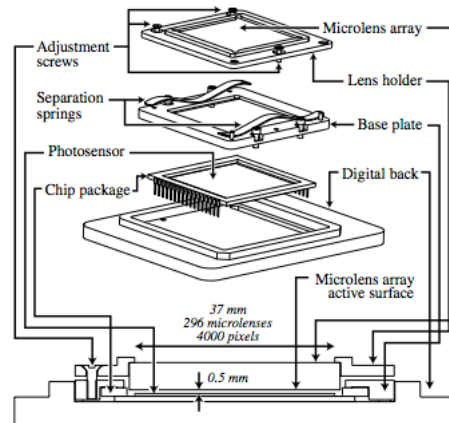


Abbildung 12: Aufbau der veränderten Bildebene  
Quelle: [1]

Abbildung 12 zeigt den Aufbau der Bildebene dem Mikrolinsenarray, darunter eine Zwischenplatte, um den Abstand zwischen Bildsensor und Mikrolinsenarray justieren zu können, und dem Bildsensor. Zusammen wird alles auf der digitalen Rückwand der Kamera angebracht.

Die Einstellungen der Blenden von Hauptlinse und denen der Mikrolinsen musste für den Aufbau übereinstimmend gewählt werden, um den Bereich, den die Mikrolinsen auf dem Bildsensor abdecken, weder überlappen zu lassen noch zu stark einzuschränken. Abbildung 13 illustriert diesen Effekt.

Bei der Bestimmung des Abstands der Mikrolinsen vom Bildsensor war entscheidend, dass dieser der Brennweite der Mikrolinsen entspricht, um die Bilder unter den einzelnen Linsen korrekt abzubilden. Dadurch konnte auf eine aufwendige Linsenkonstruktion verzichtet werden, wie bei Adelson und Wang [4], die zusätzliche Linsen in ihrem System benötigten. Somit konnte eine Verkleinerung des Linsenssystems erzielt werden, verlangte aber eine entsprechend kleine aber präzise Fertigung der Mikrolinsen.

Hinzu kam, dass die Blenden der Mikrolinsen auf die der Hauptlinse so angepasst werden mussten, sodass die zur Verfügung stehenden Pixel pro Mikrolinse möglichst vollständig ausgenutzt werden (s. Abb. 13).

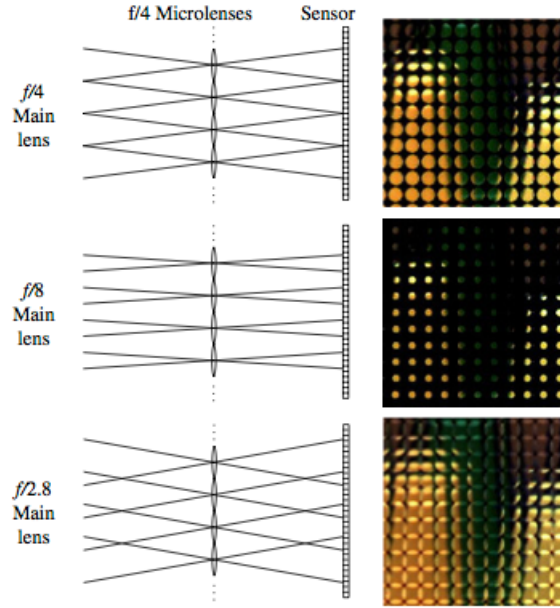


Abbildung 13: übereinstimmende Blendenzahl und die Auswirkungen  
Quelle: [1]

## 3.2 Software Implementierung

Die mit der im Rahmen der Arbeit [1] entstandenen Aufnahmen zeichnen sich dadurch aus (s. Abschnitt 2.4), dass im Prinzip aus mehreren Perspektiven auf gewisse Bereiche geschaut wird. Das Erzeugen eines Bildes, also das Auswählen von Pixeln unter einer Mikrolinse mit gewissen Einstellungsparametern, speziell in Bezug auf das Verschieben der Fokusebene, ist die Refokussierung, was durch gewisse Algorithmen erzielt werden kann.

### 3.2.1 Algorithmik

Die Grundlagen für die verwendeten Algorithmen sind aus der geometrischen Optik. Für eine Abstandsbestimmung bspw. zieht man stereoskopische Messverfahren heran (trigonometrische Parallaxe; s. 2.1) somit kann die Tiefeninformation von gewissen Objekten hergeleitet werden und Heightmaps erzeugt werden.

#### Refokussierung

Die allgemeine Refokussierung wurde bereits beschrieben (s. Kapitel 2.4).

Die resultierenden Daten die sich bei der Aufnahme mit der Kamera ergeben haben, repräsentieren die Strahlungsintensität ausgehend von einem Objekt innerhalb des Lichtfeldes. Ein Bereich wird also mit unterschiedlichen Strahlungsintensitäten (Farbwerten) unter mehreren Mikrolinsen auftauchen. Diese Intensität kann innerhalb des Lichtfeldes mit der plenoptischen Funktion  $L(u, v, s, t)$  beschrieben werden, wobei  $(u, v)$  die Ebene der Hauptlinse und  $(s, t)$  die Mikrolinsenebene repräsentieren. Die produzierten Bilder einer Mikrolinse sind die Aufnahme mit variierender  $st$ -Ebene.

Aufgrund dessen kann die Zusammenführung des späteren Bildes mit variierenden Fokuseinstellungen (variierende  $st$ -Ebene) erfolgen. Die Berechnung der Strahlungsintensität für beliebige  $uvst$  ( $u'v's't'$ ) ist wie folgt definiert:

$$\overline{E}(s', t') = \frac{1}{D^2} \int \int L'(u', v', s', t') A(u', v') \cos^4 \theta du dv \quad (1)$$

$D$  ist dabei der Abstand der Bildebene zur Blende, bzw. Hauptebene.  $A$  ist eine Blendenfunktion, die die Lichtdurchlässigkeit der Blende beschreibt.

Aufgrund des konstanten Abstands kann  $1/D^2$  entfernt werden, sowie  $\cos^4 \theta$  durch paraxiale Näherung,

einer vereinfachten Ansicht der geometrischen Optik. Das führt zu der vereinfachten Formel:

$$\bar{E}(s', t') = \int \int L'(u', v', s', t') A(u', v') du dv \quad (2)$$

Die Beschreibung der Strahlen innerhalb des Lichtfeldes bei variierenden Ebenen kann mit folgender Darstellung verdeutlicht werden.

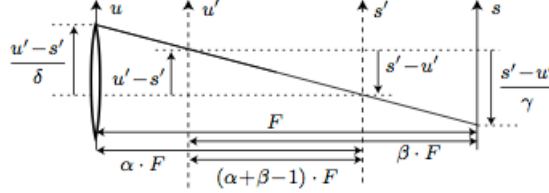


Abbildung 14: Darstellung der Schnittpunktermittlung für  $u'$  und  $s'$   
Quelle: [1]

$\alpha$  und  $\beta$  sind hier die Verhältniszahlen der virtuellen Abstände.  $\beta$  ist demnach ein Wert zwischen 0 und 1 und ist das Verhältnis des Abstands von  $u'$  zu  $s'$ . Gleiches gilt für  $\alpha$  in Bezug auf  $u$  und  $s'$ .

Daraus gehen die neuen Schnittpunkte hervor und die neue Strahlungsintensität  $L'$  muss wie folgt berechnet werden.

$$L'(u', v', s', t') = L\left(s' + \frac{u' - s'}{\delta}, t' + \frac{v' - t'}{\delta}, u' + \frac{s' - u'}{\gamma}, v' + \frac{t' - v'}{\gamma}\right) \quad (3)$$

Zusammen ergibt sich folgende Gleichung:

$$\bar{E}(s', t') = \int \int L\left(s' + \frac{u' - s'}{\delta}, t' + \frac{v' - t'}{\delta}, u' + \frac{s' - u'}{\gamma}, v' + \frac{t' - v'}{\gamma}\right) A(u', v') du dv \quad (4)$$

Für die Refokussierung war lediglich ein Verschieben der  $st$ -Ebene nötig, sodass  $\beta = 1$  gilt. Weiterhin wurde die volle Blende verwendet (es gilt  $A(u', v') = 1$ ) und die letztendlich verwendete Gleichung für die Refokussierung konnte noch einmal vereinfacht werden:

$$\bar{E}(s', t') = \int \int L(u', v', u' + \frac{s' - u'}{\alpha}, v' + \frac{t' - v'}{\alpha}) du' dv' \quad (5)$$

### 3.3 Ergebnisse

Die aus den Versuchen erzeugten Bilder und die Auswertung dieser bezog sich hauptsächlich auf die Refokussierung der Bildinformation. Die Auswertung der Bilder im Vergleich zu konventionellen Aufnahmen zeigte, dass eine refokussierte Aufnahme einer normalen Aufnahme mit der Blendeneinstellung  $f/22$  entspricht (s. Abb. 15).

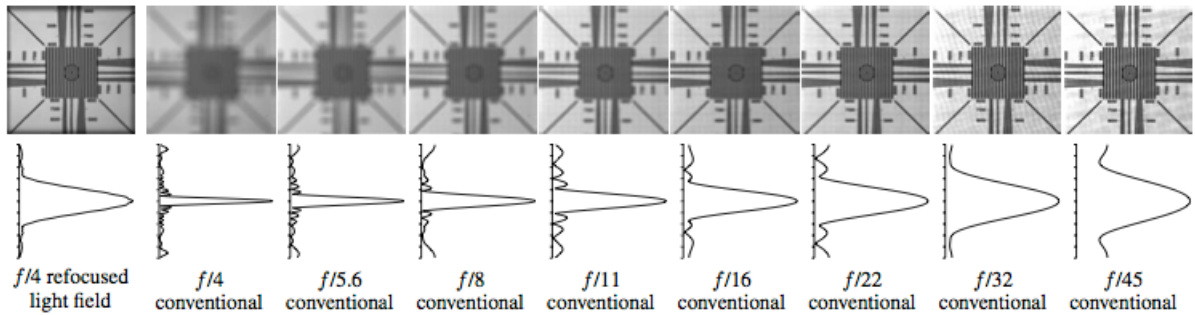


Abbildung 15: Vergleich refokussiertes Bild/normales Bild  
Quelle: [1]

### 3.4 Diskussion

Die abschließende Diskussion geht auf die Resultate des Versuchs ein und erklärt beispielsweise den Verlust der theoretischen Refokussierung gegenüber den in den Versuchen erzielten Ergebnissen.

Zu erwarten wäre eine Steigerung der Schärfentiefe um den Faktor 12, da die Anzahl der Pixel, die eine Mikrolinse abbildet über die Breite 12 ist. Theoretisch heißt das, dass eine virtuelle Blende nach der Refokussierung von 45 hätte erreicht werden müssen. Praktisch wurde aber nur eine Steigerung um den Faktor 6 erzielt (Blende 22), was u.a. darin begründet liegt, dass hinter jeder Blende auch Beugung des Lichts auftritt, da sich Licht u.a. wellenartig ausbreitet, was der geometrischen Optik widerspricht, auf dessen Grundlagen die Algorithmik beruht. In der Arbeit ist dieser Effekt hinter den Mikrolinsen aufgetreten. Das hat zur Folge, dass ein Blur-Effekt auftritt und somit die nachträgliche Refokussierung beschränkt.

Die abschließende eigene Bewertung der Arbeit zeigt noch einmal wofür sich eine solche Kamera eignet und was es für die konventionelle Fotografie bedeuten würde. Zu dem was schon erwähnt wurde (beliebige Anpassung der Schärfe, Bilder mit hohem Lichteinfluss aufzeichnen, demnach schnelle Verschlusszeiten) und aus dem Paper hervorgeht soll hier nochmal der 3D-Aspekt hervorgehoben werden, was im Paper [1] nur bedingt Erwähnung fand und auch nicht Ziel der Arbeit war.

Durch die 3 dimensionale Information des Lichtfelds sind Anwendungen wie etwa die Änderung der Perspektive, Entfernungsmessung und sogar Tiefenstreckung und -stauchung, der Effekt bei dem der Hintergrund scheinbar näher rückt, interessant

Eine Integralkamera könnte auch Auswirkungen auf den Objektivbau haben, Chromatische Aberration und Vignettierung müssten durch aufwendige Fertigung nicht mehr korrigiert werden. Solch fehlerhafte Bildinformationen können dann einfach rausgerechnet werden.

## 4 Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Kenntnisse über die Technologie und den Stand der Forschung in diesem Bereich haben gezeigt, dass wir erst am Anfang der Entwicklung solcher Kameras sind und dies die Fotografie, so wie wir sie jetzt kennen grundlegend verändern könnte.

Die Firma Raytrix schreibt in ihrem Paper [5] aus dem Jahr 2010 über die Resultate einer anderen Position des Mikrolinsenarrays. Die in dieser Arbeit vorgestellte Form der plenoptischen Kamera [1] positioniert das Mikrolinsenarray auf der eigentlichen Bildebene, also im Brennpunkt des Objektivs, was dazu führt, dass das resultierende, refokussierte Bild eine Auflösung, die gleich der Anzahl der Mikrolinsen ist, erreicht. Eine Veränderung der Position kann eine größere Auflösung für das resultierende Bild bedeuten. Aufgrund der aus vorherigen Arbeiten gezogenen Erkenntnisse, schlägt die Firma Raytrix eine modifizierte Version einer plenoptischen Kamera vor, bei der Mikrolinsen mit unterschiedlichen Brennweiten verwendet werden, um so den Schärfentiefenbereich noch weiter auszudehnen.

Auf der Internetpräsenz der Firma sieht man auch verstärkt die Anwendung für 3-dimensionale Aufnahmen und somit auch dynamische Anpassung der Betrachterposition, was leider nicht im Fokus der Arbeit der Stanford University [1] lag.

Durch derartige Optimierungsversuche wird deutlich, dass die Technik noch am Anfang steht. Die Auflösung der resultierenden Bilder ist noch zu klein und schränkt die Benutzung stark ein. Fotografen werden wohl vorher nicht zu solchen Kameras greifen, da kommerzielle Geräte, wie das der Firma Lytro, zwar Bilder in High Definition (HD)-Qualität, was in etwa einem Megapixel entspricht, liefern, das aber vielen nicht ausreicht, um Bilder verlustfrei auf eine Größe jenseits von A6 zu vergrößern.

Somit bleibt der Anwendungsbereich, zumindest für den Privatanwender, vorerst auf dynamische Bilder beschränkt.

Anders sieht das bei den Modellen der Firma Raytrix aus. Es gibt eine weitaus größere Modellauswahl mit höheren Auflösungen. Allerdings sind alle Preise auf der Seite nur auf Anfrage.

Es bleibt also abzuwarten wie sich diese Technik entwickelt und ob sie breiten Zuspruch findet und somit die Fotografie revolutionieren wird. Auf der Seite von Raytrix kann zumindest schonmal ein faszinierender Eindruck von dem gewonnen werden was uns vielleicht in Zukunft erwartet.

# Glossar

## Bestrahlungsstärke $E$

englisch irradiance; Die Bestrahlungsstärke ist die Leistung einer Lichtquelle die auf eine Fläche trifft in Abhängigkeit der Größe dieser Fläche und wird in Watt pro Quadratmeter angegeben. .

## Blendenzahl

Die Blendenzahl beschreibt das Verhältnis von der Brennweite und Durchmesser der Kreisfläche des eintreffenden Lichts..

## Brennweite

Die Brennweite ist der Abstand der Hauptebene des Linsensystems und dem Brennpunkt. Für gewöhnlich wird diese in Millimeter angegeben..

## Lichtfeld

Das Lichtfeld ist eine Menge von Lichtstrahlen innerhalb eines begrenzten Raumes, welches die Strahldichte über diese Strahlen beschreibt..

## Plenoptische Funktion

Funktion zur Beschreibung der Strahldichte von Lichtstrahlen in einem Teil des Raumes..

## Strahldichte

englisch radiance; Die Strahldichte  $L$  beschreibt die von einem Punkt ausgehende Strahlung abhängig von der Richtung des Strahls und wird in Watt pro Steradian pro Quadratmeter gemessen..

# Abbildungsverzeichnis

1	Holga 3D . . . . .	2
2	Strahldichte . . . . .	3
3	Brennweite . . . . .	4
4	Strahldichte . . . . .	4
5	Plenoptische Funktion . . . . .	5
6	Lichtfelder . . . . .	5
7	Rohbild . . . . .	6
8	Mikrolinsen . . . . .	7
9	3D-Informationen eines Bildes . . . . .	8
10	Lytro Lichtfeldkamera . . . . .	8
11	Virtuelle uv-Ebene . . . . .	9
12	Veränderte Bildebene . . . . .	10
13	Übereinstimmende Blendenzahl . . . . .	11
14	Schnittpunktberechnung . . . . .	12
15	Vergleich refokussiertes Bild/normales Bild . . . . .	12



## Literatur

- [1] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” tech. rep., Stanford University and Duval Design, 2005.
- [2] G. Lippmann, “Epreuves reversible donnant la sensation du relief,” tech. rep., 1908.
- [3] H. E. Ives, “Parallax panoramagrams made with a large diameter lens,” tech. rep., 1930.
- [4] E. H. Adelson and J. Y. Wang, “Single lens stereo with a plenoptic camera,” tech. rep., Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [5] C. Perwaß and L. Wietzke, “Mikrolinsen-basierte 4d-lichtfeldkameras zur räumlichen bilderfassung durch ein einziges objektiv in einer aufnahme,” tech. rep., Raytrix GmbH, Kiel, 2010.
- [6] Wikipedia, “Lichtfeld,” 2012.
- [7] M. Linden, “Lichtfeldfotografie; schärfe für alle und alles,” 2012.
- [8] Wikipedia, “Light-field camera,” 2012.