

LIGHTFIELD

Die Zukunft von Film & Fernsehen?

- Herausforderungen & Möglichkeiten
durch die Lightfield-Technik -

Masterarbeit
WS 2014/2015

Studiengang EMM AM
Hochschule der Medien, Stuttgart

vorgelegt von: Larissa Kurtz
am: 05. Mai 2015
Matrikelnummer: 27252

Erstprüferin: Prof. Katja Schmid
Zweitprüfer: Prof. Stefan Grandinetti

Bearbeitungszeit: 06. Januar bis 05. Mai 2015



LIGHTFIELD

Die Zukunft von Film & Fernsehen?

- Herausforderungen & Möglichkeiten durch die Lightfield-Technik -

Masterarbeit

WS 2014/2015

Studiengang: Elektronische Medien Master – Audiovisuelle Medien
Hochschule der Medien, Stuttgart

Vorgelegt von: Larissa Kurtz

Am: 05. Mai 2015

Matrikelnummer: 27252

Erstprüfer: Prof. Katja Schmid

Zweitprüfer: Prof. Stefan Grandinetti

Bearbeitungszeit: 06. Januar 2015 bis 05. Mai 2015

Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Larissa Kurtz, an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel: *„Lightfield: Die Zukunft von Film & Fernsehen? – Herausforderungen und Möglichkeiten durch die Lightfield-Technik“* selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Diese Masterthesis befasst sich mit einer vom Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) entwickelten Technik zur Aufnahme eines Lichtfeldes im Rahmen eines Forschungsprojektes in Kooperation mit der HdM Stuttgart.

Ziel ist es, die Herausforderungen und Möglichkeiten von Lichtfeld im Film- und Fernsbereich herauszuarbeiten. Dabei soll von der Geschichte und der theoretischen Entwicklung des Lichtfeld-Konzepts, über die Praxis mit Aufbau, Funktionsweise, Möglichkeiten und Problemen der Lichtfeld-Technik, bis zu einem Vergleich mit dem alternativen Time-of-Flight-Verfahren ein umfassender Einblick und Überblick in diese neue Technik erfolgen. Abschließend wird ein Ausblick mit einer ersten Einschätzung zur Zukunft von Lichtfeld in der Film- und Fernsehbranche gegeben.

Abstract

This master's thesis treats the new capturing technique of **Lightfield** of the Fraunhofer Institute (IIS) within the context of their research project in cooperation with Stuttgart Media University.

This thesis aims at presenting the challenges and possibilities that come with Lightfield in film and television. For this reason the author would like to deliver an insight and overview into this new technique starting from history and theoretical development of Lightfield, through practical aspects such as system architecture and operation, possibilities and problems, up to a comparison with the alternative Time-of-Flight-Technique. In conclusion an outlook with a first estimation concerning the future of Lightfield in movie and television industry will be given.

INHALTSVERZEICHNIS

Eidesstattliche Erklärung	1
Zusammenfassung/Abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
Einleitung	7
Kapitel 1: Entwicklung und Geschichte der LF-Technik	10
1.1 Erste Ideen und Konzepte	10
1.2 Lichtfeld in der frühen Fotografie	12
1.3 Lichtfeld hier und heute	12
Kapitel 2: Was ist die LF-Technik und wie funktioniert sie?	13
2.1 Was ist das Lichtfeld und wie funktioniert es?	13
a) Lichtfeld & Plenoptische Funktion	13
b) Lichtfeld-Rendering	15
2.2 Lichtfeld als Teil der Photogrammetrie: Tiefeninformation & 3D Geometrie als Basis	17
a) Teilbereich der Photogrammetrie	17
b) Hauptzweck von Lichtfeld-Systemen	18
2.3 Warum kommt Lightfield erst jetzt so richtig auf?	19
2.4 Realisierung des Lichtfeldes	20
a) Plenoptische Kamera als Umsetzungsvariante 1	20
b) Kamera-Array als Umsetzungsvariante 2	22
Kapitel 3: Fraunhofer Lichtfeld-Aufnahmesystem: Kamera-Array	23
3.1 Das Aufnahmesystem und die eingesetzte Technik	23
a) Wie ist das Aufnahmesystem aufgebaut?	23
b) Verarbeitung der aufgezeichneten Lichtfelddaten	24
Multikamera Image Rektifizierung	24
Multifokale Disparitätsabschätzung	25
Dichte Lichtfeld-Generierung	26



3.2	Grundsätzliche Nachbearbeitungsmöglichkeiten	26
	a) Künstliche Blende (Synthetic Aperture)	27
	b) Z-Rendering (Virtuelle Kameraposition)	28
	c) Dolly-Zoom oder Vertigo-Effekt	29
	d) Virtuelles Stereo	30
Kapitel 4: Herausforderungen & Möglichkeiten der Lichtfeld-Technik im Bewegtbild		32
4.1	Produktion von LF-Filmen mit einem Kamera-Array	32
4.1.1	Kamera-Equipment	32
	a) Die Kameras	32
	b) Systemgröße, -flexibilität & -beweglichkeit	33
	c) Datenmenge, Lautstärke, Abstand	35
	d) Vorschaubild, 3D/Echtzeit-Visualisierung	35
4.1.2	Einstellungen der Array-Kameras	36
	a) Blende	37
	b) Bildfrequenz	37
4.1.3	Kamera-, Personen- und Objektbewegungen	37
4.1.4	Set-Anforderungen: Räumlichkeiten, Ausstattung, Requisite, Maske, Kostüm	38
	a) Setbedingungen	38
	b) Ausstattung, Kostüm, Maske: Materialien, Texturen, Oberflächen	39
	c) Ausleuchtung des Sets	40
	d) Tiefenauflösung	40
4.2	Postproduktion von LF-Filmen eines Kamera-Arrays	41
4.2.1	Handhabung der Daten	41
	a) Datenmenge, Speicherplatz, Datenformat	41
	b) Datenqualität, Metadaten	42
	c) Geschwindigkeit, Rechenzeit, Dailies	43
4.2.2	Hardware & Software	44
4.2.3	Weitere technische & kreative Möglichkeiten	45
	a) Tiefenbasiertes Relighting/Reshading	46



	b) Tiefenbasierte Farkorrektur	47
	c) CGI/Live Action Integration & Compositing: Green Screen, Backplates, Set Extensions	47
	4.2.4 Abwärtskompatibilität, Versionen, Kompression	49
Kapitel 5:	Stand der Forschung: Vergleich mit TOF-Kameras als Alternative zur Aufnahme von Tiefeninformationen im Film	50
5.1	Aufbau & Funktionsweise der ToF-Kameras	50
5.2	Eigenschaften und deren Vor- & Nachteile	53
	a) (Tiefen-)Auflösung	53
	b) Field of View (Sichtfeld), Objektiv	54
	c) Entfernungen, Messzeiten	54
	d) Hintergrundlicht, Dynamikumfang	54
	e) Aufbau, Kompaktheit, Temperatur	55
	f) Geschwindigkeit & Bewegung	56
	g) Rechenzeit, Datenauswertung, Tiefenkarten	56
	h) Mehrfachreflexion: Texturen, Strukturen, Materialien	57
	i) Einsatz mehrerer Kameras	57
5.3	Einsatzgebiete & Anwendungen	58
	a) Automobil	58
	b) Gaming & Mensch-Maschinen-Schnittstellen	58
	c) Medizin	58
	d) Robotik	59
	e) Industrielle Bildverarbeitung & Messtechnik	59
	f) 3D-Drucker	59
5.4	Vergleich zu LF: ToF-Kameras in Kombination mit herkömmlicher Kamera	61
5.4.1	Aufbau & Funktionsweise des Kombi-Systems	61
5.4.2	Eigenschaften und deren Vor- und Nachteile	63
	a) Depth Keying	63
	b) Markerloses Kameratracking	64
	c) Systemkalibrierung	64

	d) ToF-Kamera & Fusion der Kamerabilder	64
	e) Depth Image Auflösung & Upscaling	65
	f) Geschwindigkeit	65
	g) Beleuchtung, Schatten, Oberflächenreflexion	65
	Tabellarischer Vergleich	68
Kapitel 6:	Fazit & Ausblick: Ist Lightfield die Zukunft von	
	Film & Fernsehen	72
6.1	Wo führt die Zukunft hin und was wird Standard?	72
6.2	Die Zukunft von Lightfield	73
	Danksagung	78
	Anhang	79
	Abkürzungsverzeichnis	80
	Abbildungsverzeichnis	81
	Literatur- und Quellenverzeichnis	83

Einleitung

Wer kennt dieses Problem in der Fotografie nicht: Man möchte schnell einen Schnappschuss von etwas machen, da es nur für einen kurzen Moment so perfekt scheint, aber die Kamera stellt nicht schnell genug scharf, um schnell auslösen zu können oder man hat in dem Moment das falsche Objektiv auf der Kamera. Vielleicht herrschen auch schwierige Lichtverhältnisse und das Bild verwackelt?

Aber auch professionelle Filmteams und Kameramänner stehen häufig vor Problemen: Schlecht gezogene Schärfe bei bewegten Objekten, ruckelnde Kamerafahrten und Schwenks bedingt durch Zeitdruck und Drehsituation. Schwierige Lichtverhältnisse an Drehorten, der falsche Bildausschnitt oder eine unschöne Perspektive aufgrund bestimmter Gegebenheiten. Meistens treten solche Probleme genau dann auf, wenn eine Szene sowieso schon sehr aufwändig und zeitintensiv oder nicht mehr reproduzierbar ist. Häufig müssen auch aus Gründen der Zeit, Kosten und Realisierbarkeit Abstriche bei bestimmten Einstellungen hingenommen werden. Dies schränkt die Filmschaffenden mitunter in ihrer Kreativität stark ein, sodass nicht immer die filmische Handlung die Umsetzung festlegt, sondern oft die technischen Möglichkeiten die Handlung dirigieren.

Am liebsten hätten viele dann gerne erneut die Chance, eine Szene nochmal zu fotografieren oder zu filmen, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Dank einer neuen Technik, der *Lightfield*-Technik (LF), oder auch *Lichtfeld*-Technik, können Bilder und Filme zukünftig im Nachhinein bezüglich vieler Parameter wie Fokus, Tiefenschärfe, Bildausschnitt, Perspektive oder Lichtverhältnisse – um nur die einfachsten zu nennen - korrigiert werden.

Bei dieser Technik werden - grob umschrieben - so viel Lichtstrahlen wie möglich im Raum aufgenommen, um möglichst detaillierte Informationen über die Geometrie der Szenerie zu erfassen und in der Nachbearbeitung dadurch Veränderungen – basierend auf den Tiefeninformationen einer Szene - zu ermöglichen. Dadurch ergeben sich vielfältige Möglichkeiten im Nachhinein bei der Nachbearbeitung. Das Ziel sind optimale und absolut kontrollierbare Ergebnisse, sowie bisher am Set schwierig umsetzbare filmische Effekte noch mehr in der Postproduktion zu erzeugen oder für Spezialeffekte (VfX) und Computer generierte Bilder (CGI) viele Prozeduren zu erleichtern.

Erste Fotokameras basierend auf der *Lightfield*-Technik sind bereits für den Endverbraucher erhältlich und an Videofunktionen wird von den Herstellern gearbeitet.¹ Auch an professionellen *Lightfield*-Aufnahmesystemen für die Film- und Fernsehproduktion wird geforscht und getestet.

Das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) hat bereits einen ersten kurzen Stop-Motion Film gedreht, um die neuen Möglichkeiten dieser Technik zu veranschaulichen und erhofft sich von der Kooperation beim Forschungsprojekt *Lightfield* mit der HdM weitere Ergebnisse und die Akquisition von expliziterem und qualitativ besserem Anschauungsmaterial, um *Lightfield* weiter zu entwickeln und auf den Markt zu verhelfen.

Die Autorin möchte sich in dieser Masterarbeit intensiv mit der *Lightfield*-Technik auseinandersetzen, denn sie bietet nicht nur Chancen und Verbesserungen, sondern stellt die Film- und Fernsehindustrie auch vor technische Probleme. Deshalb soll zunächst die Geschichte und theoretische Entwicklung von *Lightfield* untersucht werden und in diesem Zusammenhang auch, weshalb überhaupt der Bedarf danach besteht. Dazu soll geklärt werden, wie die prototypische *Lightfield*-Kamera des Fraunhofer Institutes aufgebaut ist, wie sie technisch funktioniert, welche Möglichkeiten sie verspricht und welche Herausforderungen dadurch beim Dreh und in der Postproduktion entstehen. In dieser Arbeit soll gleichzeitig sowohl auf Herausforderungen als auch auf Möglichkeiten, die sich in den Bereichen Dreh und Postproduktion ergeben, eingegangen werden. Deshalb wird vergleichend auch noch eine andere, ebenfalls recht neue Technik, die *Time-of-Flight*-Technik (ToF) detaillierter vorgestellt. Natürlich ist dabei, wie beim Medium Film an sich, nicht nur der technische Hintergrund von Bedeutung, sondern auch die kreativen Möglichkeiten.

In dieser Arbeit werden in vielen Teilen vorwiegend Ergebnisse und Erkenntnisse präsentiert, die im Rahmen des erwähnten Forschungsprojektes gewonnen wurden. Da die Entwicklung einer technischen Innovation immer viel Zeit mit Diskussionen, Weiterentwicklungen und Tests erfordert, basieren die hier angeführten Ergebnisse

¹ Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography Revolutionizes Imaging
[URL: <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/lightfield-photography-revolutionizes-imaging>; 21.04.15].

vermehrt auf theoretischen Überlegungen und Einschätzungen der beteiligten Branchenexperten, Mitarbeiter, Professoren und Studenten. Soweit im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit möglich, sollen auch erste Erkenntnisse aus praktischen Tests - konkret dem Lightfield-Testdreh an der HdM im Dezember 2014 und der anschließenden Postproduktion - einfließen und detailliertere Informationen liefern.

Abschließend beabsichtigt die Autorin einen ersten vorsichtigen Ausblick zur Zukunft der *Lightfield*-Technik in Film und Fernsehen und versucht eine erste Einschätzung zu geben, ob *Lightfield* eine neue attraktive Alternative zu bisherigen Bewegtbildaufnahmeverfahren mit herkömmlichen Filmkameras ist, auch speziell im Hinblick auf die Gewinnung von dreidimensionalen Tiefeninformationen. Und zwar sowohl für kreative Filmschaffende am Set als auch in der Postproduktion, bei den Spezialeffekten und in der Computeranimation.

In der Medienbranche erkennen viele bereits das mögliche Potenzial dieser neuen Technik, darunter auch Winston Hendrickson (Vizepräsident Digital Imaging Adobe Systems):

"Plenoptics is about way more than refocusing images"²

- Winston Hendrickson (Adobe) -

² Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography Revolutionizes Imaging.

1. Kapitel : Entwicklung und Geschichte der LF-Technik

Die Lichtfeld-Technik kündigt vermutlich eine der größten Veränderungen im Erstellen optischer Abbildungen seit 1826 an, als das erste permanent lichtbeständige Foto einer Landschaft vom Franzosen *Joseph-Nicéphore Niépce* (1765-1833) mit der Camera Obscura gemacht wurde.¹

Da das Thema Lightfield erst seit Kurzem im Film- und Fotobereich durch erste lightfield-fähige Fotokameras und entsprechende Forschungsprojekte aufkommt, könnte man meinen, es handle sich beim Lichtfeld-Konzept um einen völlig neuen revolutionären Ansatz. Allerdings hatte bereits weit vor unserem Hightech-Zeitalter schon ein bekanntes Universalgenie mit dem Namen *Leonardo Da Vinci* ähnliche Gedanken und das Phänomen des Lichtfelds wurde bis heute immer wieder von Wissenschaftlern in Überlegungen einbezogen.

1.1 Erste Ideen & Konzepte

Leonardo Da Vinci (1452-1519) – Maler, Ingenieur, Anatom, Naturphilosoph, kurz Universalgelehrter² – befasste sich bereits vor über 500 Jahren mit dem Phänomen des Lichtfelds, allerdings auf eine viel abstraktere Weise. Da Vinci war seiner Zeit mit seinen Erfindungen und technischen Vorstellungen schon weit voraus. Er entwarf beispielsweise Helikopter und mechanische Rechner Jahrhunderte bevor es tatsächlich möglich war diese zu bauen und er hatte damals ebenfalls bereits abstrakte Vorstellungen in seiner Fantasie von einem Bildaufnahmegerät, welches jedes optische Detail einer Szene aufnehmen konnte.³ In seinen Arbeiten zur Malerei hatte er bereits Vorstellungen, was Licht bedeutet:

"The air is full of an infinite number of radiant pyramids caused by the objects located in it. These pyramids intersect and interweave without interfering with each other [...]. The semblance of a body is carried by them as a whole into all parts of the air, and

¹ Encyclopaedia Britannica (13.07.2014): Eintrag zu Nicéphore Niépce
[URL: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/414651/Nicéphore-Niepce>; 21.04.15].

² Lexikon der Physik Online auf Spektrum.de (2015): Eintrag zu Leonardo DaVinci
[URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/leonardo-da-vinci/8963>; 21.04.15].

³ Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography [...].

each smallest part receives into itself the image that has been caused."⁴

- Leonardo DaVinci -

Da Vincis Verständnis und Beschreibung von Licht als Verschachtelung von Strahlen, die von Objekten im Licht ausgehen, sich kreuzen und verweben ohne sich gegenseitig zu stören, klingt zwar sehr poetisch, trifft aber im Grunde den Kern der Sache schon relativ gut.

Etwas konkreter wurde 1846 dann der Experimentalphysiker *Michael Faraday* (1791-1867)⁵ in seiner Ausarbeitung „Thoughts On Ray Vibration“. Dort beschrieb er, dass das Licht - ähnlich dem Magnetfeld - ebenfalls als ein Feld betrachtet werden kann, konnte jedoch noch keine Formeln dafür definieren. Dies gelang erst *James Clark Maxwell* 1874 mit der Formulierung seiner Gleichungen. Zusammen mit der Entdeckung weiterer Licht-Eigenschaften durch andere Physiker führte dies zu ersten Grundlagen der Lichtstärkemessung Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts.⁶

Der Begriff Lichtfeld wurde erst etwas später (1936) dann von *Arun Gershun* durch seine Arbeit über die radiometrischen Eigenschaften des Lichts im dreidimensionalen Raum geprägt und von weiteren Wissenschaftlern aufgegriffen. Er stellte fest, dass die Lichtmenge an unterschiedlichen Punkten im Raum leicht variiert, - abgesehen von Schatten und verschiedenen Oberflächen, wo eine Abweichung zu erwarten wäre – und das mit rechnerischer und analytischer Geometrie beschrieben werden kann. Da Gershun aber die technischen Möglichkeiten, beispielsweise ein Computer, fehlten, blieb seine Theorie lange Zeit genau dies.⁷ In den letzten zwei Jahrzehnten fand der Begriff vor allem in der Datenverarbeitung und Computergraphik, darunter der Erzeugung computergenerierter Bilder, Anwendung.⁸

⁴ Yale University Press (Hrsg.): *Leonardo on Painting: An Anthology of Writings by Leonardo Da Vinci, with a Selection of Documents Relating to His Career as an Artist*; New Haven (Connecticut); 2001; S. 50
[URL: http://books.google.de/books?id=roHf588GZJYC&pg=PA49&hl=de&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false; 21.04.15].

⁵ Lexikon auf wissen.de (2015): Eintrag zu Michael Faraday
[URL: <http://www.wissen.de/lexikon/faraday-michael>; 21.04.14].

⁶ Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society: *Lightfields And Computational Imaging*; PDF; S. 1
[URL: <http://graphics.stanford.edu/papers/lfphoto/levoy-lfphoto-ieee06.pdf>; 21.04.15].

⁷ ebd.; S. 1.

⁸ ebd.; S.1.

1.2 Lichtfeld in der frühen Fotografie

Natürlich gab es, nach den ersten Erkenntnissen zum Lichtfeld, auch Überlegungen dieses in der Fotografie anzuwenden.

Die Entwicklung eines Aufnahmeprinzips, mit einem sogenannten plenoptischen System, basiert unter anderem auf den Erkenntnissen des französischen Physikers und Nobelpreisträgers für Farbfotografie *Gabriel Lippmann*. Er stellte 1908 mit der „Integralen Photographie“ seine Forschungen zur Anwendung des Lichtfelds in der Fotografie vor. Der Grundgedanke seiner Arbeit sah vor, winzige Linsen aneinanderzureihen, um so das Lichtfeld einer Szene einzufangen, auf einen einzigen Filmstreifen zu projizieren und mit derselben Technik auch wiederzugeben. Jedoch war damals die Technik zur Umsetzung noch nicht reif genug und fand daher keine Verbreitung.^{9 10 11}

1.3 Lichtfeld hier und heute

Zumindest theoretisch gab es die Lichtfeld-Technik, welche in den aktuellen Lichtfeldkameras angewendet wird, also schon in diversen Ausprägungen und Vorstufen vor vielen Jahrhunderten. Der Einsatz in Fotokameras für Endverbraucher schien dennoch lange Zeit, aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten, in weiter Ferne. Zunächst kam die Technik in wenigen Systemen in der Industrie zum Einsatz. Ein solcher Hersteller ist die deutsche Firma Raytrix, die seit 2010 Lichtfeld-Kameras für die Industrie in Bereichen wie Medizintechnik, Sensorik und Bilderkennung anbietet. Sie haben sozusagen Pionierarbeit geleistet und diese Technik vorangetrieben. Für die breite Masse der Endverbraucher fehlte jedoch noch eine solche Kamera, bis der kalifornische Hersteller - die Firma Lytro - 2012 eine erste erschwingliche plenoptische Fotokamera für den Endnutzer auf den Markt brachte.¹²

⁹ Lichtfeld-Kamera.net (2015): Definition Lichtfeld

[URL: <http://www.lichtfeld-kamera.net/p/lichtfeld.html>; 21.04.15].

¹⁰ Pichler,Thomas; Artikel im Photoscala Online Magazin (23.06.2011): Lichtfeld-Kamera: Autofokus war gestern

[URL: <http://www.photoscala.de/Artikel/Lichtfeld-Kamera-Autofokus-war-gestern>; 21.04.15].

¹¹ Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography [...].

¹² Pichler,Thomas; Artikel im Photoscala Online Magazin (23.06.2011): Lichtfeld-Kamera[...].

2. Kapitel: Was ist die Lichtfeld-Technik und wofür steht sie?

2.1 Was ist das Lichtfeld und wie funktioniert es?¹

a) Lichtfeld & Plenoptische Funktion

Etwas weniger poetisch als Leonardo Da Vincis Definition vom Lichtfeld ist die Formulierung von Arun Gershun. Er beschrieb das Lichtfeld als die Menge an Lichtstrahlen, die an jedem Punkt in einem (dreidimensionalen) Raum in jede Richtung fällt:

„[...]the amount of light traveling in every direction through every point in space.“²

- Arun Gershun -

Diese Definition ist noch heute die Basis der Lichtfeldtechnik. Das Licht, welches an jedem Punkt im Raum eintrifft, trägt alle Informationen in sich, die später für die Reproduktion einer beliebigen Sicht von genau diesem Punkt aus nötig ist (*Abb. 1*).

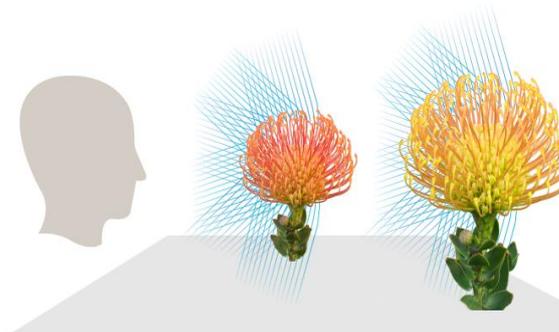


Abb. 1: Verdeutlichung der Lichtstrahlen ausgehend von einem Objekt

Nun stellt sich vielleicht die Frage, ob nicht genau das bereits in herkömmlichen Digitalkameras passiert? Die Antwort ist ganz klar: Nein. In den bisherigen Kameras werden alle Lichtstrahlen, die auf einen Punkt des Bildsensors in der Kamera treffen gebündelt beziehungsweise vereint und somit nur die Position und Intensität des

¹ Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society[...]; PDF; S. 1.

² Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society[...]; PDF; S. 1.

Strahls festgehalten. Dadurch gehen die Richtungsinformationen der einzelnen an diesem Punkt eintreffenden Lichtstrahlen verloren, was zur Folge hat, dass sich aus dieser Aufnahme nur ein herkömmliches zweidimensionales Bild mit fixen Parametern ergibt. Nämlich so, wie die Szene in diesem Moment fotografiert wurde.³

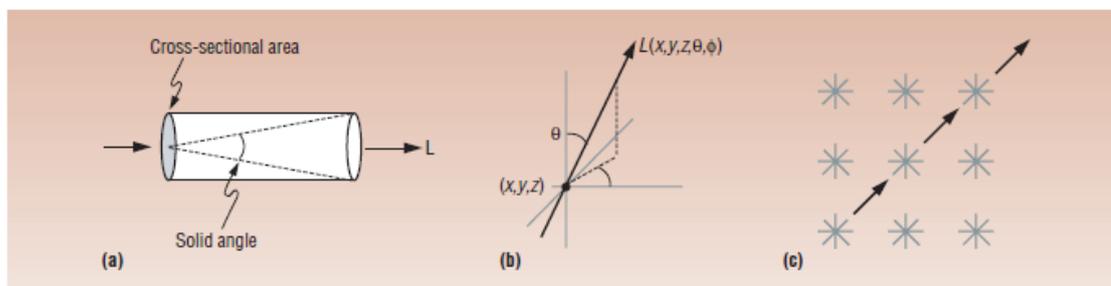


Abb. 2: 5D Plenoptische Funktion: a) Strahldichte L entlang eines Strahls; b) Parametrierung des Strahls; c) Konstante Strahlung ohne Hindernis reduziert die plenoptische Funktion auf $4D^4$

Die Lichtfeld-Technik löst dieses Problem und nimmt anstatt der bloßen Summe der eintreffenden Lichtstrahlen auf jedem Sensorpunkt auch die Richtungsinformation jedes einzelnen eintreffenden Lichtstrahls mit auf. Mathematisch gesehen, sind die aufgezeichneten Informationen ein Teil der sogenannten *Plenoptischen Funktion*. Strahlen sind die Lichtinformationsträger. Die Menge an Licht, die entlang eines Strahls fließt, wird Strahldichte genannt, mit L bezeichnet und in Watt pro Steradian und Quadratmeter gemessen. Steradian misst dabei den Raumwinkel und Quadratmeter den Querschnitt-Durchmesser der Strahldichte (Abb. 2, a).

Kurz gefasst, beschreibt die *Plenoptische Funktion* also die Summe aller Lichtstrahlen an einem bestimmten Punkt im Raum zu jedem Zeitpunkt – daher ist es eine idealisierte Funktion - und setzt sich aus fünf Dimensionen zusammen. Drei – nämlich x , y und z – sind nötig für die Angabe des Ausgangspunkts und zwei – meistens θ und φ genannt – beschreiben den Einfallswinkel eines Strahls (Abb. 2, b). Fällt der Strahl ohne ein Hindernis auf den Bildsensor, so ist die *Plenoptische Funktion* reduziert auf vier Dimensionen, da die Verfolgung des Strahls dann einfacher ist. In diesem Fall fällt die Größe z weg, da man nur zu wissen braucht wo der Strahl eine Ebene trifft – also x und y – und mit welchem Winkel - θ und φ – (Abb. 2, c).⁵ Somit werden alle

³ Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography [...].

⁴ Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society[...]; PDF; S. 2.

⁵ Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography [...].

Ebenen auf einmal erfasst und im Nachhinein kann beliebig darauf zugegriffen werden.

Es reicht also bereits die Information, wie Licht eine einzelne Ebene durchfließt - solange keine Hindernisse dazwischen liegen – um auch die Positionen und Richtungen der umliegenden Strahlen zu berechnen. Daher handelt es sich beim Lichtfeld effektiv um eine vierdimensionale Größe und es wird daher oft auch als 4D-Lichtfeld bezeichnet.⁶

b) Lichtfeld-Rendering

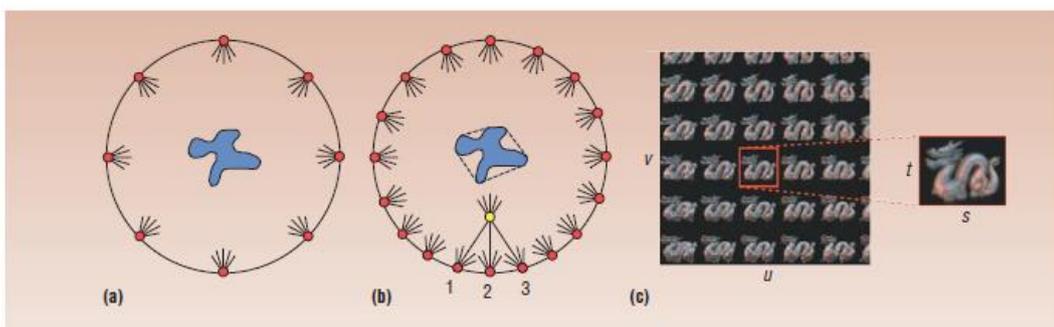


Abb. 3: a) Implementierung in QuickTime mit weit auseinanderliegenden Kamerapositionen (rote Punkte), daher ist nur ein umkreisen des Objekts (blau) nicht aber das Annähern möglich; b) dichte Kamerapositionen im Lightfield ermöglichen neue Betrachtungspunkte (gelb); Lichtfeld: 2D Sammlung (u,v) von 2D-Aufnahmen (s,t) ⁷

Wenn die Erfassungspositionen bei der Aufnahme eines Objekts oder einer Szene dicht genug beieinander liegen, kann zwischen den verschiedenen Ansichten oder auf kleinerer Ebene gesprochen – Pixeln – ausgewählt werden. Möglich ist auch die Interpolation unter angrenzenden Pixeln, um neue Betrachtungsperspektiven und –positionen zu generieren, an denen die Kamera bei der Aufnahme nicht stand (Abb. 3, b). Ist das aufgezeichnete Lichtfeld dicht genug, kann man praktisch fast überall stehen. Wichtig ist aber, dass man außerhalb von konvexen Bereichen eines Objekts bleibt (Abb. 3 a+b, gestrichelte Linie um blaues Objekt), da dort durch Verdeckungen nicht alle Lichtstrahlen korrekt erfasst werden können.

⁶ Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography [...].

⁷ Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society[...]; PDF; S. 3.

Das Lichtfeld ist also im Grunde eine zweidimensionale Sammlung (Standpunkte der Kamera) von zweidimensionalen Kameraaufnahmen (*Abb. 3, c*).

Es ergibt sich die Frage: Wie viele Bilder sind für ein „gutes“ Lichtfeld nötig? Die Antwort: Pauschal lässt sich das nicht sagen. Es ist abhängig davon welche Betrachtungspositionen und -perspektiven man nachträglich einnehmen bzw. generieren möchte. Möchte man beispielsweise ein Objekt umrunden, müssen alle Seiten aufgezeichnet werden, möchte man sich einem Objekt annähern, müssen die Aufnahmen recht dicht und möglichst hochauflösend gemacht werden. Das Sampling des 4D-Lichtfelds - die Menge und Anordnung der Aufnahmen – bestimmt also die nachträglichen Manipulationsoptionen. Nicht genügend Pixel-Auflösung ergibt verschwommene Bilder, besonders wenn man von der Aufnahmeposition abweichende Positionen generieren will. Nicht genügend Bilder ergeben Geisterschatten (Doppelbilder) durch das Überblenden zu weit auseinanderliegender Perspektiven.

Die aufgezeichneten Daten durch die Lichtfeld-Technik sind also äußerst reichhaltig an Informationen und entsprechend vielseitig, was es im Nachhinein beispielsweise ermöglicht, eine Vielzahl an leicht unterschiedlichen Perspektiven mit diversen Tiefenschärfeninformationen zu generieren und den Fokus zu ändern. Für die aufgezeichneten Tiefeninformationen gibt es zahlreiche denkbare Anwendungsmöglichkeiten, darunter die nachträgliche Erzeugung von 3D-Bildern. Es ergeben sich aber noch etliche andere Möglichkeiten und Vorteile aus dem Lichtfeld (*s. Kapitel 3 und 4*).

Erwähnt werden muss jedoch, dass das Lichtfeld aus unendlich vielen Lichtstrahlen aus unendlich vielen Richtungen und Positionen besteht. Daher ist es zum jetzigen Stand noch nicht möglich das komplette Lichtfeld aufzunehmen. Dennoch gelingt es bereits für einen großen Teil. Je höher aber die Auflösung des Sensors bzw. je mehr Kameras, desto mehr Informationen des Lichtfelds können eingefangen werden.

2.2 Lichtfeld als Teil der Photogrammetrie: Tiefeninformation & 3D Geometrie als Basis^{8 9 10}

a) Teilbereich der Photogrammetrie

Die Lichtfeld-Aufnahmetechnik gehört zum großen Bereich der Photogrammetrie oder Bildmessung. Dabei wird aus vielen Fotoaufnahmen von vielen Kamerastandpunkten aus hintereinander oder von mehreren Kameras an unterschiedlichen Orten gleichzeitig ein Objekt oder eine Landschaften geometrisch vermessen. Dieses Verfahren zur 3D-Rekonstruktion basiert auf der Triangulation, d.h. Sichtlinien/Lichtstrahlen werden von jeder Kamera zu Punkten des Objekts aufgezeichnet und verrechnet – ähnlich wie unsere Augen Tiefe erzeugen -, weshalb mindestens zwei Bilder nötig sind. Durch Kenntnis der Verzerrung und Eigenschaften der Objektiv/Kameras kann mit entsprechenden Algorithmen dann die räumliche Lage, dreidimensionale Form und Beschaffenheit der aufgezeichneten Objekte bestimmt werden. Als Ergebnis erhält man Karten, Zeichnungen, Messungen, 3D-Modelle oder Punktwolken (point clouds).

Etwa um 1900 entstand dieses Fachgebiet der Geodäsie und gehört zur Fernerkundung, wobei in die zwei Hauptanwendungsgebiete Luftbildphotogrammetrie – Kamera im Flugzeug - und terrestrische Nahbereichsphotogrammetrie im Bereich weniger Millimeter bis etwa 100 Meter - Kamera in der Hand, auf einem Stativ oder Fahrzeug - unterschieden wird. Bei letzterem können alle erdenklichen Aufnahmepositionen eingenommen werden, wie beispielsweise wenn ein Objekt mit einer Handkamera von unterschiedlichen Seiten fotografiert wird.

Verfahren der Photogrammetrie sind passive Verfahren, da sie ohne Berührung oder aktive Emission von Licht, bloß anhand der reflektierten oder emittierten Strahlung des vermessenen Objekts bei natürlichem Licht, arbeiten. Dank neuer Bildaufnahmegeräte und der Digitaltechnik wird die Photogrammetrie immer genauer, detaillierter und schneller, was auch an der besseren Verarbeitung großer Datenmengen liegt. Anwendung findet die Photogrammetrie in etlichen Bereichen, darunter

⁸ Geodetic-Systems-Website (2015): V-STARS: What is photogrammetry?
[URL: <http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>; 21.04.15].

⁹ Wikipedia-Eintrag (2015): Photogrammetrie
[URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Photogrammetrie>; 21.04.15].

¹⁰ Walford, Alan (2012): What is photogrammetry?
[URL: <http://www.photogrammetry.com/index.htm>; 21.04.15].

(topografische) Landkarten-Erstellung, Land- und Forstwirtschaft, Architektur-Vermessung, Archäologie, Unfallrekonstruktion, Medizin (Röntgenologie), Biomechanik, industrielle Messungen und natürlich in den letzten Jahren auch der Kinematographie zur Vermessung von Filmsets und für interessante, sonst kaum realisierbare Kamerafahrten und Effekte wie im Film *Matrix*. Hier spricht man auch gerne von Image-Based-Modeling (IBM), also der Erschaffung virtueller 3D-Räume anhand von Fotoaufnahmen und deren Daten.

Die aufgezeichneten Bilder und Videos zur Messung sollten von hoher Qualität sein, um bestmögliche Genauigkeit, Verlässlichkeit und Automatisierung zu gewährleisten. Da Photogrammetrie kein perfektes Verfahren ist – dann würden zwei Bilder genügen – sollte auch eine ausreichende Zahl an Aufnahmen gemacht werden.

Eine weitere im Filmbereich angewendete passive Möglichkeit zur Aufzeichnung von Tiefeninformationen ist der Einsatz von Stereokameras oder Light Stages.

Im Gegensatz dazu gibt es auch aktive Verfahren, die mittels emittierten Lichts Objekte oder Szenen vermessen, wie Laser Scanner, Structured Light oder Time-of-Flight-Kameras. Sie gehören zur Kategorie der Depth Cameras/Tiefenkameras oder Ranging Cameras/Entfernungsmessungskameras und werden unter anderem auch in Spielekonsolen wie der Nintendo Wii oder Microsoft Kinect eingesetzt. Diese RGB-D-Kameras zeichnen Farbbilder in RGB plus Tiefeninformationen pro Pixel auf.¹¹

Da heutzutage 3D-Inhalte bzw. Tiefeninformationen von Szenen für Fernsehen und Kino, sowie (Computer)-Spiele oder industrielle Anwendungen immer gefragter sind (IBM in Computer Graphik, Virtual Reality, Virtual Cinematography, Maschinelles Sehen/Computer Vision etc.) wird in dieser Arbeit auch eine Alternative zu Lightfield, die Time-of-Flight-Kameras, näher betrachtet werden, um Vor- und Nachteile von Lightfield noch genauer herauszuarbeiten.

b) Hauptzweck von Lichtfeld-Systemen

Was ist nun der Hauptzweck oder DER große Mehrwert von Lichtfeld-Aufnahmen? Ganz klar ist der große Vorteil, dass Aufnahmen - ob nun Fotos oder Video – Tiefen-

¹¹ Henry et. al (nach 2009): RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments; PDF; S. 1
[URL: <http://www.cs.washington.edu/robotics/postscripts/3d-mapping-iser-10-final.pdf>; 21.04.15].

informationen einer Szene und somit deren dreidimensionale Geometrie aufzeichnen. Diese Daten werden heutzutage für viele Arbeitsschritte in der Filmproduktion benötigt und können in guter Qualität diese erheblich erleichtern.

Zum Beispiel, wenn nachträglich ein computergeneriertes Objekt in einen Real-Life Film möglichst perfekt integriert werden soll (CGI/Real-Life-Integration). Auch wenn man für Spezialeffekte detailliertere Informationen über die Umgebung der Szenerie benötigt, die Lichtstimmung bzw. -richtung nachträglich korrigieren will, sich in der Postproduktion für einen anderen Kamerawinkel oder –ausschnitt entscheiden möchte (Virtual Camera) oder gar doch noch eine 3D Variante des Films generieren will.

Dies alles und noch viel mehr ist theoretisch aufgrund der vielfältigen Tiefeninformationen nachträglich möglich.

2.3 Warum kommt Lightfield erst jetzt so richtig auf?

Wie bereits erläutert, besteht das Lichtfeld aus einer unendlichen Menge an Lichtstrahlen im Raum, die aufgezeichnet werden müssen. Unendlich viele Strahlen können noch nicht aufgezeichnet werden, trotzdem gilt: Je mehr Strahlen aufgezeichnet werden – also je höher die Auflösung der Szene bei der Aufnahme ist – desto besser ist der Datenvorrat, welcher das Lichtfeld repräsentiert. Dadurch können später in der Nachbearbeitung umso bessere Ergebnisse bei der Manipulation der unterschiedlichen Parameter erzielt werden.

Man kann sich daher vorstellen, dass die dabei anfallende Datenmenge bei der Lichtfeld-Technik immens ausfällt. Lange Zeit verhinderten daher die technischen Gegebenheiten die Anwendung des Lichtfelds. Erst mit der Erfindung des Computers und der digitalen Aufnahmetechniken bei Kameras ist es jetzt möglich, erste Umsetzungen dieser speziellen Aufnahmetechniken zu realisieren. Die hochauflösenden inzwischen recht günstig produzierbaren, digitalen Bildsensoren und die stark angestiegene Rechenleistung machen das Aufzeichnen, Verarbeiten und Wiedergeben der erzeugten Lichtfeld-Daten praktisch möglich und wirtschaftlich etwas vertretbarer. Dennoch ist die Realisierung der Lichtfeld-Aufnahmeverfahren weiterhin bis auf wenige Ausnahmen in der Fotografie - hauptsächlich den Raytrix und Lytro Kameras – immer noch in der Test- und Entwicklungsphase und findet daher vor allem im For-

schungslabor statt. Dabei geht es im Besonderen auch um die Anwendung und Umsetzung von Lightfield bei Bewegtbild.

Wie bei allen technischen Neuerungen können diese sich nur durchsetzen, wenn sie von Industrie und Endverbrauchern akzeptiert und genutzt werden. Daher spielen natürlich wirtschaftliche Faktoren wie Produktionskosten eines Lightfield-Systems, Rentabilität, Mehrwert, Akzeptanz und Absatz eine wichtige Rolle.

2.4 Realisierung des Lichtfeldes

a) Plenoptische Kamera als Umsetzungsvariante 1^{12 13}

Die Plenoptische Kamera basiert auf den Überlegungen von Gabriel Lippmann und besteht aus einer Kamera mit nur einem Objektiv und einem Sensor-Chip. Den Unterschied zu einer herkömmlichen Kamera (*Abb. 4*) macht das spezialisierte Mikrolinsen-Gitter (engl. Array) aus, welches vor dem Bildsensor installiert ist. Dabei handelt es sich um eine Anordnung aus – meistens zehn- bis hunderttausenden – mikroskopisch kleinen Linsen mit extrem kurzen Brennweiten von um die 0,15 Millimeter. Durch die Mikrolinsen wird es möglich jeden Objektpunkt der Szene aus einer Vielzahl an Betrachtungswinkeln zu verfolgen – nämlich dem perspektivischen Blick jeder einzelnen Linse aus ihrer Position im Gitter -, wodurch sich dann ein aufgezeichnetes Lichtfeld ergibt.^{14 15} Die Anzahl der Linsen bestimmt dabei die Auflösung der möglichen Betrachtungspositionen und die Anzahl der Pixel hinter jeder Linse bestimmt die effektive Auflösung des Bildes/Objekts.

¹² Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography [...].

¹³ Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society[...]; PDF; S. 7/8.

¹⁴ Lightfield-Forum.com (2015); Beitrag: What Is The Light Field
[URL: <http://lightfield-forum.com/what-is-the-lightfield/>; 21.04.15].

¹⁵ Stolc/Huber-Mörk; Laserfocusworld Artikel (06.09.2014); Photonic Frontiers: Computational Imaging
[URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-06/features/photonic-frontiers-computational-imaging-computational-imaging-using-a-multi-linescan-light-field-camera.html>; 21.04.15].

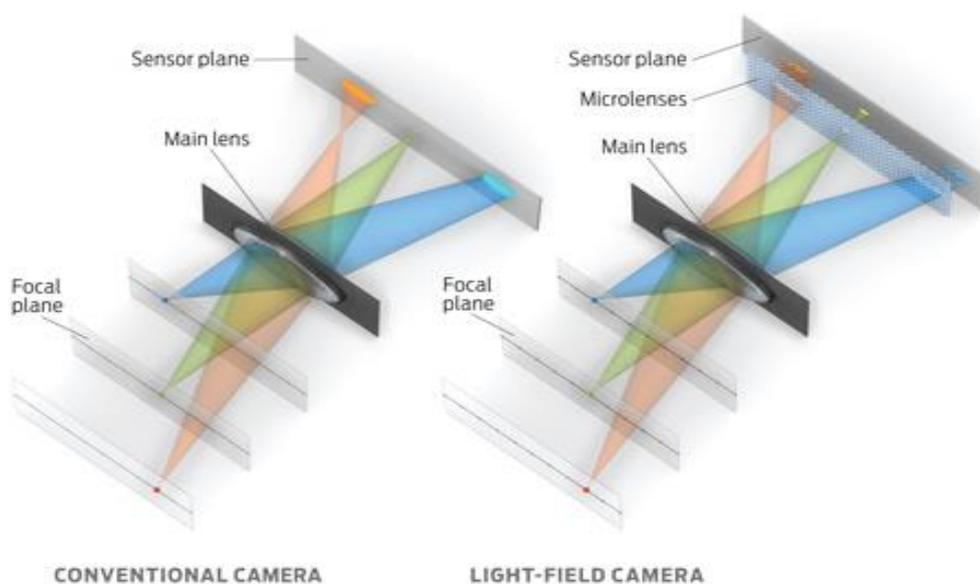


Abb. 4: Vergleich des Aufbaus einer konventionellen und einer Lichtfeld-Kamera

Die Funktionsweise der Plenoptischen Kamera ist nicht ganz einfach zu verstehen, deshalb soll *Abbildung 4* diese etwas verdeutlichen. Die Lichtstrahlen, die vom Objekt aus auf der Hauptlinse eintreffen, werden auf verschiedene Mikrolinsen fokussiert. Jede Mikrolinse projiziert dann ein winziges verschwommenes Bild auf den Sensor hinter dem Linsen-Array (*Abbildung 5, Anhang*). Das Licht, welches an ganz verschiedene Teile dieser verschwommenen Bilder gelangt, kommt von Lichtstrahlen, die die Hauptlinse an verschiedenen Stellen durchlaufen haben. Dadurch wird mit einer Aufnahme sowohl die Position jedes Lichtstrahls beim Durchlaufen der Hauptlinse – mit x und y – aufgezeichnet, als auch der zugehörige Winkel mit θ und φ .

Daraus resultiert ein Bild, welches sich aus ganz vielen kleinen Bildern – entsprechend der Anzahl an Mikrolinsen – zusammensetzt. Jedes dieser „Unterbilder/Subimages“ unterscheidet sich ein bisschen von benachbarten Subimages, da die Lichtstrahlen leicht verschieden umgelenkt wurden, je nach Position der beteiligten Mikrolinse.¹⁶ Damit die Informationen über die Richtung einfallender Lichtstrahlen genutzt werden können, müssen die Informationen aus der aufgenommenen Szenen wenigstens auf mehrere Subimages des Sensors zu finden sein. Durch die Aufteilung

¹⁶ Lightfield-Forum.com (2015); Beitrag: What Is The Light Field.

des Bildsensors in Unterbilder geht auch viel Auflösung verloren, was mit herkömmlichen Chips deutlich bemerkbare Qualitätsverluste erzeugt.¹⁷

b) Kamera-Array als Umsetzungsvariante 2

Der zweite Ansatz zum Aufbau eines Lichtfeld-Aufnahmesystems besteht aus der skalierbaren Anordnung mehrerer Kameras neben- und übereinander – sogenannten Spalten und Reihen - in einem Array. Dieser Ansatz eignet sich nach jetzigem Wissensstand besser für Lichtfeld-Bewegtbild-Aufnahmen mit größeren räumlichen Dimensionen und vermeidet den nachteiligen Auflösungsverlust beim Sensor, wie er bei Plenoptischen Kameras unausweichlich ist. Diese Art von System wird auch beim Forschungsprojekt vom Fraunhofer Institut (IIS) und der HdM verwendet und daher im folgenden Kapitel dieser Arbeit ausgiebig erläutert (*siehe Kapitel 3*). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sind alle Ausarbeitungen deshalb auch auf die Variante mit dem Kamera-Array bezogen.

¹⁷ Wikipedia-Eintrag (2015): Plenoptische Kamera
[URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Plenoptische_Kamera; 21.04.15].

3. Kapitel: Fraunhofer Lichtfeld-Aufnahmesystem: Kamera-Array

3.1 Das Aufnahmesystem und die eingesetzte Technik

a) Wie ist das Aufnahmesystem aufgebaut?¹

Das System besteht aus einer Anordnung kleiner hochauflösender herkömmlicher Kameras, die auf eine Kameravorrichtung (Kamerarig) in Spalten und Reihen montiert sind und einem angeschlossenen Aufnahme-Computer bzw. einem RAID². Durch den Computer können nicht nur die Informationen aller Kameras aufgezeichnet, sondern zusätzlich auch ein Vorschaubild jeder Kamera angezeigt werden.

Das Beispiel-Array des Fraunhofer IIS besteht aus sechs Kameras - in diesem Fall basierend auf Smartphone-Kamera-Technologie -, die in zwei Reihen und drei Spalten angeordnet sind. Die Kameras haben einen kleinen Körper und ermöglichen eine dichte Platzierung zwischen angrenzenden Kameras auf dem Rig. Jede Kamera verfügt über eine Auflösung von etwa 2048x1536 Pixel (etwa 3 Megapixel) und benötigt nur ein Ethernet-Kabel zur Stromversorgung, Datentransfer und Kontrolle. Das Rig ermöglicht eine präzise Ausrichtung der Kameras mit ihren optischen Zentren, was zukünftig durch ein Assistenz-System unterstützt werden kann.

Das beschriebene System wurde beispielsweise bei vergangenen Testaufnahmen eines Miniatursets eingesetzt (*Abbildung 6, Anhang*). Jedoch ist das System skalierbar, das bedeutet, theoretisch ist eine beliebige Anzahl an Kameras in Spalten und Reihen angeordnet möglich. Also auch ein Array aus 3x3 (9), 8x8 (64) oder 16x16 (256) Kameras. Ersteres wurde beim Testdreh im Dezember eingesetzt. Der Vorteil eines skalierbaren Systems ist die Flexibilität bei der Aufzeichnung für unterschiedlichste Anwendungsgebiete (*siehe Kapitel 4*).

¹ Zilly et al. (2013); Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System Allowing Camera Viewpoint and Depth of Field Compositing in Post-Production; PDF; S. 2/3.

² RAID = mehrere Festplatten als logisches System, ermöglicht höheren Datendurchsatz und schnelleren Schreib- und Lese-Zugriff; Informationen aus dem Praxissemester bei der Artus Postproduktions GmbH Ludwigsbург.

b) Verarbeitung der aufgezeichneten Lichtfeld-Daten

Multikamera Image Rektifizierung³

In diesem ersten Schritt werden geometrische Verzerrungen der einzelnen Kameras zueinander rektifiziert, also berichtigt. Diese Eliminierung ist für die korrekte Weiterverarbeitung der Lichtfeld-Daten nötig. Je nach eingesetzter Kamera ist dieser Schritt unterschiedlich aufwendig, da eine GoPro beispielsweise mehr verzerrt als eine Basler-Kamera.

Es wird ein spezieller Algorithmus zunächst auf die einzelnen Reihen und dann auf die einzelnen Spalten angewendet. Dabei wird von jedem einzelnen Kamerabild eine Art lineare Transformation in ein einheitliches Koordinatensystem gemacht, wodurch die Bildkoordinaten derselben Punkte in den benachbarten Kameras eine einfache Beziehung zueinander bekommen (Epipolargeometrie) und die daraus resultierenden epipolaren Linien angrenzender Kamerabilder parallel sind. Daraus ergeben sich horizontal epipolare Linien zwischen den Kameras derselben Reihe und vertikal epipolare Linien zwischen den Kameras derselben Spalte. Die *Abbildung 7* zeigt beispielhaft vier benachbarte rektifizierte Bilder eines Arrays. Dabei wird deutlich, dass die Ecken der roten Rechtecke jeweils zu gleichen Bildpunkten in den angrenzenden Kameras gehören.

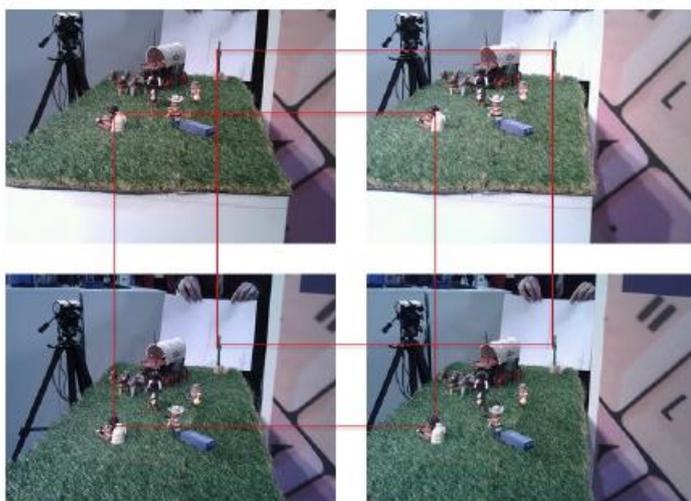


Abb. 7: Rektifizierte Kamerabilder mit korrespondierenden Bildpunkten der vier verglichenen Nachbar-Kameras (Eckpunkte der roten Rechtecke)

³ Zilly et al. (2013); Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition [...]; PDF; S. 3.

Dieses Verfahren erleichtert und beschleunigt die Suche der korrespondierenden Pixel in angrenzenden Kameras extrem.

Multifokale Disparitätsabschätzung⁴

Durch die rektifizierten Bilder ist es dann schnell und stabil möglich Unterschiede angrenzender Kamerabilder abzuschätzen. Es genügt, dieselben Bildpunkte innerhalb derselben Kamerabild-Reihe oder Kamerabild-Spalte zu suchen.

Im ersten Schritt werden vier Stereopaare definiert, nämlich jede Kamera mit einer Nachbar-Kamera aus derselben Reihe und einer aus derselben Spalte. Auf diese Paare wird dann ein spezieller Disparitätsabschätzungs-Algorithmus angewendet und man erhält pro Kamerabild am Anfang zwei Disparitätskarten (disparity maps), da jedes Kamerabild mit zwei direkten „Nachbarn“ verglichen wird. Anschließend werden die beiden disparity maps vereint, indem die konsistenten (übereinstimmenden) Unterschiede der beiden Anfangskarten beibehalten werden und die inkonsistenten (widersprüchlichen) Unterschiede – entstehen beispielsweise durch Verdeckungen in einem der beiden Kamerabilder – verworfen werden. Auf die entstehenden disparity maps wird dann noch der Disparitäts-Postproduktions-Algorithmus (disparity post-processing algorithm) angewendet und als Ergebnis erhält man eine pixeldichte Disparitätskarte pro Kamerabild. *Abbildung 8* zeigt eine solche Karte von vier Kameras.

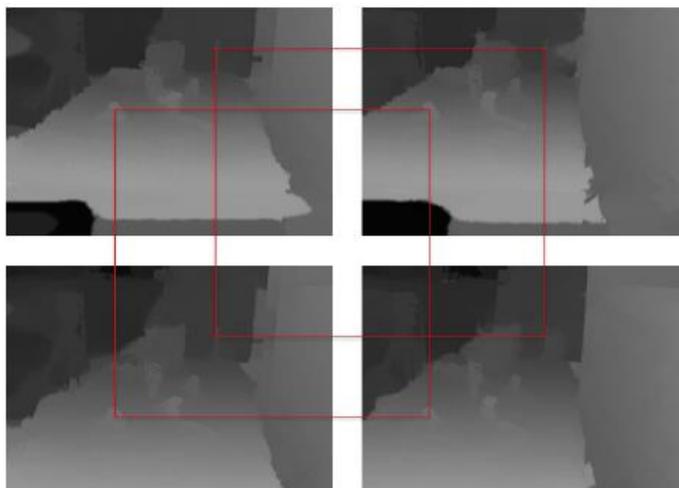


Abb. 8: Pixeldichte Disparitätskarten der vier Kamerabilder aus Abbildung 7

⁴ Ebd.; S. 3/4.

Dichte Lichtfeld-Generierung⁵

Innerhalb der Ausmaße des Aufnahmeanarrays können nachträglich Zwischenbilder (intermediate views) interpoliert werden. Zur Berechnung dieser Zwischenbilder wird der Depth Image Based Rendering (DIBR) Ansatz verwendet. Die direkt aufgezeichneten Bilddaten und die kalkulierten Tiefenkarten werden dann zusammen zur Interpolation (Hochrechnung) des Lichtfeldes genutzt. So kann, trotz Einsatz eines weniger dichten Arrays von Kameras mit geringem Sampling (Abtastung) der Szene, am Ende eine dichte Repräsentation des Lichtfeldes generiert werden (*Abbildung 9*).

Dieses dichte Lichtfeld ist dann die Basis für diverse Nachbearbeitungsoptionen, welche in diesem und im folgenden Kapitel näher beschrieben werden.



Abb. 9: Interpoliertes Lichtfeld mit original Kamerabildern und generierten Zwischenbildern

3.2 Grundsätzliche Nachbearbeitungsmöglichkeiten⁶

Hier werden die Nachbearbeitungsmöglichkeiten beschrieben, für die bereits Algorithmen und ein Plugin für die einfache Handhabung mit Avid existieren. Zudem wurden diese bereits vom Fraunhofer Institut getestet. Nach ersten Erkenntnissen in der Postproduktion ist das Plugin für Avid nicht ganz optimal, weil es eher 2D-Operationen sind, deshalb wird jetzt an Plugins für Nuke gearbeitet, um richtig und effektiv mit den Lichtfeld-Daten als Input arbeiten zu können.

⁵ Ebd.; S. 4/5.

⁶ Ebd.; S. 5-7.

a) **Künstliche Blende (Synthetic Aperture)**

Die Aufnahme des Lichtfelds macht es möglich, im Nachhinein andere Blendenwerte einzustellen und somit auch Einfluss auf die Größe des Tiefenschärfenbereichs zu nehmen und den Fokuspunkt im Bild nachträglich zu verändern (*Abb. 10*).

In der professionellen Bildbearbeitung und Filmproduktion wird mit der Lage der Schärfeebene im Bild die Aufmerksamkeit des Betrachters auf gewünschte Bereiche gelenkt, was zum Erzählen der Geschichte wesentlich beiträgt. Durch Lightfield ist es möglich nachträglich Korrekturen vorzunehmen, wodurch sowohl die Dreharbeiten vereinfacht als auch neue kreative Möglichkeiten geschaffen werden. Beispielsweise kann schlecht gezogene Schärfe während des Drehs nachträglich korrigiert werden. Dies tritt häufig auf, wenn aus optischen Gründen beim Dreh mit einem kleinen Schärfetiefenbereich der Objektiv gearbeitet wird, da es dann besonders schwierig ist die Schärfe bei bewegten Objekten auf den Punkt mitzuziehen. Oder man möchte die Schärfe doch auf einen anderen Bildbereich legen in der Nachbearbeitung, weil dies besser für die Geschichte funktioniert. Zudem ist sogar denkbar zwei oder mehr Schärfeebenen im Bild (Multifokus) festzulegen, was ein völlig neues Seherlebnis darstellen würde.

Man ist somit völlig flexibel und muss keine Einstellungen neu drehen, was immer mit viel Aufwand und vor allem hohen Kosten verbunden ist und für bestimmte Szenen, die sich nicht wiederholen lassen oder bei teuren Action-Szenen, auch nicht geht. Besonders auch für 3D-Filmproduktionen kann dies äußerst hilfreich sein, da bereits kleine Abweichungen der Schärfe und Blende bei den beiden Kameras zu extremen Einschränkungen des 3D-Effekts führen.

Der Kameraassistent (engl. focus puller) und Kameramann (engl. DOP) werden vermutlich vermehrt für solche Entscheidungen in der Postproduktion benötigt und Szenen können dann mit beliebigen Einstellungen neu berechnet (gerendert) werden.

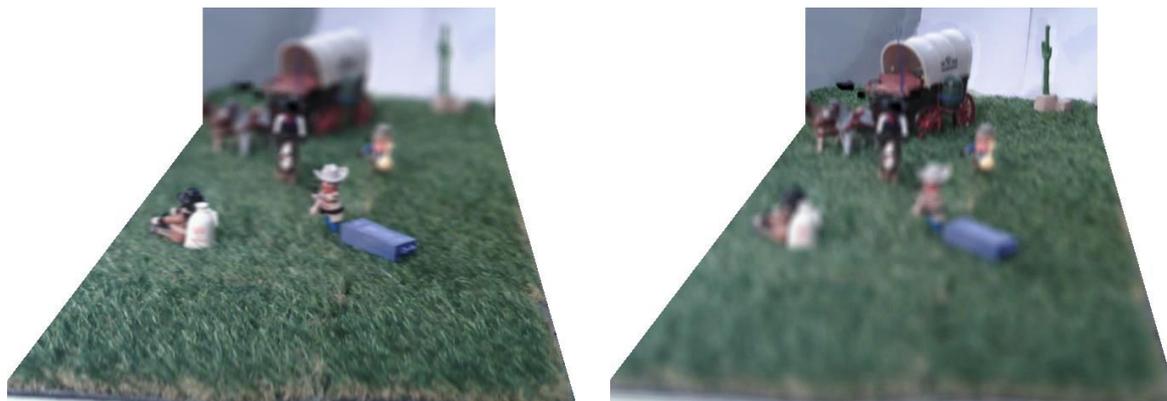


Abb. 10: Nachträgliche Änderung der Schärfeebene einer Aufnahme mit Fokus vorne (links) oder Fokus hinten (rechts)

b) Z-Rendering (Virtuelle Kameraposition)

Nicht nur Schärfe und Blende können nachträglich geändert werden. Auch die Kameraposition in Z-Richtung kann virtuell neu gewählt werden (Abb. 11). Das bedeutet, die Kamera kann näher oder weiter weg vom Objekt bzw. der Szenerie gewählt werden. Dies ist nicht vergleichbar mit einem herkömmlichen Zoom, da die Objekte somit im Vordergrund schneller größer werden als die im Hintergrund, wodurch auch Kamerafahrten simuliert werden können. Für das Rendering bedeutet dies eine Neuberechnung des Kamerastandpunktes mit einem tiefenabhängigen Vergrößerungsfaktor. Natürlich kann auch in X- und Y-Richtung eine etwas andere Kameraposition berechnet werden, solange es von den Lichtfeld-Daten ausreichend abgedeckt wird. Dies ermöglicht auch nachträgliche Korrekturen als sogenanntes Reframing. Zum Beispiel könnten nicht korrekte und deshalb störende Augen-/Sichtlinien zweier Darsteller in aufeinanderfolgenden Einstellungen korrigiert oder eine Tonangel im Bild eliminiert werden. Auch könnten aus weiteren Einstellungen Detailshots – diese benötigen oft viel Zeit am Set - generiert werden. Voraussetzung ist natürlich eine sehr gute Bildqualität des Rohmaterials.⁷

Bei Inhalten für Virtual Reality, also computergenerierten interaktiven virtuellen Umgebungen, ist oft ein Problem, dass Betrachter unterschiedlich groß sind und so-

⁷ Protokoll Lightfield-Expertpanel Nov. 2014: Gruppe 2 (siehe elektronischer Anhang, DVD).

mit unterschiedliche Perspektiven einnehmen würden. Idealerweise gibt es aber für jeden Betrachter die optimale Perspektive für das größtmögliche Erlebnis, beispielsweise bei den beliebten Egoshooter-Spielen, virtuellen Konzerten, Fußballspielen und dergleichen. Dies ist mit den verschiedenen generierbaren Perspektiven von Lightfield realisierbar und lässt es realitätsgetreuer wirken.⁸ Auch für Dokumentationen wären alternative Perspektiven durchaus reizvoll.



Abb. 11: Neuberechnete virtuelle Kameraposition vor dem Kameraarray bei der Aufnahme (rechts) und hinter dem Array (links)

c) **Dolly-Zoom oder Vertigo-Effekt**

Für diesen Effekt wird gleichzeitig ein Zoom mit einer Kamerabewegung in Z-Richtung gerendert (Abb. 12). Dadurch ergibt sich dieser künstlich wirkende Effekt, den viele auch aus dem Film *Matrix* kennen. Dabei bleiben die Objekte im Vordergrund gleich groß, aber im Hintergrund vergrößern sich die Objekte deutlich. Mit normalem Kameraequipment beim Dreh ist dieser Effekt oft nicht sehr sauber umsetzbar.

⁸ Protokoll Lightfield-Expertpanel Nov. 2014: Gruppe 3 (siehe elektronischer Anhang, DVD).



Abb. 12: Dolly-Zoom-Effekt, bei nahezu gleichbleibender Größe der Objekte im Vordergrund, vergrößern sich die Hintergrundobjekte (Planwagen und Kaktus, rechts)

d) Virtuelles Stereo

Basierend auf den aufgezeichneten Lichtfeld-Daten können nachträglich diverse Bilder auch mit unterschiedlichen Inter-Axialen Abständen berechnet und somit zur Erzeugung einer zweiten virtuellen Kamera genutzt werden (Abb. 13). Dadurch kann beim Dreh auf komplexe Stereokamerasysteme verzichtet werden, was den Dreh theoretisch deutlich vereinfacht, insofern die Handhabung des Arrays zukünftig noch verbessert wird. Selbst bei Filmen, die nicht als 3D-Film konzipiert sind, kann nachträglich noch entschieden werden, eine 3D-Variante zu veröffentlichen, was geringeren Mehraufwand bedeutet, als aktuelle Verfahren zur nachträglichen 3D-Film-Erstellung, die zudem fast immer in äußerst schlechtem stereoskopischen Seherlebnis enden. Theoretisch ist es in einer ferneren Zukunft auch möglich, dass jeder Betrachter seinen Augenabstand angibt und dann speziell für ihn eine 3D-Version des Films berechnet wird, sodass der 3D-Effekt für ihn größtmöglich und angenehm ist. Theoretisch müssten sogar je nach Wiedergabe-Medium für 3D-Filme – Kinoleinwand, Computerbildschirm oder Tablet – bisher bereits unterschiedliche Interaxiale Abstände berechnet werden, was natürlich bis dato aus Aufwandsgründen unmöglich ist. Auch diesbezüglich könnte Lightfield Abhilfe schaffen.⁹

⁹ Protokoll Lightfield-Expertpanel Nov. 2014: Gruppe 3 (siehe elektronischer Anhang, DVD).

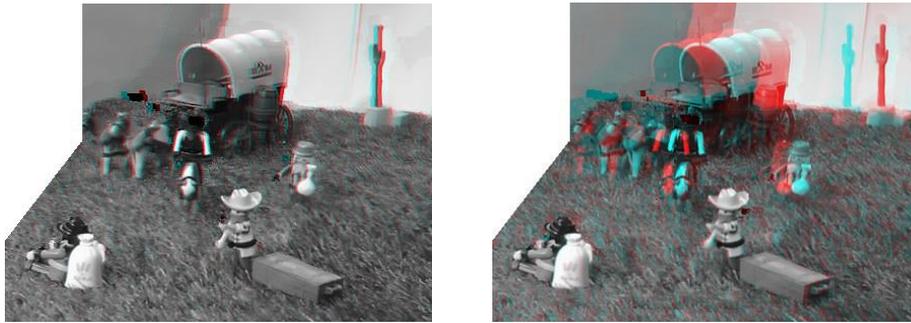


Abb. 13: Rendern eines virtuellen Stereobildes (hier als Anaglyph-Bild verdeutlicht) mit variablen Inter-Axial-Abständen für individuelles 3D bzw. stärkerem oder schwächerem 3D-Effekt. Objekte vorne (Cowboy) sind in der Konvergenz-Ebene, Objekte hinten (Wagen und Kaktus) haben größere Disparitäten

Die beschriebenen nachträglichen Möglichkeiten von Lightfield können zwar am Filmset bereits größtenteils auch so umgesetzt werden, sind aber sehr komplex und erfordern viel Erfahrung, je nach Szeneninhalte. Deshalb sind die Nachbearbeitungsoptionen ein weiterer Mehrwert, um effektiv und ökonomisch zu arbeiten.

4. Kapitel: Herausforderungen & Möglichkeiten der Lichtfeld-Technik im Bewegtbild¹

Grundsätzlich bietet jede neue Technik neue Möglichkeiten, die Abläufe und Arbeitsgänge erleichtern, beschleunigen und in den Kosten reduzieren sollen. Diese Aspekte machen auch vor der Filmbranche nicht halt. Jedoch muss der Mehrwert auch immer zusammen mit den Nachteilen oder Problemen betrachtet werden. Da Lightfield generell und das Kamera-Array des Fraunhofer Instituts (IIS) mit der zugehörigen Software im Speziellen noch am Anfang ihrer Entwicklungsphase stehen, gibt es durchaus auch noch einige Herausforderungen zu bewältigen.

Im Folgenden sollen diese zusammen mit weiteren neuen Möglichkeiten und Vorteilen der Bearbeitung – abgesehen von den in Kapitel 3.3 bereits erläuterten grundsätzlichen Nachbearbeitungsmöglichkeiten - näher betrachtet werden.

4.1 Produktion von Lightfield-Filmen mit einem Kamera-Array

Die hier präsentierten Ergebnisse basieren auf den Erkenntnissen des Expertenmeetings zum Thema Lightfield im November 2014 und auf dem Lightfield-Testdreh an der HdM Stuttgart im Dezember 2014.

4.1.1 Kamera-Equipment

a) Die Kameras

Verwendet wurde ein Kamera-Array mit 9 kleinen Basler-Industriekameras (Basler ACE acA2000-50gc der GigE Reihe) mit 2046x1086 Pixel Auflösung – etwa 2K - und maximaler Bildrate von 50 fps. Gedreht wurde allerdings mit herkömmlicher Bildrate von 25 BpS. Pro Spalte und Reihe wurden 3 Kameras angeordnet. Zusätzlich wurde mittels eines Spiegels eine Sony PMW-F3 Kamera ins Rig miteingebaut, um Vergleichsmaterial mitaufzuzeichnen. Die F3 Kamera wird in dieser Arbeit aus thematischen Gründen nicht weiter berücksichtigt. An den Basler Kameras wurden keine

¹ Die in diesem Kapitel aufgeführten Informationen und Vermutungen basieren auf der Auswertung des Lightfield-Expertpanels im Nov. 2014 an der HdM (Protokolle im Anhang) und den gewonnen Erfahrungen und Erkenntnissen des Lightfield-Testdrehs im Dez. 2014, sowie der anschließenden Postproduktionsphase.

Modifikationen durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Gerät zur Synchronisation der Kameras eingesetzt und eine Aufnahmesoftware vom Fraunhofer Institut entwickelt.

Die Kamera-Ausrüstung an sich ist deutlich günstiger - ausgehend vom getesteten Array - als herkömmliche Kameras, die für Filmproduktionen verwendet werden. Eine der verwendeten Basler-Kameras kostet etwa 600 bis 800 Euro, das gesamte Array somit etwa 6000 bis 7000 Euro. Dies ist sehr günstig, da es ein Bestreben des Fraunhofer Forschungsteams ist, die Lightfield-Filmproduktion mit „Off-The-Shelf Kameras“ möglich zu machen, das heißt mit handelsüblichen günstigen Consumer- bzw. Industrie-Kameras. Im Vergleich dazu kostet eine ARRI Alexa, die aktuell sehr stark zum Einsatz kommt in der Filmproduktion, je nach Modell etwa 50.000 Euro.² Für die Lightfeld-Produktion ist also die Investition in neues Kamera-Equipment nötig, jedoch ist der Betrag deutlich geringer.



Abb. 14: Fraunhofer IIS Lightfield-Array des Testdrehs November 2014 mit 3x3 Basler-Kameras

b) Systemgröße, -flexibilität & -beweglichkeit

Das eingesetzte Array hat etwa eine Größe von 40 mal 40 Zentimetern und ein Gewicht von etwa 2,5 Kilogramm, ist also recht handlich. Es ist auch relativ einfach mittels angeschraubter Stativplatte auf übliches Kameraequipment montierbar, aller-

² Film, TV, Video Website (14.03.2013): Arri nennt Preise und Verfügbarkeit für Alexa-XT-Modelle und Upgrades [URL: <http://www.film-tv-video.de/newsdetail+M58b23420512.html>; 21.04.15].

dings schwingt das Rig bei Bewegungen noch etwas mit, weshalb noch Optimierungen nötig sind.

Theoretisch wäre es auch möglich das Array als Steadycam zu verwenden, dabei gilt es aber zu beachten, dass ein RAID mit Kabeln angeschlossen ist, was den Aktionsradius bis jetzt etwas einschränkt. So müssten die Kabel zusammengebunden und mitgeführt werden. Zukünftig wäre aber für solche Anforderungen auch denkbar, mehrere kleine Rekorder am Array-Rig unterzubringen, um dies somit zu umgehen.

Grundsätzlich ist das Array flexibel, sodass je nach Anforderung einer Szene, die Anzahl und Anordnung der Kameras verändert und angepasst werden kann. Dies ist nach ersten Erkenntnissen auch für jede Szene nötig, um brauchbares Material zu generieren. Ein zweiter Test mit einem GoPro Array und einer sehr weitläufigen Szene hat Material mit zu wenig Parallaxe ergeben, da die Kameras zu dicht platziert waren. *Abbildung 15* macht deutlich, dass je nach Szene und Zweck zwischen Bildqualität, Flexibilität in der nachträglichen Viewpoint-Generierung und Datenmenge abgewägt und ein Array mit dementsprechender Anordnung gewählt werden muss. Ein großes grob besetztes Array erzeugt schlechtere Bildqualität als ein dicht besetztes, dafür weniger Daten und trotzdem noch Viewpoint-Flexibilität (auch für weitläufige Szenen geeigneter). Natürlich kann ein grob besetztes großes Array, ab einer gewissen Größe, auch genauso viel oder mehr Daten als ein kleines Array erzeugen, ist aber dennoch für andere Anwendungszwecke geeignet. Ein kleines Array dagegen bietet gute Auflösung und in der Regel weniger Datenmenge, dafür aber eingeschränktere Viewpoint-Auswahl.

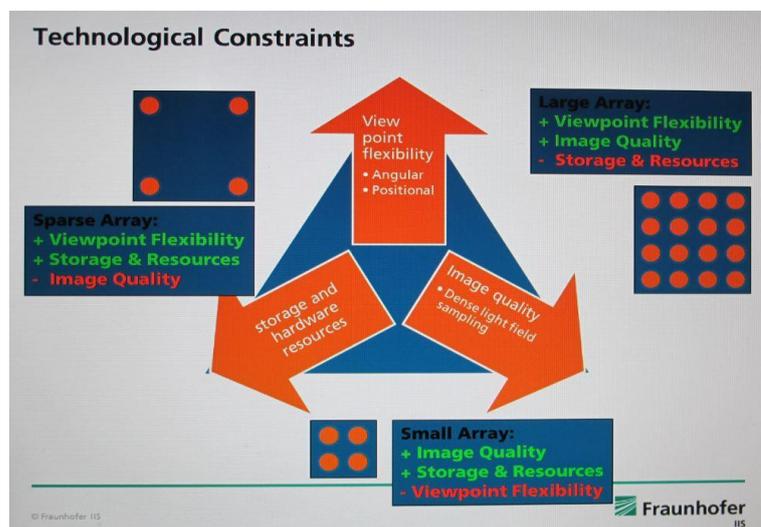


Abb. 15: Fraunhofer IIS Schema zu Technological Constraints

Ebenso ist ein entscheidender Faktor für den zukünftigen Einsatz, ob sich das Array mit Peripherie zukünftig mindestens genauso schnell aufbauen und einrichten (riggen) lässt, wie herkömmliches Equipment. Bei 3D-Systemen hat der Aufwand des Riggings, welcher etwa 30 % mehr Zeitaufwand bedeutet, in der Realität deutliche Imageeinbußen mit sich gebracht.³ Für das LF-Array benötigte die Komplette Einrichtung am Set etwa anderthalb Stunden, davon etwa 30 Minuten Kamerakalibrierungen - Fokus und Belichtung. Dies ist noch recht langsam und auch im Vergleich mit 3D-Rigs noch kein wirklicher Mehrwert. Dies war jedoch der erste Dreh überhaupt damit und mit einigen Optimierungen – u.a. automatisierte Einstellungen - sind deutlich kürzere Zeiten realisierbar.

c) Datenmenge, Lautstärke & Abstand

Die Datenmenge hängt natürlich von den gewählten Einstellungen ab. Mehr Bilder pro Sekunde und/oder mehr Kameras bedeuten auch gleich annähernd proportional mehr Datenmenge, die es zu verarbeiten und speichern gilt.

Da für Lichtfeld-Video eine große Datenmenge anfällt (*siehe 4.2.1 a*), ist es bis jetzt nötig mehrere Festplatten (RAID) anzuschließen. Für die Übertragung der Daten aus den Kameras zum angeschlossenen RAID genügt eine Gigabit Ethernet Verbindung, die die Daten mit etwa 800 MB/s überträgt. Jedoch benötigt das RAID Kühlung mit Lüftern, die wiederum recht laut sind. Daher sollte mindestens ein Abstand von 15 Metern (je nachdem ob dämpfende Hindernisse dazwischen sind) zwischen RAID und Handlungsort der Szene/des Sets liegen. Dies ist nicht immer praktikabel und besonders für kleine, enge Sets schwierig umsetzbar. Hier empfiehlt sich das RAID in einen anderen Raum auszulagern, wobei jedoch die Leistungsfähigkeit der angeschlossenen Kabel – bei Ethernet etwa 100 Meter – beachtet werden muss, um verlorene Bilder des Streams oder den Abbruch der Übertragung zu vermeiden.

d) Vorschaubild, 3D/Echtzeit-Visualisierung

Regisseure und Kameramänner brauchen ein Kontrollbild (Preview) auf einem Monitor, um möglichst effizient arbeiten zu können, Fehler zu vermeiden und eine bessere Kommunikation des Teams zu ermöglichen. Sei es bezüglich Schärfe, Perspektive, Beleuchtung und so weiter.

³ Protokoll Lightfield-Expertpanel Nov. 2014: Gruppe 3 (siehe elektronischer Anhang, DVD).

Bei unserem Dreh war es bis jetzt nur möglich eine Kamera des Arrays – frei wählbar - als Vorschaubild zu verwenden. Dies liefert natürlich zum Beispiel keinen vollständigen Eindruck, welchen Bildwinkel alle Kameras zusammen abdecken und ob alles im Bild ist, was zu sehen sein soll. Solange alles Gewünschte wenigstens noch von den äußeren Kameras aufgezeichnet wird, ist es kein Problem nachträglich noch den Ausschnitt zu ändern. Hier gilt es allerdings zudem zu beachten, dass das Lichtfeld nicht bis zum äußersten Rand der äußeren Kamera aufgezeichnet werden kann, da dort keine Überlappung durch angrenzende Nachbar-Kameras gegeben ist.

Hinzukommt, dass eine Echtzeit-Vorvisualisierung des Lichtfelds bzw. der 9 verrechneten Kamerabilder am Set noch nicht möglich ist. Dadurch ist es schwierig einzuschätzen, ob beispielsweise das Set und die Darsteller richtig ausgeleuchtet sind, ob die generierbaren Tiefendaten in guter Qualität möglich sind bei den verwendeten Einstellungen und vieles mehr. Dazu lässt sich aber anmerken, dass ein verrechnetes Vorschaubild aller Kameras mit 3D-Visualisierung und Tiefenkarten in Echtzeit nur eine Frage der Zeit und leistungsstärkeren Prozessoren sein dürfte. In der Übergangsphase vermutlich zunächst mittels Standbildern oder niedriger Bildrate. Dies würde einen deutlichen Vorteil gegenüber anderen Systemen wie Laserscannern darstellen.

Zudem lässt sich weiter anführen, dass viele Parameter in der Postproduktion korrigierbar sind, darunter eben auch Bildausschnitt, Perspektive oder zukünftig auch Beleuchtung, weshalb kleine Fehler durch momentan fehlende Vorvisualisierung kein großes Problem sind. Dennoch gilt, je besser das Ausgangsmaterial, gerade auch bei der Beleuchtung und den davon abhängigen Tiefeninformationen, desto besser lässt sich in der Postproduktion damit arbeiten.

4.1.2 Einstellung der Array-Kameras

Grundsätzlich gibt es bei einem LF-Array gibt es nur wenig einzustellen. Im Vorfeld müssen natürlich einige Einstellungen wie Blende, Kameraabstände und Fokus – möglichst bei allen Kameras identisch – manuell eingestellt werden, was etwas Übung erfordert. Hier ist zukünftig aber eine softwaregestützte Standardprozedur angestrebt. Während des Drehs fallen diese Dinge dann in der Regel weg. Einmal

richtig eingestellt, erleichtert das den Drehprozess und sorgt dafür, dass weniger Szenen aufgrund von technischen Problemen während der Aufnahme – beispielsweise Unschärfen – wiederholt werden müssen. Zukünftig ist auch noch denkbar, den Abstand der Kameras zueinander motorisiert einzustellen, genauso wie Blende und Fokus, um sich unterschiedlichen Szenen schneller anpassen zu können.

a) Blende

Die Blende der Baslerkameras lag bei 5,6, also recht weit geöffnet, da uns nicht mehr Licht am Set zur Verfügung stand. Optimale Bildqualität mit bester Schärfe und Kontrast (Sweet Spot) liefert sie in etwa zwischen 2,8 und 4. Grundsätzlich muss man abwägen zwischen großer Blendenöffnung für schlechte Lichtsituationen mit resultierendem kleineren Tiefenschärfebereich oder kleiner Blendenöffnung in guten Lichtverhältnissen und größerem Tiefenschärfebereich. Letzteres liefert bessere und genauere Daten für die weiterführenden Berechnungsschritte und sollte daher das angestrebte Ziel sein, um sich alle Nachbearbeitungsoptionen offen zu halten. Starke Unschärfebereiche im Ausgangsmaterial sind für die Algorithmen der Nachbearbeitung sehr schwierig und mit zunehmender Unschärfe unbrauchbar.

b) Bildfrequenz

Bildfrequenzen sind grundsätzlich unterschiedlich wählbar. Natürlich gilt es auch hier wieder, dass mit zunehmender Bildfrequenz auch die Datenmenge der aufgezeichneten Videos etwa proportional zunimmt.

Allerdings hat man bei höheren Bildfrequenzen auch mehr Daten im selben Zeitraum zur Verfügung, was gerade bei schnellen Objektbewegungen vorteilhaft ist, da die Bewegungsunschärfe (Motion Blur) eingeschränkt wird und somit in der Postproduktion besser gearbeitet werden kann.

4.1.3 Kamera-, Personen- und Objektbewegung

Der technische Aspekt der Personen- und Objektbewegung hängt eng mit der Bildfrequenz zusammen. Bei gängiger Bildfrequenz von 24 Bildern pro Sekunde (Kino) respektive 25 BpS (Fernsehen und Video) kommt es bei schnellen Bewegungen von

Objekten und Personen im Bild zu Bewegungsunschärfe (Motion Blur). Dies liegt daran, dass die Bewegung ab einer gewissen Geschwindigkeit zeitlich zu gering aufgelöst wird und die Unterschiede von einem Bild zum nächsten dann zu groß sind. Bei einem normalen Film ergeben sich dann einfach Unschärfen, an die sich das Publikum die letzten Jahrzehnte gewöhnt hat. Für Lightfield könnte dies bedeuten – zumindest als Vermutung in der Theorie - dass bei Verwendung herkömmlicher Bildfrequenzen, ähnliche Limitierungen für Bewegungen bestehen. Denn Unschärfe im Bild bedeutet zunehmend schwierigere Nachbearbeitung und ab einem gewissen Punkt kann es sein, dass die Lichtfeld-Daten dann zu wenig Informationen liefern, zumindest für die Tiefeninformationen und das generieren von Tiefenkarten oder Normal Maps. Weniger Unschärfe bedeutet bessere Tiefeninformationen und Kantenzuordnung bei Objekten. Dies ist dann auch für eine nachträgliche Kamerabewegung und Stabilisierung von Vorteil. So sind in fernerer Zukunft – mit leistungsstärkeren Prozessoren, mehr Speicherkapazität und besserer Datenkompression – theoretisch durchaus auch zeitlich hochauflösende Lichtfeld-Videos (High Frame Rate Lightfield) möglich oder Super-Zeitlupen Lichtfeld-Sequenzen. Dies dürfte ein völlig neues Seherlebnis darstellen.

4.1.4 Set-Anforderungen: Räumlichkeiten, Ausstattung, Requisite, Maske, Kostüm

a) Setbedingungen

Mit dem beim Testdreh verwendeten Basler-Array und dem angeschlossenen RAID, ergibt sich doch Equipment, was in der Gesamtheit nicht ganz so handlich ist, wie das Array allein. Daher ist das Array mit dieser Peripherie aktuell eher für Studio- bzw. Innenaufnahmen geeignet. Dort sind die Bedingungen kontrollierbar: Es gibt i.d.R. eine ausreichende Stromversorgung (besonders für das RAID) und das Equipment ist vor Kälte, Feuchtigkeit und anderen Witterungsbedingungen geschützt.

Eine weitere kleine Einschränkung ist der Platzbedarf. An sich ist das Array zwar klein und handlich, doch mit der Peripherie benötigt es doch etwas Platz. Problematisch dabei ist momentan noch die vom RAID ausgehende Lautstärke. Deshalb ist es

nötig, das RAID abgeschottet in einiger Entfernung zum Array unterzubringen (*siehe 4.1.1 b*).

Für Außenaufnahmen würde sich dagegen momentan eher ein Array aus GoPro-Kameras eignen - die intern aufzeichnen -, da dies zumindest für kurze Zeit ohne externe Stromversorgung betrieben werden kann und besser gegen widrige Witterungsbedingungen geschützt ist.

b) Ausstattung, Kostüm, Maske: Materialien, Texturen, Oberflächen

Beim Testdreh wurden extra Produktaufnahmen, sogenannte Packshots, von unterschiedlichen Produkten gemacht. Ziel dabei war es zu testen, ob sich beim Lightfield-video Probleme für bestimmte Materialien, Texturen oder Oberflächen ergeben. Im Vorfeld wurde vermutet, dass beispielsweise spiegelnde oder transparente Oberflächen oder Highlights problematisch sein könnten, da sie Fehlinformationen über die Richtung der auf dem Sensor eintreffenden Lichtstrahlen übermitteln und zu Fehlern bei Interpolationsschritten und dann zu Weichzeichnung führen. Sehr feine Strukturen, beispielsweise Fell bei (Stoff)Tieren oder Haare bei Personen könnten den Kameras aufgrund der nur äußerst geringen Unterschiede mehrdeutige Informationen liefern. Sind die Strukturen feiner als die Auflösung des Sensors, kommt es vor, dass ein Pixel mehrdeutige Informationen bekommt, wenn beispielsweise Lichtstrahlen eines Haars einer Person und Lichtstrahlen des Hintergrundes vor dem die Person steht auf denselben Pixel des Sensors treffen und dieser sich dann „entscheiden“ muss, welche Informationen er zurückgibt. Auch Nebel, Dampf oder Rauch könnten ähnliche Aliasing-Probleme verursachen.

Diese Probleme sind bereits von Drehs mit herkömmlichen Kameras bekannt. Das Array besteht zwar im Grunde aus herkömmlichen Consumer-Kameras, aber durch den deutlich größeren Informationsdatensatz durch viele Bilder und den darin enthaltenen Sub-Pixel-Informationen, könnte das Problem abgeschwächt vorliegen. Erste Ergebnisse der Postproduktionsphase bestätigen, dass Reflexionen und (Halb-)Transparenzen weniger problematisch sind, als bei bisherigen Verfahren. Dagegen bereiten strukturlose Flächen und Schatten weiter noch Probleme und führen zu Fehlern in den Tiefenkarten. Für fundiertere Ergebnisse müssen allerdings noch weitere Tests gemacht werden. Je nach Ergebnis kann dies dann die Arbeit von Ausstattung,

Maske und Kostüm am Set weiterhin maßgeblich in der Wahl der Materialien und Stoffe beeinflussen.

Je mehr Informationen aufgezeichnet und dann später wiedergegeben werden – ähnlich bei HFR-Technik oder 4K-Auflösung –, desto sorgfältiger muss bei Ausstattung, Maske und Kostüm gearbeitet werden. Nicht nur bezüglich problematischer Materialien und Strukturen, sondern auch bei deren Verarbeitung. Es sollte mit hochwertigem Material gearbeitet und auf eine möglichst saubere Verarbeitung geachtet werden. Bereits kleinste Fehler oder unschöne Stellen, lassen die Kulisse, das Make-Up oder das Kostüm sonst schnell unecht wirken und trüben die Illusion einer Filmwelt und die Wirkung der erzählten Geschichte.

c) Ausleuchtung des Sets

Die Set-Ausleuchtung kann wie gewöhnlich erfolgen, in Zukunft vielleicht sogar mit weniger Lichtstärke. Zu vermeiden sind jedoch sehr schwach ausgeleuchtete Stellen, sowie Lichtquellen im Bild, die ausbrennen. Dies führt zu starkem Informationsverlust, was wiederum Schwierigkeiten in der Postproduktion und bei der Berechnung der Tiefeninformationen bedeutet, beziehungsweise dies an entsprechenden Stellen unmöglich macht.

d) Tiefenauflösung

Die Tiefenauflösung von Kameras spielt bei der Aufnahme der Tiefeninformation eine große Rolle und ist abhängig von der Konfiguration des Arrays mit Objektiven und Kameraabständen zueinander. Je weiter ein Objekt von der Kamera entfernt ist, desto schwieriger ist es dessen dreidimensionale Form aufzunehmen, da die Parallaxe abnimmt. Auch das menschliche Auge hat mit zunehmender Entfernung damit Probleme und ab 50 Metern etwa ist es nicht mehr möglich. Bessere Tiefenauflösung bedeutet also, dass sich das Objekt bei gleichbleibender Qualität weiter weg befinden kann. Dieser Faktor ist für die Qualität der aufgezeichneten Lichtfeld-Daten von großer Bedeutung, denn wird der Abstand zur Szene zu groß oder zu nah gewählt, liefert das Lichtfeld wenig Tiefeninformationen, die für alle weiteren Nachbearbeitungsschritte Voraussetzung sind.

Für nahe Objekte und kleinere Sets empfiehlt sich ein dichtes kompaktes Array. Für weiter entfernte Objekte oder große Sets (z.B. Virtual Backlot Aufnahmen, Panora-

men) sollte besser ein dünner besetztes Array, das in der Breite am besten mehr Kameras besitzt als in der Höhe, um mit den Kamerawinkeln die größeren Distanzen besser abzudecken, eingesetzt werden.

Das Basler-Array mit Abständen von etwa 5,2 Zentimetern zwischen den Kameras arbeitet nach ersten Set-Erfahrungen am besten im Bereich von 0,7 bis 12 Metern.

4.2 Postproduktion von Lightfield-Filmen eines Kamera-Arrays

4.2.1 Handhabung der Daten

a) Datenmenge, Speicherplatz, Datenformat

In unserem Testdreh fielen für alle 9 Kameras 42 GB pro Minute und 2520 GB (2,5 TB) pro Stunde an Datenmenge an. Bei einem Filmdreh für einen 90-minütigen Spielfilm fallen gerne mal insgesamt 12 bis 22,5 Stunden Material (je nach Drehverhältnis) für das Gesamt-Projekt an – abhängig ob TV oder Kino.⁴ In unserem Fall wären das dann etwa 30 bis 56 TB an zu verarbeitenden Daten (*Tabelle 1*). Im Moment noch unvorstellbar viel und nicht wirklich praktikabel für ein großes Projekt. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass das Arbeiten am Set mit Lightfield auch komplett anders wäre. Im Gegensatz zur herkömmlichen Produktion müssten viel weniger Takes pro Einstellung gedreht werden, da im Nachhinein ja noch viel geändert werden kann (Schärfe, Perspektive, Zoom, Fahrt etc.), wodurch sich die Gesamtmenge an gedrehtem Material deutlich reduzieren lässt. Momentan ist daher zunächst eine gute Vorauswahl des Materials nötig, um möglichst wenige Daten durch die gesamte Postproduktionskette zu schicken.

Da Lightfield noch am Anfang steht und von vielen Firmen und Forschungseinrichtungen entwickelt wird, gibt es noch keine definierten Standards für Formate, Übertragungswege und dergleichen. Sofern sich diese Technik in Zukunft durchsetzt, wird dies aber aus Gründen der besseren Kompatibilität nötig sein, vor allem für an der Postproduktion beteiligte Firmen. Ebenso für weitere Distributionswege und Auswertungen, wie Kino und DVD.

⁴ Vorlesung Kalkulation & AV-Produktion, Studiengang EMM, HdM Stuttgart

Tab. 1: Lightfield-Datenmenge (90-minütiger Spielfilm; ausgehend von 2,5 TB pro Stunde Material)

	TB/Film	Kino (Drehverh. 1:15)	TV (Drehverh. 1:8)
LF-Array (9 Kameras)	3,75 TB	56,25 TB	30,00 TB
LF-Array (16 Kameras)	6,60 TB	99,00 TB	52,80 TB
LF-Array (64 Kameras)	26,40 TB	396,00 TB	211,20 TB

Quelle: eigene grobe Hochrechnung

b) Datenqualität, Metadaten

Erste Sichtungen des gedrehten Roh-Materials haben ergeben, dass das Bild der Basler HD-Kameras rein optisch eher etwas unter HD-Qualität liegt, was aber vermutlich an leichtem vertikalen Rauschen und dem Farbraum liegt. Dadurch wirkt das unbearbeitete Material etwas matt, kontrastarm und nicht so scharf wie das Referenz-Bild der Sony F3. Da jedoch noch keinerlei Bearbeitung mit Algorithmen oder anderen Programmen zur Farbkorrektur, Rausch-Entfernung usw. vorgenommen wurde, heißt dies noch nicht viel. Nach ausführlicher Farbkorrektur und Nachbearbeitung wurde eine zufriedenstellende HD-Qualität erzielt.

Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass bei steigenden Qualitäts-Ansprüchen der Zuschauer zukünftig mindestens gute 4K-Kameras zum Einsatz kommen müssen. Nicht nur für „normale Auswertung“ des Materials mit nachträglichen Schärfekorrekturen, Perspektivenänderungen, virtuellen Kamerafahrten und Reframing bzw. Zoomen, sondern auch für die optimale Berechnung der Tiefeninformationen für VFX und CGI.

Da das Array so flexibel im Aufbau und der Kamera-Anordnung ist, ist der Einsatz von anderen, qualitativ noch hochwertigeren ebenfalls kleinen Kameras zukünftig kein Problem. Momentan gibt es beispielsweise die *GoPro Hero4* mit 4K-Auflösung für etwa 480 Euro, was Gesamtkosten für dieses Array von gerade einmal knapp 4300 Euro ergäbe.⁵ Es ist also möglich den jetzigen und künftigen Qualitätsanforderungen mit Lightfield gerecht zu werden, und das auch noch deutlich günstiger als mit herkömmlichen Filmkameras.

⁵ GoPro-Website (2015): Produkte: Kameras: Hero4
[URL: <http://de.shop.gopro.com/EMEA/cameras/>; 21.04.15].

Zudem sollte darauf geachtet werden, dass am Set viele Metadaten mitgenommen werden, idealerweise automatisiert. Vielleicht sogar auch direkt zu Einstellungsentscheidungen des Regisseurs wo der Fokus später liegen, wie der Bildausschnitt gewählt werden oder die Kamerafahrt aussehen soll. Ist dies nicht möglich, ist es für die Postproduktion unmöglich solche kreativen Entscheidungen im Nachhinein alleine zu treffen und würde bedeuten, dass mindestens Kameramann und Regisseur bei der gesamten Postproduktion anwesend sein müssen, was wiederum Kosten erzeugt.

c) Geschwindigkeit, Rechenzeit, Dailies

Auf Grund der großen Datenmenge ist natürlich der Bedarf an Speicherplatz sehr groß, weshalb sich am ehesten ein RAID mit vielen Festplatten bei der Aufzeichnung empfiehlt, um einige Stunden Material schnell zu verarbeiten und zu speichern. Zudem sollte eine ausreichende Geschwindigkeit zur Übertragung gewährleistet sein, sodass eine reibungslose Aufzeichnung der Daten möglich ist und Fehler vermieden werden.

Die Rechenzeit für die grundlegenden Algorithmen ist momentan noch sehr hoch, und liegt ganz grob bei etwa 20 Minuten pro Frame für eine Variante, die im Avid mittels Plugin bearbeitet werden kann. Als grobe Vorstellung kann man sagen, dass ein Shot von etwa 1 Minute Länge (1500 Einzelframes) somit ungefähr 500 Stunden Rechenzeit benötigt, was noch extrem viel und nicht wirklich praktikabel ist. Bei größeren Arrays mit mehr Kameras dürfte die Rechenzeit in etwa entsprechend proportional ansteigen.

Deshalb ist es im Moment am Filmset noch nicht möglich wie bisher Dailies – bestehend aus verrechnetem Bild aller Kameras zusammen sowie Tiefenkarten - am Ende eines Drehtages dem Team zur Einschätzung des gedrehten Material zu präsentieren. Jedoch ist Lightfield eben auch eine andere Art des Filmedrehens, bei dem im Nachhinein noch viel verändert werden kann. Dadurch spielen Dailies am Set eher nur noch eine untergeordnete Rolle – zumindest aus Kontrollgründen wie Schärfe, Bildausschnitt oder optimalen Kamerafahrten. Eine Kontrolle der technischen bzw. Tiefeninformations-Qualität wäre jedoch weiterhin sinnvoll und nötig. Hier sind sicherlich auch zusätzliche Qualitätskontrollen (QC Checks) nötig, um Daten zu verifizieren und Probleme früh zu erkennen. Dailies könnten in sehr ferner Zukunft in ei-

ner Art interaktivem Viewer als Lichtfeld mit Metadaten vom Set vorliegen und somit die erforderlichen Daten an die Postproduktion vermitteln. Bis dahin wird man sich weiterhin mit dem Bild einer Array-Kamera oder einer Hybrid-Lösung mit 2D Bild und Tiefenkarte behelfen müssen.

Für VFX- oder CGI-Firmen sowie Postproduktionshäuser bedeutet die große Datenmenge mehr Zeit- und Kostenaufwand, da diese bei allen Arbeitsschritten, von Sicherung über Schnitt bis zur Ausgabe, eine entscheidende Rolle spielt. Da die Bearbeitungen in der Regel Bildbearbeitungsfunktionen sind, ist vorerst weiteres Aufrüsten bei Prozessoren, Grafikkarten, Arbeitsspeicher und Bandbreite erforderlich. Die Rechenleistung wird vermutlich stark auf die Grafikprozessoren (GPU) ausgelagert werden. Hier wären auch Workstations mit mehreren GPUs oder eine GPU-Renderfarm (Rechnerverbund) sinnvoll. Nur dann kann effektiv in einer überschaubaren Zeit die anfallende Datenmenge bewältigt werden.

Bis dato ist entweder ein extrem großes Rechenzentrum oder eine gute Vorauswahl des Materials nötig, um den (Zeit-)Aufwand möglichst gering zu halten. Da zukünftig natürlich Rechnerleistungen, Speicherkapazitäten und Übertragungsgeschwindigkeiten weiter steigen, sowie neue Kompressionsalgorithmen entstehen, sind diese Einschränkungen eher als vorübergehende Hürde zu sehen.

4.2.2 Hardware & Software

Die durch Lichtfeld-Technik aufgezeichneten Daten bieten eine große Bandbreite an Nachbearbeitungsmöglichkeiten, die zum Teil schon getestet wurden (*Kapitel 3.2*). Für die einfachere Bearbeitung hat das Fraunhofer IIS zudem bereits ein vorläufiges Plugin für Avid Media Composer entwickelt, das aber noch nicht veröffentlicht ist.

Grundsätzlich ist, nach jetzigem Wissensstand, vieles in der nachträglichen Bearbeitung möglich, da das Lichtfeld annähernd alle Informationen der Szene in sich trägt. Mit der Zeit werden weitere Anwendungszwecke hinzukommen, die die Entwicklung weiterer Algorithmen und die Einbettung in gängige Software erforderlich machen.

Es ist nach jetzigen Erkenntnissen nicht nötig spezielle Hardware oder extra Software-Programme zu entwickeln. Die Entwicklung besserer Algorithmen, neuer effek-

tiver Kompressionstechniken und weiterer Plugins für die Kompatibilität mit gängigen Bearbeitungsprogrammen, wie Nuke, Avid oder Final Cut, sollte machbar sein. Zudem werden erstmal keine ausschließlichen LF-Produktionen entstehen, deshalb sollte man in der bisherigen Software bleiben und eventuell nur ein spezielles Datenformat entwickeln. Ähnlich dem Stereo-3D, wofür sich auch keine extra Programme durchsetzen konnten.

Was die Hardware betrifft, sind auf Grund der Datenmenge möglichst leistungsstarke Rechner – Rechenzentren – und viel Speicherkapazität ein entscheidender Faktor. Speziell entwickelt werden muss aber aller Voraussicht nach nichts.

4.2.3 Weitere technische & kreative Möglichkeiten

Bereits getestete Möglichkeiten der Nachbearbeitung wurden in *Kapitel 3.2* näher beschrieben. Im Folgenden geht es um weitere denkbare Nachbearbeitungsoptionen von Lightfield und deren Einsatzmöglichkeiten. Hauptsächlich basieren diese auf den generierten Tiefeninformationen, welche voraussichtlich den großen Mehrwert dieser Technik bedeuten.

Grundlage: Depth Maps

Auf Basis der Lichtfeld-Informationen einer Szene lassen sich Tiefeninformationen mittels Tiefenkarten, sogenannten Depth Maps, errechnen. Depth Maps sind Bilder oder Bildkanäle, die Informationen über den Abstand aller im Bild enthaltenen Objekte und Oberflächen zu einem Standpunkt (Kameraobjektiv) beinhalten. Häufig sind Depth Maps graustufen Bilder, wobei gilt, je dunkler der Bildteil desto näher das Objekt.

Tiefenkarten sind für den Bereich Computergrafik, Computeranimation (CGI) oder Visual Effects (VFX) essentiell. Mit ihnen kann beispielsweise die Umgebung entweder virtuell bis ins kleinste Detail nachgebaut oder ein animiertes Objekt möglichst realitätsgetreu in ein reales Umfeld integriert werden (CGI/Life Action Integration).

Depth Maps können zwar bisher bereits schon berechnet werden, doch ist dies noch sehr (zeit-)aufwändig, vor allem das Fotografieren der dafür nötigen Aufnahmen aus sämtlichen Positionen und Winkeln und mit genau notierten Abständen und

Einstellungen. Lichtfeld könnte dies zukünftig deutlich vereinfachen. Zudem könnten sich bessere Ergebnisse erzielen lassen, was Verdeckung von Objekten oder Durchsicht durch transparente Objekte angeht, da durch Lichtfeld mehr Informationen geliefert werden, als bisher mit einfachen Mehrfach-Fotoaufnahmen von Szenen möglich ist. Diese Vermutung hat sich auch in der Postproduktion bestätigt. So sind erste Ergebnisse besser als mit bisherigen Verfahren, zum Beispiel Tiefenkarten eines Stereosystems, besonders bei Verdeckungen.

Grundlage: Normal Maps

Normal Maps können ebenfalls aus Lichtfeld generiert werden. Sie simulieren detaillierte 3D-Informationen über Oberflächen und Strukturen anhand der Ausrichtung von Flächen-Normalen an den Objekten. Sie werden unter anderem zur genaueren Beleuchtung, Schattierung von Objekten und Szenen oder zur Farbkorrektur benötigt. In der Regel werden sie aus disparity oder depth maps berechnet. Hier könnte durch die Fülle der Lichtfeld-Informationen und möglicherweise besseren disparity und depth maps auf Basis virtueller Kamerapositionen Verbesserung erzielt werden. Erste Ergebnisse waren nicht zufriedenstellend bezüglich der Qualität, so wurden beispielsweise Texturen und kontrastreiche Stellen im Bild als Tiefendaten interpretiert, was zu Fehlern in den Karten führte. Mit einigen Optimierungen dürfte aber zukünftig deutliche Verbesserung erreicht werden.

Ließen sich zudem zukünftig noch Texture Maps, also Bilder mit Strukturen und Texturen der Objektoberflächen aus Lightfield gewinnen, wäre dies ebenfalls ein großer Vorteil auch für die Rekonstruktion einer Gesamtszene. So könnten nachträglich auch Oberflächeneigenschaften anhand dieser Texture Maps verändert werden.

a) Tiefenbasiertes Relighting/Reshading

Mittels Depth und Normal Maps aus dem Lichtfeld ist es denkbar, eine Szene oder ein Objekt in der Ausleuchtung oder den Schatten nachträglich zu korrigieren. Zum Beispiel, wenn ein Darsteller nicht exakt auf den geproben Wegen läuft und deswegen nicht optimal ausgeleuchtet ist oder man einfach zusätzlich noch Akzente – wie ein Augenlicht – setzen will. Andere Lichtstimmung ließen sich ebenfalls erzeugen, so kann aus dem Sonnenaufgang ein Sonnenuntergang werden oder umgekehrt. Auch

das Warten auf die perfekte Lichtstimmung am Set könnte umgangen werden, was Kosteneinsparungen bedeutet. Ebenso könnten Probleme mit nichtkontrollierbaren Lichtquellen behoben werden. Auch ließen sich Schatten durch die detaillierten Tiefendaten noch besser und realitätsgetreuer berechnen und integrieren. Erste Ergebnisse bestätigen dies, einzig die Simulation von glänzenden Oberflächen ist noch problematisch.

Licht und Schatten tragen vor allem unterbewusst viel zum Gefühl und zur Glaubhaftigkeit einer Szene bei. Schlechtes Relighting und Reshading können die Verbindung von animierten Objekten und realen Aufnahmen schnell platt und unecht wirken lassen.

b) Tiefenbasierte Farbkorrektur

Möglich wäre auch eine tiefenbasierte Farbkorrektur, die Szenen in der Farbgebung noch realitätsgetreuer aussehen lässt. So könnte man gezielt anhand der Tiefeninformation nur bestimmte Objekte anwählen, die dann farbkorrigiert werden können. Dies würde manuelles Freistellen/Auswählen ersparen oder zumindest erleichtern. Nach ersten Experten-Einschätzungen dürfte sogar ein dünner besetztes Lightfield-Array genügen, da nicht unbedingt extrem hochaufgelöstes Ausgangsmaterial nötig ist – ebenso für Relighting.

c) CGI/Live Action Integration & Compositing: Green Screen/Blue Screen, Backplates, Set Extensions

Green Screens (alt. Blue Screens) werden inzwischen häufig bei Film und Fernsehen verwendet, ob in den Nachrichtensendungen oder für Special- und Visual-Effects-Aufnahmen, um möglichst einfach Hintergründe austauschen zu können. Leider bereitet es immer noch Schwierigkeiten, die Leute mittels Chroma-Keying – also durch Farben – vom Hintergrund zu separieren. Zum Beispiel sobald die Personen ähnliche Grün- oder Blautöne tragen, feine Strukturen wie Haare vom Green/Blue Screen getrennt werden müssen oder durch die Reflektion von grünem/blauen Spill-Light auf die Gesichter und Körper der Personen.

Hier könnte Lichtfeld Abhilfe schaffen, sofern es gelingt einen verlässlichen Depth-Keying-Algorithmus zu entwickeln. Dann könnten bloß anhand der Tiefeninformationen Objekte vom Hintergrund getrennt werden. Man könnte am Anfang beispielswei-

se mit Grey Screens arbeiten, um die störende farbige Lichtreflexion des Green Screens zu vermeiden und in fernerer Zukunft sogar ganz ohne Hilfsmittel Objekte und Personen vor allen möglichen Hintergründen nur anhand der Tiefeninformationen freistellen. Dies wäre ein großer Fortschritt und würde Zeit, Aufwand und Kosten sparen, da teilweise momentan in der Postproduktion viel manuell bei Green/Blue-Screen-Aufnahmen korrigiert werden muss.

Lichtfeld kann somit auch für Backplates/Backlots genutzt werden und deren Aufnahme deutlich vereinfachen. Backplates sind Aufnahmen von szenischen oder live-action Hintergründen „on location“, die später nachträglich als Hintergrund in eine Szene eingesetzt werden, zum Beispiel für einen Green/Blue Screen. Dies wird häufig dann gemacht, wenn es physisch oder auch aus Aufwands- und Kostengründen nicht möglich ist – zum Beispiel in der Daily-Soap-Produktion -, die Aktion des Vordergrundes einer Szene an den Ort des gewünschten Hintergrundes zu bringen und die Szene zusammen zu drehen. Beispielsweise bei Nachrichtensprechern oder - deutlich aufwändiger - bei der Integration von animierten Kreaturen in „echte“ real-life Hintergründe, wie es im CGI-Bereich viel gemacht wird. Die korrekte 3D-Geometrie von Raum und Darstellern bzw. Objekten ist essentiell für viele Schritte der Postproduktion.

Momentan werden Backplates beispielsweise mit Handkameras oder Laserscannern gedreht, was aber recht umständlich ist, da das Set aus vielen Richtungen und Winkeln abgedeckt werden muss und so viel wie möglich Bilder für Informationen gemacht werden müssen. Zudem werden die Aufnahmen oft nicht gleichzeitig sondern hintereinander gemacht, wodurch unter anderem Lichtwechsel problematisch sind. Mit Lichtfeld würde eine einfache kurze Aufnahme des Hintergrundes mit dem Array genügen. Damit die Kombination von Backplate und integriertem Element überzeugend ist, sollten sich die Kameras – Backplate-Kamera und virtuelle Kamera des animierten Objektes - möglichst identisch bewegen. Erst dann lassen sich Schatten und Einwirkungen des Objekts auf die Umgebung gut berechnen. Zudem müssen bei bisherigen Verfahren möglichst viele Informationen über Lichtrichtungen, Abstände und Kameraeinstellungen bei den Backplates vorliegen und man vermeidet bisher komplexe Hintergründe mit feinen Strukturen, da diese Schwierigkeiten bereiten. All dies könnte durch Verwendung von Lightfield-Backplates deutlich einfacher werden.

Ebenfalls deutlich einfacher wäre vermutlich auch die Erstellung von Set Extensions, d.h. das virtuelle Erweitern oder Verfremden von realen Kulissen im Computer, auf Basis von Backplates.

4.2.4 Abwärtskompatibilität, Versionen, Kompression

Die Abwärtskompatibilität ist in dem Sinne gewährleistet, dass grundsätzlich auch nur das Bild einer Kamera für den Schnitt gewählt werden kann. Allerdings zielt Lightfield als Neuerung ja auf eine eher in die Postproduktion verlegte Arbeitsweise und weniger Drehwiederholungen bei nicht optimalen Takes. Das bedeutet eine „einfache“ Ein-Kamera-Version ist nur dann möglich, wenn es von jeder Einstellung einen gelungenen Take bereits beim Dreh gibt. Ansonsten hat man möglicherweise störende Unschärfen im Bild oder nicht optimal gelungene Fahrten. Als Zwischenlösung wäre noch möglich eine Mischung aus Ein-Kamera-Bild und Lightfield-Bild zu machen, bei der nur die misslungenen Takes per Lightfield nachträglich korrigiert und eingeschnitten werden. Dadurch könnte die Dateigröße und der Zeitaufwand für die fertige Version vermutlich geringer gehalten werden.

Abwärtskompatibilität ist theoretisch nur auf Grund der hohen Datenmenge nötig. Grundsätzlich sind auch gute nahezu verlustfreie Kompressionsalgorithmen für Lightfield denkbar – evtl. sogar bis 90 Prozent (Siggraph Paper LF Compression) – da bei den generierten Daten sehr viel Redundanz vorhanden ist.⁶

⁶ Daniele Siragusano beim Lightfield-Expertpanel Nov. 2014 (siehe Protokolle S. 3 elektronischer Anhang, DVD).

5. Kapitel: Stand der Forschung: Vergleich mit ToF-Kameras als Alternative zur Aufnahme von Tiefeninformationen im Film

Die Erzeugung von 3D-Modellen und virtuellen Umgebungen auf Basis von aufgezeichneten Tiefeninformationen echter Szenen, Räume und Objekte wird immer wichtiger im Film- und Fernsehbereich, aber auch in der Industrie. Auch die Integration von animierten Objekten und Personen in Realumgebungen gewinnt immer mehr an Bedeutung, ist aber vor allem für TV-Produktionen zu teuer und aufwändig in guter Qualität und von Echtzeit mal ganz abgesehen. Lightfield kann diese Möglichkeit in etwas fernerer Zukunft auf Grund der reichhaltigen Informationen bieten und soll in diesem Kapitel mit *Time-of-Flight*-Kameras (ToF), – die ebenfalls zur Generierung von Tiefeninformationen eingesetzt werden - für einen ausführlichen Überblick verglichen werden. Dazu wird die Funktionsweise von ToF-Kameras mit ihren Eigenschaften, die Vor- und Nachteile sowie die Einsatzmöglichkeit in einem Kombi-System erläutert. Der zugehörige übersichtliche, tabellarische Vergleich befindet sich aus Platz- und Formatgründen am Ende dieses Kapitels.

5.1 Aufbau & Funktionsweise der ToF-Kameras^{1 2 3}



Abb. 16: ToF-Kamera „SwissRanger 400“ von Mesa Imaging

¹ AdeptTurnkey-Website (2014): Time-of-Flight 3D cameras technology provides multi-dimensional image solutions

[URL: http://www.adept.net.au/news/newsletter/201111-nov/article_tof_Mesa.shtml; 21.04.15].

² Kolb, A. et al. (2009): Time-of-Flight Kameras in Computer Graphics; PDF

[URL: <http://www.inb.uni-luebeck.de/publications/pdfs/KoBaKoLa10.pdf>; 21.04.15].

³ Castaneda, Victor; Navab, Nassir (2011): Time-of-Flight and Kinect Imaging; PDF

[URL: http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/TeachingSs11Kinect/2011-DSensors_LabCourse_Kinect.pdf; 21.04.15].

Funktionsweise & Aufbau^{4 5 6}

Time-of-Flight-Kameras zählen zu den 3D-Distanzmessungskameras und arbeiten mit dem Laufzeitverfahren, um Distanzen einer Szene zu messen. Sie sind erst seit wenigen Jahren auf dem Markt. Bei der einfachsten Form einer ToF-Kamera, sendet diese Licht im nicht-sichtbaren Nahinfrarotbereich aus und misst für jeden Pixel die Zeit bis das vom Objekt reflektierte Licht wieder auf dem Sensor eintrifft. Die benötigte Zeit verhält sich dabei proportional zur Distanz: Je weiter weg das Objekt, desto länger der Weg des Lichts und desto dunkler die Stelle im berechneten Bild.

Es ist also ein System, das die Dreidimensionalität nicht passiv mittels Triangulationsprinzip – Verrechnung mindestens zweier unterschiedlicher Kameraperspektiven zur Ermittlung der Disparitäten zum selben Objektpunkt - erfasst, wie Lightfield oder Stereokameras, sondern aktiv mit Licht misst. Daher ist auch nur eine Kamera bzw. ein Bild nötig und nicht mindestens zwei Bilder zur Kalkulation der Tiefeninformati-on.⁷ Im Grunde ähneln ToF-Systeme stark einem Laserscanner, doch erfassen sie eine Szene auf einmal in Echtzeit und nicht mit einer Punkt-für-Punkt- oder Zeile-für-Zeile-Messung.

Auch bei ToF-Kameras gibt es nochmals verschiedene Verfahren und Ausprägungen zur Realisierung, die sich im Endeffekt in ein paar kleinen Vor- und Nachteilen unterscheiden. Ein Hauptunterschied ist die Art, wie das Licht emittiert wird. Das Pulslichtlaufverfahren arbeitet mit einzelnen Lichtpulsen, die nacheinander ausgesendet werden und das Phasendifferenzverfahren (Continuous Wave Amplitude Modulated (CWAM)) mit kontinuierlichem amplituden-moduliertem Lichtsignal, wie *Abbildung 16* verdeutlicht.⁸

⁴ Texas Instruments (2014): Time-of-Flight Camera – An Introduction; PDF; S.1-3
[URL: <http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>; 21.04.15].

⁵ Texas Instruments (2014): Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 6/20
[URL: <http://www.ti.com/lit/ml/sbau219d/sbau219d.pdf>; 21.04.15].

⁶ AdeptTurnkey-Website (2014): Time-of-Flight 3D cameras technology provides multi-dimensional[...].

⁷ Inosens Website (2015): 3D Time-of-Flight Sensoren
[URL: <http://www.inosens.com/?p=58>; 21.04.15].

⁸ Castaneda, Victor; Navab, Nassir (2011): Time-of-Flight and Kinect Imaging; PDF

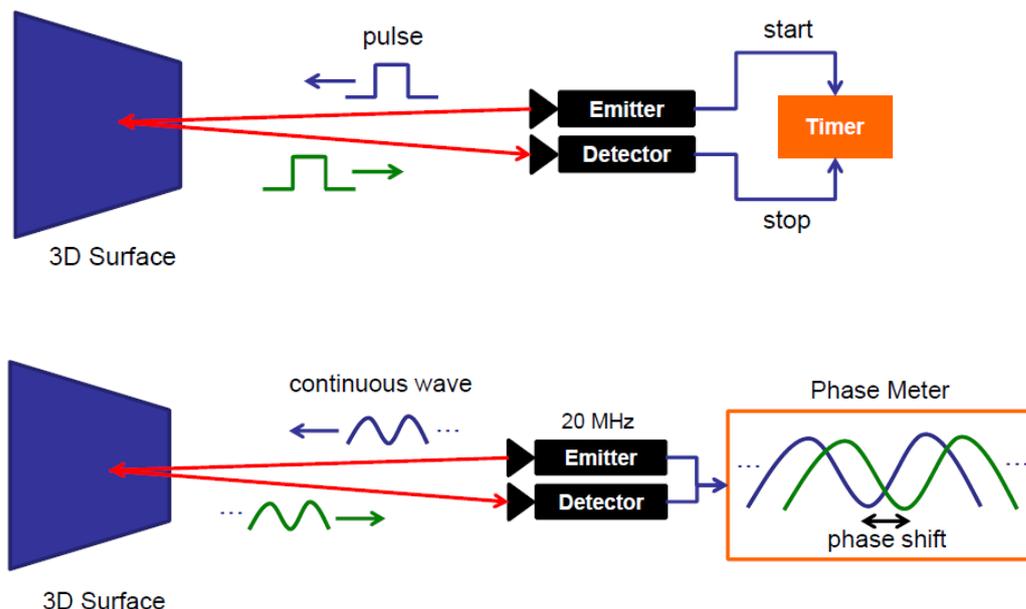


Abb. 17: ToF-Funktionsweise mit Pulslichtlaufverfahren (oben) und Phasendifferenzverfahren (unten)

Eine solche Kamera verfügt über eine Beleuchtungseinheit - LED oder Laserdioden meist im Infrarotbereich, um die Umgebung nicht zu stören -, die im Nanosekundenbereich moduliert werden können, damit der Sensor einwandfrei die Laufzeit messen kann. Aus Kostengründen werden in Consumer-Produkten häufig LEDs mit einer Modulationsfrequenz von 10 bis 50 Megahertz verwendet. In der Wissenschaft dagegen eher teurere Laserdioden, die bis 100 Megahertz operieren und präziser sind.⁹

Die Optik sammelt das Licht und bildet es auf dem Sensor ab. Dabei wird ein Bandpassfilter verwendet, welcher nur die Wellenlänge des ausgesendeten Lichtes durchlässt. Dies eliminiert störendes Umgebungslicht weitestgehend.

Der Sensor, inzwischen meist ein Photomischdetektor (Photon Mixing Device, PMD), misst die Licht-Laufzeit für jeden Bildpunkt separat. Im Aufbau ähnelt er den Sensoren anderer Kameras, wobei jedoch die Pixel aus technischen Gründen komplizierter aufgebaut sind. Im Vergleich zu früheren Sensoren von ToF-Kameras ist die Bauweise der PMD-Sensoren deutlich kleiner, dennoch sehr groß im Vergleich zu normalen

⁹ Dorrington Adrian et al. (2009): Advantages of 3D Time of-Flight Range Imaging Cameras in Machine Vision Applications; PDF; S.2
 [URL: http://www.researchgate.net/profile/Michael_Cree/publication/44392824_Advantages_of_3D_time-of-flight_range_imaging_cameras_in_machine_vision_applications/links/0fcfd50bbddc982e1c000000.pdf; 21.04.15].

Kameras, weshalb ToF-Kameras bis jetzt nur eine sehr geringe Auflösung aufweisen.¹⁰

Beleuchtungseinheit und Sensor werden mit aufwendiger Technik angesteuert, um möglichst mit hoher Frequenz und Genauigkeit zu arbeiten. Bereits kleine Verschiebungen bei den Ansteuersignalen, können zu Messabweichungen von einem Millimeter oder mehr führen.

Die Berechnung der Distanz erfolgt meist in der Kamera mittels abgespeicherten Kalibrierungswerten und angeschlossen wird eine ToF-Kamera meist per USB oder Ethernet.

5.2 Eigenschaften und deren Vor- und Nachteile¹¹

a) (Tiefen-)Auflösung¹²

Je nach System können die Kameras im Nahbereich (wenige Zentimeter) bis zu 40 Metern im Fernbereich eingesetzt werden. Die meisten Geräte sind aber für einen Distanzbereich bis etwa 10 oder 15 Meter konzipiert. Die Tiefenauflösung beträgt dabei bis zu 1 Zentimeter – bei voller Systemauslastung. Dies bedeutet, dass an der Fernbereichsgrenze Abweichungen von maximal bis zu einem Zentimeter auftreten.¹³

Aktuelle Kameras mit dieser Technik verfügen über eine sehr geringe Auflösung von nur etwa 320x240 Pixel – entspricht 0,1 Megapixel – was natürlich bei heutigen Standards herkömmlicher 2D-Kameras äußerst wenig ist.

Um bessere Tiefenauflösung bei maximaler Power zu erzielen, gibt es noch die Möglichkeit des Pixel-Binnings, also das Zusammenfassen mehrerer Pixel zu einem Pixelblock. Damit kann eine Tiefenauflösung unter 5 Millimeter erreicht werden, dafür muss allerdings noch mehr Bildauflösung eingebüßt werden.

Sehr problematisch generell sind Szenen mit großer Tiefenstaffelung, da man einen Mittelweg für die Beleuchtungsstärke finden muss, damit der Vordergrund nicht total gesättigte Pixel erzeugt, während hinten fast kein Licht mehr ankommt. Dies erzeugt folglich keine optimalen Messungen.

¹⁰ Wiedemann, Wolfgang (2011): TU München: Ausgewählte Kapitel der Photogrammetrie; 3D Kameras – Aufnahmetechnik ToF-Kamera; PDF; S. 6
[URL: http://www.pf.bgu.tum.de/edu/pak/tum_pak_11_wiedemann_pre_sp2.pdf; 21.04.15].

¹¹ Ebd.

¹² Texas Instruments (2014): Introduction to the [...] (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 28/29.

¹³ Mesa Imaging Webseite (2015): Products: SR4000
[URL: <http://www.mesa-imaging.ch/products/sr4000/>; 21.04.15].

b) Field of View (Sichtfeld), Objektiv

ToF-Kameras benötigen, je nach Anwendung, unterschiedlich weite Sichtfelder. Für eine Kurzdistanz-Messung einer Szene oder Gestenerkennung – beispielsweise vor einem Laptop – ist ein weiteres Sichtfeld nötig, um alle relevanten Informationen zu erfassen. Szenen oder Bewegungen in entfernteren Distanzen erfordern dagegen engere Sichtfelder. Die Wahl des Sichtfelds bestimmt gleichzeitig die Brennweite der Linse, da die Sensorgröße einer ToF-Kamera fix ist. Weiteres Sichtfeld bedeutet gleichzeitig kürzere Brennweite.¹⁴

c) Entfernungen, Messzeiten

Da sich Licht mit Lichtgeschwindigkeit (ca. 300.000 km/h) ausbreitet, sind die gemessenen Zeiten in Bereichen von Zentimetern bis wenigen Metern unvorstellbar klein. Bis zu einem 2,5-Meter-entfernten Objekt beispielsweise nur 16,7 Nanosekunden (1 Meter entspricht 6,67 Nanosekunden). Dies bedeutet, dass die ToF-Kamera extrem genau kalibriert sein muss, um verlässliche Messergebnisse zu erzielen. Nur spezielle LEDs oder Laser machen solche hohen Frequenzen möglich. Aufgrund des Auswertungsprinzips der ToF-Kameras, bestimmt die Pulslänge zur Beleuchtung dabei, wie weit Objekte maximal entfernt sein können. Systeme mit einer Pulslänge von bis zu 50 Nanosekunden können maximal Distanzen bis 7,5 Meter messen. Sind die Objekte weiter als der maximale Distanzbereich entfernt, ergeben sich falsche Messwerte.¹⁵

Da innerhalb so kurzer Zeit nur wenig Licht auf den Sensor trifft, arbeiten die Systeme mit vielen Tausend wiederholten Pulsen, um die Signalstärke zu erhöhen.

d) Hintergrundlicht, Dynamikumfang^{16 17}

Natürlich trifft auch das Licht der gemessenen Szene - in der Regel ja selten dunkle Räume – auf den Sensor. Da nur das Pulslicht die Tiefeninformationen in sich trägt, verschlechtert das Umgebungslicht das Signal-Rausch-Verhältnis, also die Qualität des Nutzsignals. Das Umgebungslicht wird optisch mittels Bandpassfiltern zwar teilweise, aber nicht vollständig eliminiert. Man kann allerdings die Szene ohne die

¹⁴ Texas Instruments (2014): Introduction to the [...] (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 18/19.

¹⁵ Wikipedia-Eintrag (2015): ToF-Kamera
[URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/ToF-Kamera>; 21.04.15].

¹⁶ Texas Instruments (2014): Time-of-Flight Camera – An Introduction; PDF; S.2.

¹⁷ Texas Instruments (2014): Introduction to the [...] (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 27.

Lichtpulse der Kamera messen und das damit gemessene Umgebungslicht später von den Ergebnissen abziehen.

Dennoch muss der Sensor daher mit großen Dynamiken zurechtkommen. Tatsächlich liegt die mögliche Beleuchtungsstärke von ToF-Kameras bei etwa einem Watt. Selbst das gefilterte Sonnenlicht hat aber trotzdem noch 50 Watt pro Quadratmeter. Die Hersteller haben dafür unterschiedliche Strategien zur besseren Hintergrund-Signalunterdrückung entwickelt bzw. arbeiten daran. So gibt es inzwischen auch spezielle Algorithmen zur Unterdrückung des Umgebungslichts (Suppression of Background Intensity, SBI), weshalb dem Outdoor-Einsatz zukünftig vermutlich nichts entgegenspricht.¹⁸

Der Dynamikumfang ist zunächst recht begrenzt, da die Pixel nur gewisse Ladungsmengen speichern können. Jedoch wird beispielsweise mit Sub-Frames gearbeitet, um die Limitierung der Sättigung eines Pixels zu überwinden und den Dynamikumfang deutlich zu erhöhen. Ebenfalls ist es möglich bei Reduzierung der Sub-Frames – weniger gesammelte Ladungsmenge pro Pixel - und gleicher Beleuchtungszeit der Szene dann Higher Frame Rates zu erreichen. High Dynamic Range Szenen sind dennoch schwer messbar, auf Grund der großen Ladungsmengen, die sich vor allem im Vordergrund ergeben.¹⁹

e) Aufbau, Kompaktheit, Temperatur

Diese Kameras beinhalten keine anfälligen beweglichen Teile – wie zum Beispiel Laserscanner – und brauchen wenig Platz, da sie nur wenige Zentimeter groß sind. Die ToF-Kamera SR4000 von MesaImaging beispielsweise misst nur 65 mal 65 mal 76 Millimeter.²⁰

Jedoch sind sie anfällig gegenüber hohen Temperaturen, was zu Rauschen im Sensor und Messfehlern führt, die nachträglich korrigiert werden müssen.²¹ So ist die SR4000 laut Hersteller nur für 10 bis 50 Grad betriebsfähig.²²

¹⁸ Kolb, A. et al. (2009): Time-of-Flight Kameras in Computer Graphics; PDF; S. 2.

¹⁹ Texas Instruments (2014): Introduction to the [...] (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 17/29.

²⁰ Mesa Imaging Webseite (2015): Products: SR4000.

²¹ Wiedemann, Wolfgang (2011): TU München: [...]; 3D Kameras – Aufnahmetechnik ToF-Kamera; PDF; S.10.

²² Mesa Imaging Webseite (2015): Products: SR4000.

f) Geschwindigkeit & Bewegung

Eine Aufnahme – die aber aus vielen Tausend summierten Lichtpulsen resultiert – genügt zur kompletten Erfassung einer Szene. Mit einer Bildfrequenz von bis zu 160 Bildern pro Sekunde je nach Hersteller und Modell – also praktisch High Frame Rate – sind Echtzeit-Anwendungen möglich.²³ Dennoch können extrem schnelle Bewegungen ebenfalls zu Messfehlern führen, vor allem da viele eingesetzte Kameras nur bis 30 oder weniger Bilder pro Sekunde arbeiten.²⁴

Die Integrationszeit (Beleuchtungszeit) ist abhängig von der Modulations- oder Pulsfrequenz des Senders. Laser sind in der Regel schneller als LEDs, weshalb die optimalen Betriebsfrequenzen von ToF-Kameras besser mit Laserdioden erreicht werden können.²⁵

g) Rechenzeit, Datenauswertung, Tiefenkarten²⁶

Die Berechnung der Distanzkarten erfolgt direkt aus der Messung. Der Rechenaufwand ist folglich relativ gering und weniger komplex im Vergleich zu anderen Systemen der Tiefeninformationsmessung, bei denen erst gleiche Merkmale in mehreren Bildern mittels komplexer Korrelationsalgorithmen identifiziert werden müssen – so auch bei LF -, bevor Tiefe berechnet werden kann.²⁷

Für die gemessenen Daten lassen sich Distanzschwellwerte setzen – sozusagen Depth Keying -, wodurch sich ganz einfach nur bestimmte Bildteile auswählen lassen. Die Auflösung der Tiefenkarten hängt dabei wieder vom jeweiligen Gerät und Sensor ab. In der Regel sind die Tiefenkarten Graustufenbilder, einige inzwischen auch Farbbilder. Alternativ kann die Tiefenkarte auch in eine point cloud umgerechnet werden.²⁸

²³ BlueTechnixProducts Webseite (2015): ARGOS 3D-P100

[URL: <http://www.bluetech-nix.com/de/products/depthsensing/product/argos3d-p100/>; 21.04.15].

²⁴ Wiedemann, Wolfgang (2011): TU München: [...]; 3D Kameras – Aufnahmetechnik ToF-Kamera; PDF; S.12.

²⁵ Texas Instruments (2014): Introduction to the [...] (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 21.

²⁶ Texas Instruments (2014): Time-of-Flight Camera – An Introduction; PDF; S.3/5.

²⁷ Inosens Website (2015): 3D Time-of-Flight Sensoren.

²⁸ Texas Instruments (2014): Time-of-Flight Camera – An Introduction; PDF; S.3/5.

h) Mehrfachreflexion: Texturen, Strukturen, Materialien²⁹

ToF-Kameras erfassen die ganze Szene auf einmal, sodass mehrfach reflektiertes Licht auf den Sensor gelangen und die gemessene Distanz dann verfälschen kann. Dies geschieht beispielsweise wenn der ausgesendete Lichtpuls gestreut und von anderen Objekten indirekt reflektiert wird. Dadurch können sich größere gemessene Distanzen ergeben, als in Wirklichkeit. So sind beispielsweise auch transparente oder spiegelnde Oberflächen mögliche Fehlerquellen der Messung.³⁰ Auch andere Faktoren, wie Glanzlichter, Flares oder Objektkanten können Artefakte (Flying Pixels) oder Messverfälschungen erzeugen. Farbe und Texturen stellen insofern Probleme dar, dass sie unterschiedlich stark Licht absorbieren und sich daraus Messfehler ergeben können.³¹

Keine Probleme ergeben sich – anders als bei Stereokameras und vermutlich auch Lightfield - dafür mit einheitlichen Flächen oder sich wiederholenden Mustern, denn diese benötigen genügend Intensität und Farbvariation für gute Leistung bei den Korrelationsalgorithmen. ToF-Systeme messen auch diffus-reflektierende Materialien.

i) Einsatz mehrerer Kameras

Werden mehrere Kameras gleichzeitig verwendet – dies ist jedoch nicht nötig für das Funktionsprinzips von ToF, sondern lediglich für Zusatzinformationen -, können die Lichtpulse gegenseitige Störungen hervorrufen und die Messergebnisse verfälschen. Hier ist dann entweder eine übergeordnete Steuerung der Messung kurz hintereinander nötig (Zeitmultiplexen) oder die Kameras müssen mit leicht abweichenden Modulationsfrequenzen messen. Dann werden die Lichtpulse in anderen Kameras als Hintergrundlicht gewertet.³²

²⁹ Ebd.; S.5.

³⁰ Cui, Yan et al. (nach 2008): 3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera; PDF; S.7
[URL: http://ai.stanford.edu/~schuon/sr/cvpr10_scanning.pdf; 21.04.15].

³¹ Wiedemann, Wolfgang (2011): TU München: [...]; 3D Kameras – Aufnahmetechnik ToF-Kamera; PDF; S.11/12.

³² Wikipedia-Eintrag (2015): ToF-Kamera.

5.3 Einsatzgebiete & Anwendungen^{33 34 35}

Hauptsächlich wurden ToF-Kameras für industrielle Zwecke und Mensch/Maschinen-Schnittstellen, die verlässliche und schnelle Tiefeninformationen benötigen, entwickelt. Im Folgenden ein knapper Überblick bis in welche Bereiche ToF-Kameras vorgedrungen sind.

a) Automobil

Der große Vorteil von ToF-Kameras ist die Echtzeitanwendung, weshalb sie beispielsweise als Fahrassistenz- und Sicherheitssensoren in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Dazu zählen beispielsweise Fußgängerschutz, Notbremsassistent, Überwachung der Fahrposition oder Steuerung des Airbags.

b) Gaming & Mensch-Maschinen-Schnittstellen

Im medialen Bereich, besonders bei Mensch-Maschinen-Schnittstellen, werden die Systeme auf Grund der Möglichkeit zur Echtzeit-Bewegungsverfolgung beispielsweise in Spielekonsolen (Microsoft Kinect Xbox) eingesetzt oder als Interaktionsmöglichkeit mit Geräten, wie der Steuerung des Fernsehers per Gesten, sodass Fernbedienung, Maus oder Touch Screens überflüssig werden.³⁶

c) Medizin

ToF-Kameras können auch in der Medizin unterstützend eingesetzt werden. Zum Beispiel zur kontaktfreien Atemmessung, bei Operationen oder zur exakten Patientenpositionierung bei Bestrahlungen oder anderen Therapien, damit dieser beispielsweise exakt gleich liegt wie bei vorherigen Sitzungen und Referenzbildern.

³³ Wiedemann, Wolfgang (2011): TU München: [...]; 3D Kameras – Aufnahmetechnik ToF-Kamera; PDF; S.1.

³⁴ Texas Instruments (2014): Time-of-Flight Camera – An Introduction; PDF; S.6-8.

³⁵ AdeptTurnkey-Website (2014): Time-of-Flight 3D cameras technology provides multi-dimensional[...].

³⁶ Texas Instruments Website (2014): 3D Time of Flight Imaging Solutions
[URL: http://www.ti.com/ww/en/analog/3dtof/index.shtml?DCMP=analog_signalchain_mr&HQS=3dtof-pr;21.04.15].

d) Robotik

Mittels Echtzeit-Umgebungsbildern können fahrende Roboter die Umgebung scannen, Objekten ausweichen oder sie verfolgen. Außerdem erleichtert es zum Beispiel die maschinelle Materialverwaltung oder Qualitätskontrolle.

e) Industrielle Bildverarbeitung & Messtechnik

Durch die dreidimensionalen Daten lassen sich Messungen für Füllhöhen oder das Aufnehmen von Gegenständen auf Fließbändern mittels Robotern exakter berechnen. Türsteuerungen können beispielsweise anhand der Höhe zwischen Tier und Mensch unterscheiden oder es können automatische Personenzählungen realisiert werden.

f) 3D-Drucker

Als Vorlage benötigen 3D-Druckern ein möglichst akkurates 3D-Bild der Objekte oder Personen. Auch dies ist mit ToF möglich und die Echtzeitfähigkeit ermöglicht sogar das Erfassen begrenzt bewegter Objekte für den Drucker.

Fazit zu TOF-Kameras

Der große Vorteil von ToF-Kameras zur Ermittlung von Tiefeninformationen liegt in der Echtzeitfähigkeit, der Unabhängigkeit von strukturlosen, einheitlichen Flächen und Schatten der Objekte und der extremen Handlichkeit der Kameras. Der Preis geht etwa bei 200 Dollar los – Softkinetic DS311³⁷ - und reicht je nach Einsatzgebiet und Leistungsfähigkeit auch bis zu mehreren Tausend Dollar – 4300 Dollar für eine Variante der Mesa SR4000³⁸. Dies ist günstiger oder (bei der teuren SR4000) vergleichsweise ähnlich der Kameras für ein Lightfield-Array, da man bei ToF nur eine benötigt. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und da sich Tiefenkarten und Punktwolken generieren lassen auch für den Einsatz im Postproduktionsbereich denkbar, wobei andere Systeme, z.B. Laserscanner dagegen viel genauer und hochauflösend arbeiten. Hersteller, wie Texas Instruments, Softkinetic, Infineon oder PMD Technologies arbeiten weiter an der Verbesserung der ToF-Technik. So zum Bei-

³⁷ SoftKinetic Webseite (2015): DepthSense 311

[URL: <http://www.softkinetic.com/Store/ProductID/2>; 21.04.15].

³⁸ Acroname Webseite (2015): MesaImaging SR4000 5M USB 44°X35°

[URL: <http://www.acroname.com/products/r329-sr4000-10m-usb>; 21.04.15].

spiel mit der neuen *SoftKinetic's DepthSense*[®] Pixel-Technologie - mit besserer Sensibilität, besserer Bewegungsverfolgung und präziserer schnellerer Messung.³⁹

Allerdings fehlt dem System – neben deutlich besserer Auflösung - im Gegensatz zu Lightfield eine entscheidende Sache: Ein richtiges Bild bzw. Video der Szene. Es liefert ausschließlich Tiefen-Informationen, aber keinen klassischen Bildinhalt. Wobei einige Kameras – zum Beispiel der Firma Kinect – inzwischen auch Farbinformationen liefern.⁴⁰

Für Bearbeitungen, wie nachträgliche Perspektivenänderung, Reframing, Refokussierung, Kamerafahrten, detaillierte Oberflächenrekonstruktion und dergleichen ist es alleinstehend nicht einsetzbar. Lediglich als erweiterndes Tool für die Arbeitsgänge, die exakte Tiefeninformationen benötigen, kann es unterstützend eingesetzt werden. Lightfield liefert aber beide für die Filmproduktionen essentiellen Bereiche – Bildinhalt und Tiefeninformationen, wenn auch noch nicht in Echtzeit.

Hinzukommt, dass bei der Wahl der richtigen ToF-Kamera für jede Szene auch viele Dinge beachtet werden müssen, wie Maximal- und Minimalabstand der Objekte für Tiefenauflösung und Bandbreite der Tiefenstaffelung, Lichtbedingungen, Frame Rate, Sichtfeld, Blende, Witterungsbedingungen, Laser oder LED, Bildauflösung und vieles mehr.⁴¹ Bei Lightfield, sind im Optimalfall hauptsächlich die Ausmaße des Arrays und Anordnung der Kameras sowie Blende und Fokus entscheidend, da alle anderen Kameraeinstellungen im Nachhinein korrigierbar sind. Solange genug Kameras und ausreichend Bildauflösung vorhanden ist, spielt der Rest eher eine untergeordnete Rolle.

Insofern die Berechnungsmöglichkeiten bei Lightfield noch deutlich verbessert werden – die Technik ist ja noch in der Entwicklung und einige Jahre in Verzug zu ToF – stellt ToF als alleinstehendes Tool im Film- und Fernsehbereich nach Meinung der Autorin nur bedingt für einige Situationen eine Alternative bzw. Ergänzung dar. Für Anwendungen, die ausschließlich auf Echtzeit angewiesen sind, ist LF dagegen momentan keine Option.

³⁹ Texas Instruments Website (2014): 3D Time of Flight Imaging Solutions.

⁴⁰ Heise-Online Website (08.03.2012): GDC: SoftKinetic erkennt Fingergesten auf kurze Instanz [URL: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/GDC-SoftKinetic-erkennt-Fingergesten-auf-kurze-Distanz-1466180.html>; 21.04.15].

⁴¹ Texas Instruments (2014): Introduction to the [...] (ToF) System Design; User's Guide; PDF; S. 30.

5.4 Vergleich zu LF: TOF-Kameras in Kombination mit herkömmlicher Kamera

ToF-Kameras besitzen den Nachteil einer sehr geringen Bildauflösung, die fernab jeglicher aktueller Standards liegt. Untersuchungen haben gezeigt, dass für Farbe mehr Auflösung erforderlich ist als für Tiefe. Deshalb wird an unterschiedlichen Instituten und Einrichtungen daran geforscht, wie man die geringe Auflösung der ToF-Kameras durch Kombination mit herkömmlichen gut-auflösenden Filmkameras realisieren kann. So gibt es Ansätze, die die ToF-Kamera mit ein oder mehreren herkömmlichen Kameras kombinieren, um hochauflösende Farb- bzw. Intensitätsinformationen einer Szene zu bekommen. Andere Ansätze kombinieren sie mit klassischen Stereotechniken und haben gezeigt, dass dadurch die Stereo-Korrelations-Algorithmen deutlich beschleunigt werden können und auch einheitliche Flächen keine Probleme mehr darstellen. Diese Kombi-Systeme sind für Lightfield deutlich konkurrenzfähiger als eine alleinstehende ToF-Kamera (*siehe auch Tab. 2, Anhang*).⁴²

Daher soll ein solches System vom Institut für Computer Wissenschaft in Kiel im Folgenden näher erläutert werden. Ihr Ansatz ermöglicht Echtzeit-Kombination und -Interaktion von echten Szenen und virtuellen Bildanteilen, auch für dynamische Objekte.

5.4.1 Aufbau & Funktionsweise des Kombi-Systems

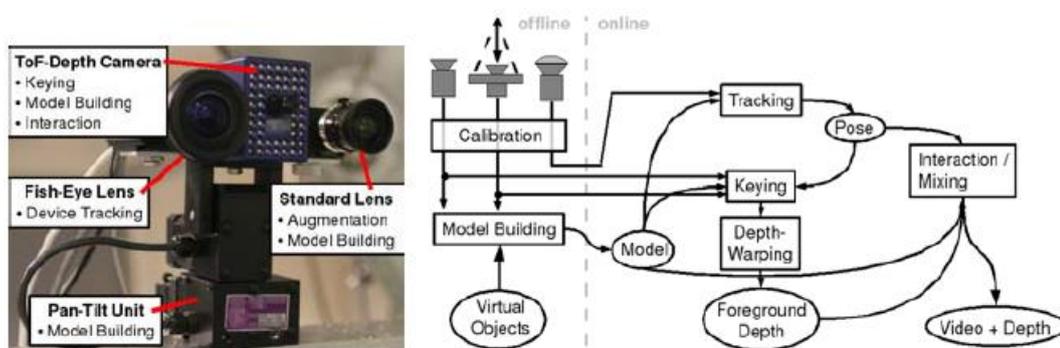


Abb. 18: Links: Kombisystem aus ToF-Kamera (Mitte), HD-Kamera (rechts) und HD-Kamera mit Fisheye-Objektiv (links) / Rechts: Funktionsweise mit Offline- und Online-Phase

⁴² Kolb, A. et al. (2009): Time-of-Flight Kameras in Computer Graphics; PDF; S. 6.

Basis ist eine ToF-Kamera kombiniert mit zwei Farbkameras rechts und links davon und auf einer computergesteuerten Keraschwenkkopf-Einheit (pan-tilt unit, PTU) fest montiert (*Abb. 17, links*). Dieser Aufbau ermöglicht das Scannen der Umgebung in einem Wirkungskreis von 360 mal 180 Grad. Dadurch werden auch die engen Sichtfelder der Kameras überwunden. Eine der Farbkameras wurde mit einem Fisheye-Objektiv ausgestattet, um deren weites Sichtfeld von bis zu 190 Grad für besseres Tracking zu nutzen.⁴³

Das System hat zwei verschiedene Modi. In einer Offline-Phase vor dem Dreh wird die Realumgebung gescannt und als virtuelles Panorama-Model durch Kombination von Tiefen- und Farbinformationen erzeugt. Dadurch werden die limitierten Sichtfelder der Kameras überwunden, indem mehrere Bilder zusammengefügt werden, ohne dass der Kamerakopf bewegt wird. Dies ergibt ein erweitertes Sichtfeld von etwa 120 mal 100 Grad und erlaubt Bildüberlappungen von 50 Prozent zur Verblendung von Tiefen- und Farbinformationen. Dies ergibt ein zylindrisches Panorama Bild, wobei auch ein Sphärisches für besseres Modeling von Decke und Boden denkbar ist. Später beim Dreh, also der Online-Phase, wird dieses Modell dann zu einer vollständigen 3D-Oberflächenrepräsentation entfaltet und als Referenz für Tiefen-Keying, Kamera-Tracking und Integration von realen und virtuellen Objekten genutzt (*Abb. 17, rechts*).⁴⁴

Dadurch können die Umgebung gescannt und dynamische Objekte und Personen ohne spezielle Marker getracked (verfolgt) und modelliert werden. Dies erzielt eine gute 3D-Rekonstruktion, da gegenseitige Verdeckungen von echten und animierten Objekten berechnet werden können, genauso wie Licht- und Schattenverhältnisse. Das alles geht in nahezu jedem normalen Umfeld ohne spezielles Studio und kann daher sogar für 3D TV-Produktionen eingesetzt werden. Das System arbeitet durchgehend in 3D und liefert kontinuierlich Farb- und Tiefeninformationen.⁴⁵

⁴³ Koch et al. (nach Mai 2009): MixIn3D: 3D Mixed Reality with ToF-Camera; PDF; S. 3/4
[URL: http://www.mip.informatik.uni-kiel.de/tiki-download_file.php?fileId=1226; 21.04.15].

⁴⁴ Koch et al. (nach Mai 2009): MixIn3D: 3D Mixed Reality with ToF-Camera; PDF; S. 3/4/6/7.

⁴⁵ Ebd.; S. 1-3.

5.4.2 Eigenschaften und deren Vor- & Nachteile

Für das Vermischen von realen und virtuellen Bildteilen – auch Augmented Reality oder erweiterte Realität genannt –, benötigte man bisher eine sehr kontrollierbare Umgebung, in der Regel ein Studio. So hatte man optimale Beleuchtung, Green- oder Blue Screen fürs Farb-Keying (also das Separieren verschiedener Bildinhalte mittels Farbwerten) sowie viele Kameras und Tracking-Systeme mit Markern, um Bewegungen verfolgen zu können. Solche Studios sind aufwändig und teuer und benötigen viel Erfahrung. Und trotzdem machen gegenseitige Verdeckungen von realen und virtuellen Objekten teilweise große Probleme, da die 3D-Rekonstruktion nicht in Echtzeit funktioniert. Die Kombination von ToF- und HD-Filmkamera liefert Tiefenkarten bei normalen bis hohen Bildraten (25 BpS und höher) und ermöglicht automatisches Depth-Keying anhand der Tiefenstaffelung sowie Kamera-Tracking.

a) Depth Keying⁴⁶

Für die Real-Virtuell-Interaktion von Schauspielern und bewegten Objekten müssen deren Position und Geometrie im dreidimensionalen Raum erfasst werden, genauso wie die Umgebung. Mit dem Kombi-System ist dies in nahezu jedem Umfeld relativ einfach möglich und zwar nur anhand der Tiefeninformation fürs Keying. Dazu wird das aufgezeichnete Tiefen-Farbbild mit dem virtuellen Umgebungsmodell der Offline-Phase aus der entsprechenden Kameraperspektive verglichen. Dies bedeutet aufwändiges Chroma-Keying mit Farbscreens fällt weg. Dennoch führen Rauschen, die geringe Auflösung der ToF-Kamera und Parallaxenfehler zu Keying-Fehlern von bis zu 5 Pixel Abweichung besonders an Objektgrenzen. Dies ist nicht akzeptabel im Keying-Prozess. Durch Vergleich mit dem virtuellen 3D-Hintergrund-Modell kann Verbesserung erzielt werden, jedoch ist dies abhängig von Lichtveränderungen und Schatten, wie sie von bewegten Objekten erzeugt werden. Besonders Regionen, in denen Vorder- und Hintergrund verschmelzen – beispielsweise am Berührungspunkt von Füßen auf dem Boden – kommt das System an die Grenzen und benötigt weitere Entwicklungen. Bisherige Lösungen sind noch nicht echtzeitfähig, jedoch kann der Super-Auflösungs-Upsampling-Ansatz Verbesserungen erzielen.

⁴⁶ Ebd.; S. 2/3/8/9.

b) Markerloses Kameratracking⁴⁷

Jedes erzeugte HD-Bild hat volle Tiefeninformation und macht das Ganze auch für den Fernsehbereich interessant, da die Realumgebung durch das Depth-Scanning automatisch in Echtzeit virtuell modelliert wird. Dieses virtuelle Modell ermöglicht auch Kameratracking ohne Marker oder spezielle Sensoren anhand des 3D-Umgebungsmodells der Offline-Phase. Das Modell selbst ist die Referenz und macht Marker unnötig. Das ermöglicht freie Bewegung der Kamera ohne den Einsatz teurer komplexer Kamera-Tracking-Systeme und deren aufwändigen Kalibrierung zur überzeugenden perspektivisch-korrekten Interaktion von realen und virtuellen Bildanteilen. Möglich ist dies durch das Fisheye-Objektiv, welches einen Großteil der Umgebung – also des 3D-Referenz-Tracking-Modells – zeigt, auch wenn die Kamera oder Objekte sich bewegen.

c) Systemkalibrierung⁴⁸

Ein Nachteil ist die nicht ganz unaufwändige Kalibrierung der drei Kameras, die in mehreren Schritten mittels Checkerboard und Computer erfolgt. Hinzu kommt der systematische Fehler der ToF-Kamera bei der Entfernungsmessung, welcher keinen konstanten Wert hat, sondern einer höheren Funktion folgt, sich also verändert. Nach der Kalibrierung des gesamten Systems liegen die Mess-Abweichungen normalerweise unter einem Pixel und sind relativ genau.

d) TOF-Kamera & Fusion der Kamerabilder⁴⁹

Die verwendete ToF-Kamera hat eine maximale Reichweite von 7,5 Metern auf Grund der verwendeten Modulationsfrequenz von 20 Megahertz und eine ermittelte Tiefenauflösung von 2 Zentimetern oder besser. Sie wird mit 12,5 BpS – die anderen Kameras mit 30 BpS - und einer Beleuchtungszeit von 80 Millisekunden betrieben, um das Tiefenrauschen gering zu halten.

Die Tiefenkarte muss mit den Farbbildern der beiden anderen Kameras verrechnet werden, um einen Farb-Tiefen-Videostream zu erhalten. Da die Projektionszentren der drei Kameras nicht identisch sind, muss ein tiefenabhängiges Forward-Warping vollzogen werden, sodass die Pixel der Tiefenkarte auf den Farbkameras abgebildet

⁴⁷ Ebd.; S. 2/3/8/9.

⁴⁸ Ebd.; S. 4.

⁴⁹ Ebd.; S. 5/10.

werden. Dies ist nur auf Basis der sauberen Systemkalibrierung zuvor möglich, denn nur dann liegen verlässliche Werte über Projektionsmatrizen, Verzeichnungseffekte und so weiter vor.

e) Depth Image Auflösung & Upscaling⁵⁰

Eine weitere Herausforderung ist die geringe Bildauflösung der ToF-Kamera. Bei der Fusion mit den Farbkameras, die in diesem Aufbau eine Auflösung von 1024 mal 786 Pixel haben, deckt jeder Tiefenpixel 5 mal 5 Farbpixel ab, was suboptimal ist. Daher wird die Tiefenkarte hochgerechnet (Upscaling). Dies funktioniert weitestgehend gut, allerdings gibt es Probleme bei den verdeckten Bildregionen auf Grund von Parallaxen zwischen Vordergrund und verdecktem Hintergrund. Solange nur die Vordergrund-Bereiche im Bild von Interesse sind und das virtuelle 3D-Umgebungsmodell der Offline-Phase zur Verfügung steht, kann dieses Problem vernachlässigt werden.

f) Geschwindigkeit⁵¹

Der Scan der Umgebung in der Offline-Phase benötigt etwa 1 Minute und liefert dichte und verlässliche Tiefeninformationen. Andere Verfahren zum Scannen, wie ein rotierender Kamerakopf, sind denkbar, aber auch fehleranfälliger auf Grund der miteinzukalkulierenden Bewegung. Stereoverfahren könnten bei einheitlichen Flächen Probleme machen und ein Laser-Scanner oder die Structured-Light Methode - Projektion von Lichtmustern auf Objekte und Registrierung der Verkrümmungen - würden in der Online-Phase bei dynamischen Objekten versagen. Da der Scan der Offline Phase eine Minute benötigt, eignet sich das System bis jetzt aber doch hauptsächlich für Innenaufnahmen ohne dynamische Bildinhalte wie bewegte Blätter oder ähnlichem.

g) Beleuchtung, Schatten, Oberflächenreflexion⁵²

Korrekte Beleuchtung und Schatten sind elementar für gute optische Integration der virtuellen Elemente, sodass diese nicht im Raum schweben. Mit dem Kombi-System ist auch Lichtinteraktion möglich, indem virtuell ein Modell der Lichtquelle an entsprechender Position eingefügt wird. Dies ist zwar noch manuell zu erledigen und bis

⁵⁰ Ebd.; S. 5/6.

⁵¹ Ebd.; S. 7.

⁵² Ebd.; S. 11/12.

jetzt nur mit Punktlichtquellen für Echtzeitfähigkeit möglich, doch eine Automatisierung ist in der Zukunft denkbar.

Für das effiziente Berechnen der Schatten virtueller Objekte werden Lightmaps für jedes Bild generiert und diese arbeiten dann mit den 2D-Bildern. Jede Lichtquelle hat dabei eine Tiefenkarte für alle Objekte, die Schatten werfen. Es ergibt sich dennoch das Problem von Doppelschatten, wenn verschiedene Objekte auf die gleiche Stelle Schatten werfen und sich überlagern.

Auch Oberflächenreflexionen sind mit den generierbaren Normalmaps einfach handhabbar. Jedoch ist das System an seinen Grenzen, da es für die Oberflächenreflexion völlig andere Perspektiven kalkulieren muss – spiegelverkehrt – und bereits kleinste Abweichungen der Tiefenmessung starke Reflexionsfehler liefern. Hier sind Tiefeninformationen höchster Qualität nötig.

Fazit des Kombi-Systems

Für gute Interaktion von realem und virtuellem Bildinhalt ist eine gute 3D-Rekonstruktion unabdingbar. Besonders wichtig für eine gute Verschmelzung sind Verdeckungen, Schatten und Reflexionen. Dies war bisher zwar alles möglich, aber bei fast allen Arbeitsschritten – Chroma-Keying, Oberflächenmodellierung usw. – deutlich aufwändiger und zeitintensiver, weil vieles manuell gemacht werden musste. Noch schwieriger war es bei dynamischen Inhalten. Andere Systeme sind zwar auch meistens gut und teilweise genauer, aber sehr aufwändig und versagen bei dynamischem Bildinhalt (Laser Scanner, Structured Light). Noch dazu sind sie nicht echtzeitfähig.

Dieses vorgestellte Kombi-System dagegen funktioniert in Echtzeit oder nahezu Echtzeit für Verdeckungen, Schatten und Reflexionen, ohne extrem aufwändige Algorithmen und ohne etliche Kamera-Standpunkte. Jedoch liefert es deshalb genau betrachtet nur ein 2,5D-Model der rekonstruierten Objekte und Umgebung, da nur ein Kamerastandpunkt bisher in die Berechnung einfließt. Daher wird auch das korrekte Berechnen von Schatten und Reflexionen etwas eingeschränkt. Hier könnte ein Ansatz mit weiteren zusätzlichen ToF-Kameras Abhilfe schaffen, um noch bessere Ergebnisse zu erzielen. In der Postproduktion sind auf Basis der 3D-Geometrie weitere Anwendungen und Möglichkeiten des Kombi-Systems möglich.

Die geringe Bildauflösung der ToF-Kamera ist auch in diesem Ansatz sehr problematisch für das Depth-Keying und muss mittels Upscaling bestmöglich verbessert werden. Dennoch ergeben sich dadurch bei der Berechnung von Verdeckungen, Schatten und Reflexionen Probleme. Da die Kameras mit unterschiedlichen Bildfrequenzen – ToF mit 12,5 und die anderen mit 30 BpS – aufzeichnen, kann zu Rauschen führen und optimale Ergebnisse verhindern. Mit den inzwischen besseren ToF-Kameras dürfte die Bildfrequenz inzwischen kein Problem mehr darstellen. Lediglich die geringe Bildauflösung ist auch bei aktuellen ToF-Kameras existent und kaum verbessert. Nachträgliche Korrekturen bei Blende, Tiefenschärfe, Fokus, Bildausschnitt, Kamerabewegungen sind aber auch mit diesem System nicht möglich, da verschiedene Kamera-Ansichten fehlen.

Die folgende *Tabelle 2* zeigt nochmals zusammenfassend und für eine bessere Vergleichbarkeit die Vor- und Nachteile der ToF-Kamera, des ToF-Kombisystem und des Lightfield-Array-Systems bezüglich wichtiger Aspekte.

Tab. 2: Vergleich Lightfield vs. ToF vs. ToF-Kombisystem

Vergleichsaspekte	Getestetes LF-Array	ToF-Kameras (beispielhaft SR400 Mesa)	Beschriebenes ToF- Kombisystem
System-Basics			
Aufzeichnung 3D bzw. Tiefeninformationen	✓	✓	✓
Aufzeichnung klassischen Bildinhalts	✓	x	✓
Passives oder aktives Verfahren	passiv (Triangulation, Korrelation)	aktiv (Lichtpuls)	aktiv/passiv Kombi
Systemaufbau & -Eigenschaften (harte Fakten, Datenblattinfos)			
Bildauflösung	2046 x 1086 (2K)	176 x 144	RGB: 1024 x 786 ToF: 176 x 144
Systemgröße	~ 40 x 40 x 15 cm	~ 6,5 x 6,5 x 7,6 cm	~ 20 x 20 x 10 cm
USB	x	✓	(ToF ✓)
Ethernet	✓	✓	(ToF ✓)
Gewicht	~ 2,5 kg	~ 0,5 kg	(k.A.; geschätzt: 1,5 kg)
Videofunktion	✓	✓	✓
Bildfrequenz	max. 50 fps gedreht mit 25 fps	max. 50 fps	ToF: max. 12,5 fps
Betriebstemperatur	0 bis 50°C	10 bis 50°C	(10 bis 50°C)
Mono/Farbe	Farbe	Mono	Farbe
System besteht aus mehreren Kameras	✓ (9 Stück: Basler)	x	✓ (3 Stück: ToF, 2 RGB)
Preis fürs Kamera bzw. System	~ 7000 €	~ 4500 €	(k.A.; geschätzt: 8000 €)



Systemaufbau & -Eigenschaften (weiche Fakten, Testergebnisse, evtl. abhängig von anderen Faktoren)				
Nahester & weitester Abstand	~ 70 cm bis 12 m (abhängig von Anordnung der Kameras)	~ 1 cm bis 8 m (abhängig von Laser- bzw. LED-Stärke)	~ bis 7,5 m (abhängig von Laser- bzw. LED-Stärke)	
Tiefenauflösung	Wenige Zentimeter (abhängig von Anordnung der Kameras)	< 1 cm	< 2 cm	
Depth Maps	✓	✓	✓	
Normal Maps	✓	✓	✓	
Point Clouds	✓	✓	✓	
Verdeckungen umgehen	✓	x	✓	
Geschwindigkeit der Berechnung (3D, Tiefeninfo) bzw. Software-Komplexität	gut bis sehr gut Sehr langsam hoch	schlecht bis mittel Echtzeit gering	mittel (nahezu) Echtzeit Gering-mittel	
System Flexibilität (Anpassung an unterschiedliche Szenen/Bildinhalte) möglich?	✓ Möglichkeiten: dichtes Array, grobes Array, Anordnung, Kameramodell	✓ Möglichkeiten: Objektive für verschiedene optimale Entfernungen, interne Einstellungen wie Beleuchtungszeit uvm.	✓ Möglichkeiten: Objektive für verschiedene optimale Entfernungen, interne Einstellungen wie Beleuchtungszeit uvm.	
Systembeweglichkeit	Fahrbar (langsam), schwenkbar	x	Fahrbar, schwenkbar	
Steadycam-Einsatz	(✓) denkbar	x	(✓) denkbar	
Aufnahme extern/intern	extern (RAID)	intern	extern	
Aufwand am Set: Systemaufbau & -kalibrierung	mittel	gering-mittel	mittel - groß	
Aufgezeichnete Datenmenge	Sehr viel	gering	mittel	
Indoor/Outdoor	vorzugsweise Indoor (Stromversorgung) Anderes Array für Outdoor	Indoor (Störfaktoren)	Indoor (Störfaktoren)	



Nachträgliche Bearbeitungsmöglichkeiten			
Blende ändern	✓	x	x
Fokus/Tiefenschärfe ändern	✓	x	x
Perspektive/Winkel ändern (X,Y,Z Rendering)	✓	x	x
Virtuelle Kamera: Bewegungen generieren	✓	x	x
Virtuelles Stereo	✓	x	x
Relighting	(✓) geplant	x	(✓) eingeschränkt
Tiefenbasierte Farbkorrektur	(✓) geplant	x	(✓) denkbar
CGI/Live action integration (Augmented Reality)	✓	x	✓
Depth Keying	(✓) Geplant, denkbar	x	(✓) (noch problembehaftet)
HFR	✓	(✓)	(✓)
HDR	✓	x	x
Markerloses Tracking	x	x	✓
Set-Anforderungen: Räumlichkeiten, Ausstattung, Requisite, Maske, Kostüm			
Objektbewegung (wegen Motion Blur)	Langsam bis Mittel (abhängig von Distanz zur Kamera)	Langsam bis mittel	(Langsam bis Mittel)
Texturen/Materialien/Oberflächen	x Evtl. Probleme für: Spiegelung, Transparenz, Highlights, feine Strukturen, einheitliche Flächen	x Evtl. Probleme für: Spiegelung, Transparenz (Farbe, Texturen)	x (Evtl. Probleme für: Spiegelung, Transparenz (Farbe, Texturen))
Weitere Störfaktoren		Hintergrundlicht, Sonnenlicht, zu großer Dynamikumfang, zu kühle/heiß	(Hintergrundlicht, Sonnenlicht, zu großer Dynamikumfang, zu kühle/heiß)



		Temperaturen, Mehrfachreflexionen, Verdeckungen	Temperaturen, Mehrfachreflexionen, Verdeckungen
Preview 3D, Tiefeninfos	x nur ein Bild des Arrays, denkbar	✓	✓
Blue or Green Screen	(nein) geplant	nein	nein
Ziel-Anwendungsgebiet	vorrangig: Film, Fernsehen	Vorrangig: Echtzeit-Anwendungen: Industrie, Medizin, Gaming, Robotik, H/M-Interaction,	Vorrangig: Film, Fernsehen

Tabelle 2: Vergleich Lightfield^{1,2} vs. ToF^{3,4,5,6,7,8,9,10}

¹ Die Angaben für das getestete Lightfield Array basieren weitestgehend auf den Erfahrungen des Testdrehs und der Postproduktionsphase sowie Einschätzungen der Experten beim Expertenmeeting an der HdM (Kapitel 4). Die Datenblatt-Infos stammen von der Basler-Website.
² Basler Website (2015): [aca2000-50gc](http://www.baslerweb.com/de/produkte/flaechenkameras/ace/aca2000-50gc);
³ Die Angaben für die ToF-Kameras basieren auf Kapitel 5 und den dort angegebenen Quellen, sowie einigen zur Absicherung ergänzenden Quellen (anschließend aufgeführt);
⁴ die Angaben für das ToF-Kombi-System basieren ebenfalls auf Kapitel 5 und den dort angegebenen Quellen.
⁵ Deyle, Travis; Hizook-Webseite (2010): Low-Cost-Depth-Cameras to Emerge in 2010; [URL: <http://www.hizook.com/blog/2010/03/28/low-cost-depth-cameras-aka-ranging-cameras-or-rgb-d-cameras-emerge-2010>];
⁶ Henry et. al (2015): RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments; PDF.
⁷ Langmann et. al (nach 2009): Depth Camera Technology Comparison and Performance Evaluation; PDF.
⁸ Blackburn et. al (nach Mai 2010): Incremental 3D Model Generation using Depth Cameras; PDF.
⁹ Litomisky, Krystof; University of California (2012): Consumer RGB-D Cameras and their Applications; PDF.
¹⁰ Texas Instruments Webseite (2015): 3D Time of Flight Imaging Solutions; [URL: http://www.ti.com/vw/en/analog/3dtof/index.shtml?DCMP=analog_signalchain_mr&HQS=3dtof-pr];
 Texas Instruments (2014) : Time-of-Flight-Kamera – An Introduction; PDF; S.6.

6. Kapitel: Fazit und Ausblick: Ist Lightfield die Zukunft von Film & Fernsehen?

6.1 Wo führt die Zukunft hin und was wird Standard?

Was die Zukunft im Kino- und Fernsbereich bringt, ist nicht ganz einfach vorauszusagen, da es eine sehr schnelllebige mediale Zeit ist und die technische Entwicklung schnell voranschreitet, sodass ständig Neuerungen und Verbesserungen bezüglich verschiedener Aspekte im Film und Fernsehbereich erreicht werden. Viele sind vorübergehend und nur ein Zwischenschritt, einige werden zu internationalen langfristigen Standards.

Im Moment schätzen Branchenexperten und die Autorin dieser Thesis, dass vor allem die Aspekte UltraHD (mit 4K, ferner auch 8K) und starker Einsatz von Computer Generierten Bildern (CGI) und Spezialeffekten (VFX) die Film- und Fernsehwelt immer mehr dominieren und sich als Standard etablieren werden. Auch in anderen Bereichen werden computeranimierte Inhalte, sowie die Interaktion damit - beispielsweise bei Computer-Spielen, interaktiven Serien, Bildung oder Dokumentationen etc. - weiter an Bedeutung gewinnen. Gerade die interaktive Einbindung der Zuschauer in Virtual oder Mixed Reality wird weiter zunehmen. Dies bedeutet, dass vor allem die dreidimensionalen Tiefeninformationen realer Umgebungen inzwischen und zukünftig umso mehr essentielle Grundlage sind und daher möglichst effizient und schnell erfasst werden müssen. Hierfür ist Lightfield durchaus ein vielversprechendes Verfahren, muss sich aber an den zukünftigen Qualitätsansprüchen mit mindestens 4K-Auflösung und möglichst Echtzeit-Lightfield-Visualisierung orientieren, um konkurrenzfähig oder besser noch der Konkurrenz voraus zu sein.

Höhere Bildraten (HFR) werden weiterhin auch ein Thema bleiben, jedoch ist noch ungewiss, ob es eher ein Nebentrend – wie 3D – bleiben wird oder zukünftig in jedem Film zum Einsatz kommt. Bis jetzt wird es immer noch nur von wenigen Regisseuren, abgesehen von James Cameron für seine „Avatar“-Fortsetzungen und Peter Jackson für die „Hobbit“-Trilogie, vorangetrieben. Umso wichtiger ist es für Lightfield gute Kompressionsalgorithmen voranzutreiben, um sich auch den Dreh mit HFR weiter offen zu halten. Für 3D ist Lightfield ebenfalls vielversprechend, insofern mehr Perspektiven zur Auswahl stehen, was es jedem Betrachter theoretisch ermöglicht

den 3D-Effekt individuell für sich bestmöglich und angenehm anzupassen, sowie den 3D-Effekt je nach Wiedergabemedium optimal einzustellen.

Allgemein strebt insbesondere die Fernsehbranche immer mehr automatisierten Prozessen und Personalkostenreduzierungen entgegen. Dies macht Techniken, die schnelle kostengünstige Produktion ermöglichen, besonders interessant. Auch hier könnte Lightfield interessant sein, sofern es mittels guten Depth-Keying-Algorithmen gelingt Blue/Green Screen überflüssig zu machen und die Arbeit mit Backplates wesentlich effizienter zu gestalten. Auch für den Dreh aufwändiger, nicht wiederholbarer Szenen ist es aus Kostengründen eine vielversprechende Alternative.

6.2 Die Zukunft von Lightfield

Wie in dieser Thesis näher erläutert, bietet Lightfield als eine sehr postproduktionslastige Art und Weise des Filmedrehens diverse Möglichkeiten zur Nachbearbeitung und Korrektur, die bis jetzt mit herkömmlicher Technik im Nachhinein nicht oder schwer möglich sind. Von der Erzeugung nachträglicher Kamerafahrten, der Umfokussierung im Bild, der Wahl anderer Bildausschnitte über Relighting, CGI-LiveAction-Integration bis zu nachträglichem virtuellen 3D. Gleichzeitig ergeben sich beim Dreh am Set durch Lightfield andere kreative und technische Möglichkeiten und es kann bei einigen bisherigen Problemen, wie schlecht gezogener Schärfe, unsaubere Kamerafahrten und ähnlichem Abhilfe geschaffen werden. Dadurch ergibt sich wiederum mehr Freiraum und Zeit für andere Dinge.

Allerdings muss an dieser Stelle auch die Überlegung gemacht werden, wie die Postproduktion – allen voran der Cutter – mit dem Material umgeht, das noch in so viele Richtungen korrigiert und verändert werden kann. Wer trifft die kreativen Entscheidungen über Bildausschnitt, Fokus, virtuelle Kamerapositionen und dergleichen? Dies kann einerseits über am Set aufgezeichnete Metadaten erfolgen, sodass bereits erste kreative Wünsche dazu von Regisseur und Kameramann zur Verfügung stehen. Andererseits macht es aber vermutlich trotzdem auch deren Anwesenheit in der Postproduktion für alle wichtigen kreativen Entscheidungen, die bisher am Set zu ihren Entscheidungsbereichen gehören, nötig.

Jede neue Technik kann nur weiterentwickelt werden und sich etablieren, wenn sie von den Filmschaffenden akzeptiert und genutzt wird. Hier gibt es derzeit vor allem von Regisseuren und Kameramännern noch die Bedenken, dass diese postproduktionslastige Arbeitsweise stark in ihren kreativen Prozess am Set eingreift und den anderen (kreativen) Vorteilen von Lightfield somit entgegensteht.

Bei Lightfield sind neben diesem kreativen Aspekt die Bedenken momentan hauptsächlich der große Aufwand und die Kosten, denen größtenteils Vorteile gegenüberstehen, die zwar in der Nachbearbeitung „nice to have“ sind, aber nicht alle von immensem Mehrwert, wie der Vertigo-Effekt beispielsweise. Zudem ist der Aspekt der großen anfallenden Datenmenge durch die vielen eingesetzten Kameras aktuell noch mit die größte technische Herausforderung.

Für den Postproduktions-Workflow lässt sich abschließend erahnen, dass eine Nachrüstung hauptsächlich auf Grund der Datenmenge und nicht aufgrund anderer Besonderheiten von Lightfield nötig wird. Eine Nachrüstung der gängigen Postproduktions-Software mittels extra entwickelter Plugins sowie eine Aufrüstung der Computerleistung bei Prozessor, Grafikkarte und Arbeitsspeicher wird wohl unumgänglich sein, um die Datenmenge bewältigen zu können. Zwar steigen Rechnerleistungen weiter an, doch wird weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit nötig sein, um leistungsfähigere Hardware und bessere Implementierungen, Algorithmen und Plugins zu entwickeln. Die Verwendung guter Kompressionscodecs auch zur Distribution an Kinos, zum Brennen auf BluRay oder zur flüssigen Wiedergabe auf sämtlichen Geräten – Streaming wird immer wichtiger - wird ebenfalls erforderlich sein. Hier gibt es allerdings schon erste Einschätzungen, dass Kompressionsraten von mehr als 90 Prozent erzielbar sind. Ebenso ist die Entwicklung von technischen Standards für Lightfield einer der wichtigsten nächsten Schritte, um effektiv damit arbeiten zu können und die Technik weiterzuentwickeln.

Eine weitere große Herausforderung ist es momentan zudem noch, eine bessere Automatisierung in sämtlichen Bereichen bei der Verarbeitung der Daten zu erreichen, um die Personalkosten zu senken. Aktuell erfordert die Technik an vielen Stellen noch viel manuelles Eingreifen und persönliche Kontrolle, was den Mehrwert deutlich mindert. Jedoch muss an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass die in dieser Thesis beschriebene Technik und ihre Verfahrensweise noch abso-

lut im Anfangsstadium steckt und dies daher besonders zu beachten gilt, auch im Hinblick auf den Vergleich mit der ToF-Technik - die diesbezüglich einiges an Vorsprung hat. Es wird nur eine Frage der Zeit sein, bis Lightfield gut automatisiert nutzbar ist.

Erste Ergebnisse der Postproduktion des Materials aus dem Testdreh sind, trotz einiger bestehender Herausforderungen, vielversprechend. So sind die Tiefenkarten mitunter schon besser als bei Stereosystemen und auch das Relighting funktioniert ganz gut. Allerdings wurden auch viele Stellen deutlich, die noch Optimierung benötigen, darunter die Normal Maps und die Algorithmen der Plugins. Hier sind aber weitere spezifische Tests notwendig. Zudem ist zukünftig der Einsatz von 4K-Kameras im Array nötig, um den steigenden qualitativen Ansprüchen der Zuschauer gerecht zu werden.

Betrachtet man die verschiedenen Anwendungsbeispiele für Lightfield, so lässt sich fast in jedem speziellen Fall auch eine Kamera finden, die daraufhin entwickelt wurde und mit Lightfield wahrscheinlich mithalten kann oder sogar besser ist. Vergleicht man aber die Gesamtheit aller Anwendungsfälle und Möglichkeiten einer traditionellen Filmkamera mit denen des vorgestellten Lightfield-Kamera-Systems, so gibt es im Moment kein anderes System, welches ähnliche Möglichkeiten bietet. Auch die vorgestellte ToF-Technik kann da nur schwer mithalten. Sie hat Lightfield zwar die Echtzeitfähigkeit voraus und ist deshalb für Echtzeit-Interaktion viel geeigneter, doch bietet sie dafür selbst im Kombisystem schlechtere Auflösung und lässt aufgrund fehlender Kameraperspektiven sämtliche nachträgliche Bearbeitungsoptionen - wie anderer Bildausschnitt, Umfokussierung, virtuelle Kamerafahrten etc. - vermissen.

Auch andere Systeme zur Aufnahme von Tiefeninformationen wie Laserscanner, Structured Light oder Light Stages liefern gute Ergebnisse bei Tiefeninformationen, teilweise auch mit weniger Aufwand und schneller, haben aber die anderen nachträglichen Optionen ebenfalls nicht und sind für dynamische Bildinhalte bedingt bis gar nicht geeignet.

Die genannten Herausforderungen dürften momentan dem Mehrwert und den Vorteilen von Lightfield zwar noch sehr entgegenstehen, doch gilt es zu beachten, dass in dieser Thesis die „ersten Schritte“ einer neuen Technik beschrieben werden. Zukünftig

tig kann diese Technik eine große Erleichterung bei Dreharbeiten und in der Postproduktion bedeuten. Zudem bieten auch andere Techniken wie Laserscanner, Structured Light oder ToF zur Aufnahme von Tiefeninformationen viele Nachteile und sind bereits deutlich fortgeschrittener entwickelt. Sofern es gelingt die Forschungen mittels Sponsoren und Industrie weiter voranzutreiben und das Interesse bei Filmschaffenden zu wecken, kann Lightfield sehr vielversprechend sein.

Jedoch schätzt die Autorin, dass es im Film- und Fernsehbereich wohl lange nur eine Randerscheinung bleiben wird und vermutlich auch keine ausschließlichen Lightfield-Produktionen realisiert werden, sondern Lightfield erstmal voraussichtlich nur bei bestimmten Szenen - schwierige oder schlecht wiederholbare - zum Einsatz kommen wird. Grundsätzlich dürfte das Interesse an Lightfield in der Fernsehbranche aber größer sein als im Kinobereich, da dort in der Regel geringere künstlerische Ansprüche bestehen und der Aspekt einer kostengünstigen, schnellen Produktion immer mehr an Bedeutung gewinnt. Daher wird auch sehr viel Arbeit bereits aus Kostengründen in die Postproduktion verlagert.

Jedoch ist es durchaus vorstellbar dass Lightfield in anderen Bereichen, gerade bei Virtual oder Mixed Reality Formaten und diversen interaktiven Applikationen (zum Beispiel in der Bildung, in Museen, Cultural Scanning etc.) einen großen Mehrwert bietet und durchaus vermehrt zum Einsatz kommen wird, sobald es ausgereifter ist.

Im Fotografie-Bereich hat Lightfield inzwischen im Consumer-Bereich mit den ersten Lightfield-Fotokameras von Lytro Einzug erhalten. Diese Kameras erfreuen sich zunehmender Beliebtheit und ermöglichen nachträglich die Veränderung der Tiefenschärfe, des Fokus und des Blickwinkels.

Das Interesse der Nutzer und Zuschauer nachträglich noch andere Viewpoints auszuwählen oder weitere Bild- bzw. Video-Parameter für sich persönlich und je nach Wiedergabe-Medium nochmal speziell anzupassen, dürfte demnach vorhanden sein. Zudem wird sich in allen Bereichen zunehmend am Individuum Kunde ausgerichtet und versucht jeden Kunden individuell anzusprechen und zufriedenzustellen. Genau darauf zielt Lightfield – ob Foto oder Bewegtbild - mit einer hohen Flexibilität der nachträglichen Möglichkeiten und noch echteren, realitätsgetreueren „lebenden“ Bildern ab. Und darin liegt wohl auch das größte Potenzial dieser Technik, dieser Meinung ist auch Jason Rosenthal, Firmenchef von Lytro:

„[The aim is] making pictures come alive, or changing the definition of what an image is all about versus the flat, 2D snapshots that we've lived with for the last 175 years. Now we'll just have to see if artists or viewers have any interest in responsive images.¹

-Jason Rosenthal (Lytro-CEO) -

Und wenn die größten Hürden genommen sind, warum sollte dann Lightfield nicht auch Einzug im Bewegtbild erhalten? Bis dahin ist es zwar vermutlich noch ein langer Weg, doch die ersten Schritte sind gemacht und die weitere Entwicklung wird spannend zu verfolgen sein.

¹ Rosenthal, Jason in DPReview-Artikel (Mai 2014): Lightfield Cameras – Focusing on the Future
[URL: <http://www.dpreview.com/articles/5867769785/light-field-cameras-focusing-on-the-future>; 21.04.15].

Danksagung

Mein größter Dank gilt meinen Eltern für ihre fortwährende Unterstützung, nicht nur beim Erstellen dieser Arbeit, sondern generell während des Studiums und in jeder Lebenslage. Ein mindestens genauso großes Dankeschön möchte ich meinem Freund Jürgen, der mich immer unterstützt und hinter mir steht, zukommen lassen!

Ebenso möchte ich mich ganz herzlich bei Professorin Katja Schmid und Professor Stefan Grandinetti für die Zusammenarbeit und Unterstützung während des Studiums und vor allem bei dieser Arbeit bedanken. Genauso wie bei allen anderen, die so motiviert an diesem Forschungsprojekt beteiligt waren und mit Rat und Tat zur Seite standen. Darunter Kommilitonen, HdM-Mitarbeiter, Experten aus verschiedensten Bereichen der Medienbranche und Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS). Letzteren möchte ich auch besonders für das zur Verfügungstellen von Lektüre und Informationen danken.

Ein weiteres großes Dankeschön möchte ich meinen fleißigen Korrekturlesern - darunter meine Eltern, meine Freundin Kathrin und meine Kommilitonin Marlene - für ihre Anmerkungen, Vorschläge und konstruktiven Kritikpunkte aussprechen. Ihr wart eine große Hilfe!

Anhang

Dieser Masterthesis liegt eine DVD, mit einer elektronischen Version der Thesis als PDF, sowie den Protokollen des Expertpanels im November 2014 als PDF bei.

Bilder

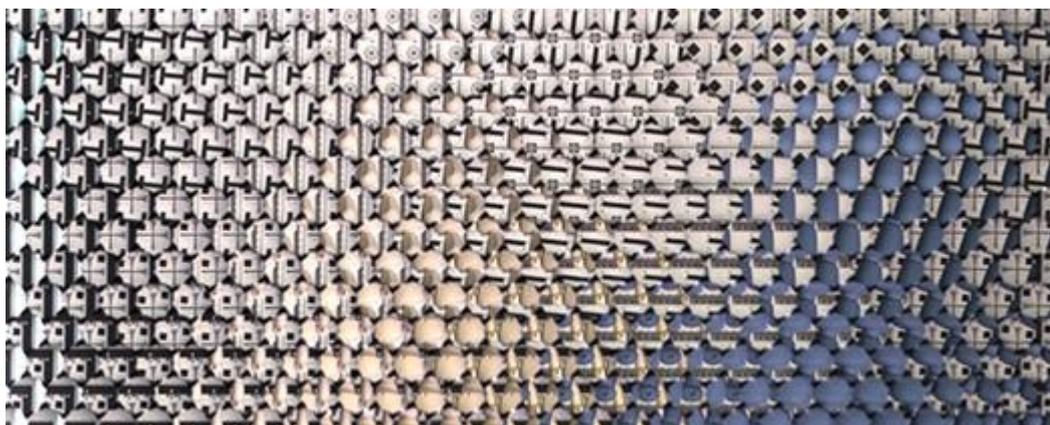


Abb. 5: Mikrolinsen-Array einer plenoptischen Lichtfeld-Kamera



Abb. 6: Fraunhofer IBC 2013 Kamera-Array (links) und Einsatz bei einer Miniaturszene (rechts)¹

¹ Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 2

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

2D	= zweidimensional
2K	= die Auflösung eines digitalen Kinofilms mit 2.048 x 1.080 Pixeln
3D	= dreidimensional
4K	= die Auflösung eines digitalen Kinofilms mit 4.096 x 2.160 Pixeln
BpS	= Bilder pro Sekunde
CGI	= Computer generated Images, computer-generierte Bilder
CV	= Computer Vision, maschinelles Sehen
fps	= frames per second
GB	= Gigabyte
HFR	= Higher Frame Rates
IBM	= Image Based Modeling, Erschaffung virtueller Objekte auf Basis von 2D-Bildern
LED	= Light-emitting diode, Leuchtdiode
LF	= Lightfield/Lichtfeld
MbpS	= Megabits pro Sekunde
RAID	= Redundant Array of Independent Disks, mehrere Festplatten als logisches System, ermöglicht höheren Datendurchsatz und schnelleren Schreib- und Lese-Zugriff
RGB	= Rot-Grün-Blau (Kamera), Farbbildkamera
RGB-D	= Farbbild-Tiefenkamera
TB	= Terabyte
ToF	= Time-of-Flight (-Kamera); Lichtlaufzeit (-Kamera)
VFX	= Visual Effects, in der Postproduktion am Computer erzeugte Effekte
VR	= Virtual Reality, virtuelle Realität

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Hinweis: Alle verwendeten und hier aufgelisteten Grafiken und Tabellen wurden – sofern es sich um Internetquellen handelt - zuletzt am 21. April 2015 zur Kontrolle abgerufen.

Thesis Cover: Lichtstrahlen-Originalbild

[URL: http://www.susanweb.hu/wp-content/uploads/bigstock_Into_The_Light_23653.jpg]

Bilder und Grafiken

- Abb. 1:* *Verdeutlichung der Lichtstrahlen ausgehend von einem Objekt*
[URL: <http://www.lichtfeldkamera-test.de/wie-funktioniert-eine-lichtfeldkamera/>]
- Abb. 2 :* *5D Plenoptische Funktion: a) Strahldichte L entlang eines Strahls; b) Parametrierung des Strahls; c) Konstante Strahlung ohne Hindernis reduziert die plenoptische Funktion auf 4D*
[URL: <http://graphics.stanford.edu/papers/lfphoto/levoy-lfphoto-ieee06.pdf>; PDF; S. 2]
- Abb. 3:* *a) Implementierung in QuickTime mit weit auseinanderliegenden Kamerapositionen (rote Punkte), daher ist nur ein umkreisen des Objekts (blau) nicht aber das Annähern möglich; b) dichte Kamerapositionen im Lightfield ermöglichen neue Betrachtungspunkte (gelb); Lightfield: 2D Sammlung (u,v) von 2D-Aufnahmen (s,t)*
[URL: <http://graphics.stanford.edu/papers/lfphoto/levoy-lfphoto-ieee06.pdf>; PDF; S.3]
- Abb. 4:* *Vergleich des Aufbaus einer konventionellen und einer Lichtfeld-Kamera*
[URL: <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/lightfield-photography-revolutionizes-imaging>]
- Abb. 5:* *Mikrolinsen-Array einer plenoptischen Lichtfeld-Kamera*
[URL: <http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/bsy/tech/lightfeld.html>]
- Abb. 6:* *Fraunhofer IBC 2013 Kamera-Array (links) und Einsatz bei einer Miniaturszene (rechts)*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 2]
- Abb. 7:* *Rektifizierte Kamerabilder mit korrespondierenden Bildpunkten der vier verglichenen Nachbar-Kameras (Eckpunkte der roten Rechtecke)*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 3]
- Abb. 8:* *Pixeldichte Disparitätskarten der vier Kamerabilder aus Abbildung 7*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 4]
- Abb. 9:* *Interpoliertes Lightfield mit original Kamerabildern und generierten Zwischenbildern*

- [Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 5]
- Abb. 10: *Nachträgliche Änderung der Schärfeebene einer Aufnahme mit Fokus vorne (links) oder Fokus hinten (rechts)*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 5]
- Abb. 11: *Neuberechnete virtuelle Kameraposition vor dem Kameraarray bei der Aufnahme (rechts) und hinter dem Array (links)*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 6]
- Abb. 12: *Dolly-Zoom-Effekt, bei gleichbleibender Größe der Objekte im Vordergrund, vergrößern sich die Hintergrundobjekte (Planwagen und Kaktus, rechts)*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 6]
- Abb. 13: *Rendern eines virtuellen Stereobildes (hier als Anaglyph-Bild verdeutlicht) mit variablen Inter-Axial-Abständen für individuelles 3D bzw. stärkerem oder schwächerem 3D-Effekt. Objekte vorne (Cowboy) sind in der Konvergenz-Ebene, Objekte hinten (Wagen und Kaktus) haben größere Disparitäten*
[Zilly et al.; Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System [...]; PDF; S. 7]
- Abb. 14: *Fraunhofer IIS Lightfield-Array des Testdrehs November 2014 mit 3x3 Basler-Kameras [Eigenes Foto]*
- Abb. 15: *Fraunhofer IIS Schema zu Technological Constraints [Folie des Fraunhofer IIS aus projekt-interner Präsentation im Webinar]*
- Abb. 16: *ToF-Kamera „SwissRanger 400“ von Mesa Imaging*
[URL: http://de.academic.ru/pictures/dewiki/84/TOF_Kamera.jpg]
- Abb. 17: *ToF-Funktionsweise mit Pulslichtlaufverfahren (oben) und Phasendifferenzverfahren (unten)*
[Castaneda, Victor; Navab, Nassir (2011): Time-of-Flight and Kinect Imaging; PDF; S. 11/13]
- Abb. 18: *Links: Kombisystem aus ToF-Kamera (Mitte), HD-Kamera (rechts) und HD-Kamera mit Fisheye-Objektiv (links) / Rechts: Funktionsweise mit Offline- und Online-Phase*
[Koch et al. (nach Mai 2009): MixIn3D: 3D Mixed Reality with ToF-Camera; PDF; S. 3]

Tabellen

- Tab. 1: *Lightfield-Datenmenge (90-minütiger Spielfilm; ausgehend von 2,5 TB pro Stunde Material); eigene Tabelle*
- Tab. 2: *Vergleich Lightfield vs. ToF vs. ToF-Kombisystem ; eigene Tabelle*

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

Internetquellen A-Z

Hinweis: Da die Lightfield-Technik noch in der Entwicklungsphase steckt, musste die Autorin dieser Masterthesis hauptsächlich auf Veröffentlichungen, Whitepapers etc. von diversen Firmen, Universitäten und Institutionen zurückgreifen, die häufig vorläufige Ergebnisse der Forschungsarbeit präsentieren. Zudem basiert ein Großteil der Thesis auf Ergebnissen des Fraunhofer Institutes und praktischen Erfahrungen während der Dreharbeiten und Postproduktion an der HdM im Rahmen des Forschungsprojektes. Erkenntnisse des Lightfield-Expertpanel mit Experten der Filmbranche an der HdM fanden ebenfalls in dieser Thesis Verwendung. Die Protokolle dieses Meetings wurden daher dieser Arbeit elektronisch auf der beigefügten DVD angehängt. Des Weiteren wurden auf Grund der Aktualität des Themas auch Artikel aus Online-(Fach-)Zeitschriften herangezogen. Nicht immer waren die Autoren namentlich genannt oder trotz namentlicher Nennung nicht bekannt. Jedoch wurden alle Informationen nach bestem Wissen und Gewissen sorgfältig auf ihre Seriosität überprüft, auf ihre Herkunft untersucht, mit der nötigen Vorsicht behandelt und ihr Wahrheitsgehalt durch weitere Informationen, so gut es möglich war, gegenseitig verifiziert. Alle aufgeführten Literatur- und Internetquellen sind alphabetisch geordnet und die Internetquellen wurden zuletzt am 21. April 2015 zur Überprüfung abgerufen.

Acroname Webseite (2015): Mesalming SR4000 5M USB 44°X35°

[URL: <http://www.acroname.com/products/r329-sr4000-10m-usb>]

AdeptTurnkey-Website (2014): Time-of-Flight 3D cameras technology provides multi-dimensional image solutions

[URL: http://www.adept.net.au/news/newsletter/201111-nov/article_tof_Mesa.shtml]

BlueTechnixProducts Webseite (2015): ARGOS 3D-P100

[URL: <http://www.bluetechx.com/de/products/depthsensing/product/argos3d-p100/>]

Castaneda, Victor; Navab, Nassir (2011): Time-of-Flight and Kinect Imaging; PDF

[URL: http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/TeachingSs11Kinect/2011-DSensors_LabCourse_Kinect.pdf]

Cui, Yan et al. (nach 2008).: 3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera; PDF

[URL: http://ai.stanford.edu/~schuon/sr/cvpr10_scanning.pdf]

Dorrington Adrian et al. (2009): Advantages of 3D Time-of-Flight Range Imaging Cameras in Machine Vision Applications; PDF

[URL: http://www.researchgate.net/profile/Michael_Cree/publication/44392824_Advantages_of_3D_time-of-flight_range_imaging_cameras_in_machine_vision_applications/links/0fcfd50bbddc982e1c000000.pdf]

Encyclopaedia Britannica (13.07.2014): Eintrag zu Nicéphore Niépce

[URL: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/414651/Nicephore-Niepce>]

Film, TV, Video Website (14.03.2013): Arri nennt Preise und Verfügbarkeit für Alexa-XT-Modelle und –Upgrades

[URL: <http://www.film-tv-video.de/newsdetail+M58b23420512.html>]

Geodetic-Systems-Website (2015): V-STARS: What is photogrammetry?

[URL: <http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>]

GoPro-Website (2015): Produkte: Kameras: Hero4

[URL: <http://de.shop.gopro.com/EMEA/cameras/>]

Harris, Mark; Artikel im IEEE Spectrum Online Magazin (30.04.2012): Light-Field Photography Revolutionizes Imaging

[URL: <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/lightfield-photography-revolutionizes-imaging>]

Heise-Online Website (08.03.2012): GDC: SoftKinetic erkennt Fingergersten auf kurze Instanz

[URL: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/GDC-SoftKinetic-erkennt-Fingergersten-auf-kurze-Distanz-1466180.html>]

Henry et. al (nach 2009): RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments; PDF

[URL: <http://www.cs.washington.edu/robotics/postscripts/3d-mapping-iser-10-final.pdf>]

Inosens Website (2015): 3D Time-of-Flight Sensoren

[URL: <http://www.inosens.com/?p=58>]

Koch et al. (nach Mai 2009): MixIn3D: 3D Mixed Reality with ToF-Camera; PDF

[URL: http://www.mip.informatik.uni-kiel.de/tiki-download_file.php?fileId=1226]

Kolb, A. et al. (2009): Time-of-Flight Kameras in Computer Graphics; PDF

[URL: <http://www.inb.uni-luebeck.de/publications/pdfs/KoBaKoLa10.pdf>]

Levoy, Mark (Stanford University, 2006); Artikel veröffentlicht von IEEE Computer Society: Lightfields And Computational Imaging; PDF

[URL: <http://graphics.stanford.edu/papers/lfphoto/levoy-lfphoto-ieee06.pdf>]

Lexikon auf wissen.de (2015): Eintrag zu Michael Faraday

[URL: <http://www.wissen.de/lexikon/faraday-michael>]

Lexikon der Physik Online auf Spektrum.de (2015): Eintrag zu Leonardo DaVinci

[URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/leonardo-da-vinci/8963>]

Lichtfeld-Kamera.net (2015): Definition Lichtfeld

[URL: <http://www.lichtfeld-kamera.net/p/lichtfeld.html>]

Lightfield-Forum.com (2015); Beitrag: What Is The Light Field

[URL: <http://lightfield-forum.com/what-is-the-lightfield/>]

Mesa Imaging Webseite (2015): Products: SR4000

[URL: <http://www.mesa-imaging.ch/products/sr4000/>]

Pichler, Thomas; Artikel im Photoscala Online Magazin (23.06.2011): Lichtfeld-Kamera: Autofokus war gestern

[URL: <http://www.photoscala.de/Artikel/Lichtfeld-Kamera-Autofokus-war-gestern>]

Rosenthal, Jason in DPReview-Artikel (Mai 2014): Lightfield Cameras – Focusing on the Future

[URL: <http://www.dpreview.com/articles/5867769785/light-field-cameras-focusing-on-the-future>]

SoftKinetic Webseite (2015): DepthSense 311

[URL: <http://www.softkinetic.com/Store/ProductID/>]

Stolc/Huber-Mörk; Laserfocusworld Artikel (06.09.2014); Photonic Frontiers: Computational Imaging

[URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-06/features/photronics-frontiers-computational-imaging-computational-imaging-using-a-multi-linescan-light-field-camera.html>]

Texas Instruments (2014): Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design; User's Guide; PDF

[URL: <http://www.ti.com/lit/ml/sbau219d/sbau219d.pdf>]

Texas Instruments (2014): Time-of-Flight Camera – An Introduction; PDF

[URL: <http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>]

Texas Instruments Website (2014): 3D Time of Flight Imaging Solutions

[URL: http://www.ti.com/ww/en/analog/3dtof/index.shtml?DCMP=analog_signalchain_mr&HQS=3dtof-pr]

Walford, Alan (2012): What is photogrammetry?

[URL: <http://www.photogrammetry.com/index.htm>]

Wiedemann, Wolfgang (2011): TU München: Ausgewählte Kapitel der Photogrammetrie; 3D Kameras – Aufnahmetechnik ToF-Kamera; PDF

[URL: http://www.pf.bgu.tum.de/edu/pak/tum_pak_11_wiedemann_pre_sp2.pdf]

Wikipedia-Eintrag (2015): Photogrammetrie

[URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Photogrammetrie>]

Wikipedia-Eintrag (2015): Plenoptische Kamera

[URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Plenoptische_Kamera]

Wikipedia-Eintrag (2015): ToF-Kamera

[URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/TOF-Kamera>]

Yale University Press (Hrsg.): Leonardo on Painting: An Anthology of Writings by Leonardo Da Vinci, with a Selection of Documents Relating to His Career as an Artist; New Haven (Connecticut); 2001

[URL: <http://books.google.de/books?id=roHf588GZJYC&pg=PA49&hl=de&source=>



gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false]

Literatur

Zilly et al. (2013); Fraunhofer IIS: Light-Field Acquisition System Allowing Camera Viewpoint and Depth of Field Compositing in Post-Production; PDF

Protokoll Lightfield-Expertpanel Nov. 2014: Gruppe 2 (siehe elektronischer Anhang, DVD)