

Fachbereich: Technik
Studiengang: Medientechnik

Bachelorarbeit

**Der technische Einfluss von Lichtfeldkameras auf
die zukünftige Kinematografie bei großen
Filmproduktionen in Deutschland**

Jonas Stolzmann

17. Februar 2020

Erstgutachter: Prof. Dr. Thomas Lemke
Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Claus Frerichs

Zusammenfassung

Die Lichtfeldtechnik ist eine Aufnahmetechnologie, die viele neue Möglichkeiten wie die Refokussierung oder das stereoskopische Filmen mit einer Linse bietet. In dieser Bachelorarbeit wird der Einfluss von Lichtfeldkameras auf große deutsche Filmproduktionen untersucht. Dabei werden die theoretischen Grundlagen von Lichtfeldkameras mit gängigen Kamerasystemen verglichen und die Bedeutung von Lichtfeldkameras für die Filmproduktion empirisch untersucht.

Abstract

The light field technology is a recording technology that offers many new possibilities such as refocusing or stereoscopic filming with just one single lens. This bachelor thesis examines the influence of plenoptic cameras on large German film productions. Therefore, it compares the theoretical base of plenoptic cameras with those of currently common camera systems. Furthermore, it empirically examines the importance of plenoptic cameras for film productions.

Für Mama und Papa

Danke für eure Geduld, eure Anregungen, euer Interesse und besonders für eure Hilfsbereitschaft und Unterstützung, nicht nur bei meiner Bachelorarbeit.

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Geometrische Grundlagen	3
2.1. Perspektivische Geometrie	3
2.2. Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera	4
3. Optische Grundlagen	7
3.1. Welle-Teilchen-Dualismus	7
3.2. Strahlenoptik	8
3.2.1. Reflexion und Remission	8
3.2.2. Absorption und Emission	9
3.2.3. Streuung	9
3.2.4. Photoelektrischer Effekt	10
3.3. Wellenoptik	10
3.3.1. Polarisation	10
3.3.2. Interferenz	11
3.3.3. Brechung	11
3.3.4. Dispersion	12
3.3.5. Beugung/Diffraktion	13
4. Kamerasysteme	15
4.1. Der Aufbau von Kamerasystemen	15
4.2. Eigenschaften elektrischer Kameraelemente	16
4.2.1. Bildwandler	16
4.2.2. Rauschen	18
4.2.3. Rauschempfindlichkeit von Kamerasystemen	19
4.3. Eigenschaften optischer Kameraelemente	21
4.3.1. Objektive	22
4.3.2. Abbildungsfehler	25
4.4. Stereoskopie	28
4.4.1. Stereoskopische Kamerasysteme	28
4.4.2. Stereoskopische Wiedergabesysteme	30

4.4.3. Störeffekte und Artefakte	32
5. Lichtfeldkameras	35
5.1. Grundlagen der Plenoptik	35
5.1.1. Plenoptische Funktion	35
5.1.2. Das 4D-Lichtfeld	37
5.2. Aufbau der Lichtfeldkameras	38
5.3. Verarbeitung und Eigenschaften von Lichtfeldaufnahmen	40
5.3.1. Blende	41
5.3.2. Auflösung	42
5.3.3. Datenverarbeitung	42
5.3.4. Schärfe und Refokussierung	42
5.3.5. Rauschverhalten	43
5.3.6. Abbildungsfehler	43
5.3.7. Stereoskopie	44
6. Empirische Untersuchung	47
6.1. Fragestellung und methodische Vorgehensweise	47
6.2. Durchführung	47
6.2.1. Fragebogenkonstruktion	48
6.2.2. Durchführung der Umfrage	49
6.3. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse	49
6.3.1. Datenaufbereitung	49
6.3.2. Stichprobe	50
6.3.3. Ergebnisdarstellung	51
7. Reflexion	61
8. Fazit	63
9. Ausblick	65
A. Anhang	67
A.1. Übersicht	68
A.2. Fragen	69
A.3. Antworten	79

1. Einleitung

Der Film ist heute kaum noch aus den Unterhaltungsmedien wegzudenken. Die Einnahmen aus Film und Fernsehen betragen im Jahr 2020 allein in Deutschland voraussichtlich rund 4,9 Mrd. Euro. [Sta17] Die Kamerasysteme sind dabei die wichtigsten Werkzeuge der Filmschaffenden. Sie unterstützen den kreativen Prozess in der Kinematografie und nehmen wesentlichen Einfluss auf die Bildwirkung. Die Wahl der „richtigen Kamera“ ist dabei ein kontrovers diskutiertes Thema.

Betrachtet man den Kameramarkt, dann fällt immer häufiger der Begriff der Lichtfeldkamera. Mit Innovationen wie der nachträglichen Fokussierung oder dem 3D-Filmen in einer Kamera verspricht die Lichtfeldtechnik eine neue Epoche derameratechnik einzuleiten.

In dieser Arbeit wird die Lichtfeldkamera genauer betrachtet. Die Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen empirischen Teil. Im theoretischen Teil wird zunächst auf die Grundlagen der Geometrie und Optik eingegangen. Anschließend werden die heute gängigen Kamerasysteme erklärt und mit den Lichtfeldkameras verglichen. Die Forschungsfrage für diesen Teil lautet:

„Wie unterscheiden sich Lichtfeldkameras von gängigen Kamerasystemen?“

Im empirischen Teil wird auf die Anforderungen von Filmproduktionen an ihre Kameras eingegangen. Dazu werden Experten im Bereich derameratechnik in einer quantitativen Umfrage befragt. Für den zweiten Teil lautet die Forschungsfrage:

„Welche Anforderungen haben Filmproduktionen an die aktuelle Kamera- und Lichtfeldtechnik?“

Das Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss von Lichtfeldkameras auf große deutsche Filmproduktionen zu überprüfen. Die übergeordnete Forschungsfrage der Arbeit lautet:

„Wie nehmen Lichtfeldkameras technischen Einfluss auf die zukünftige Kinematografie bei großen Filmproduktionen in Deutschland?“

2. Geometrische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die geometrischen Grundlagen für Kamerasysteme und die Plenoptik eingegangen. Dazu wird zunächst der Ursprung der perspektivischen Geometrie betrachtet und anschließend die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera erklärt.

2.1. Perspektivische Geometrie

Eine grundlegende geometrische Frage für Kamerasysteme und für die Plenoptik ist, wie sich die dreidimensionale Welt korrekt in einer zweidimensionalen Darstellung abbilden lässt. Bereits 1410 finden sich in Aufzeichnungen des Architekten Brunelleschi perspektivische Zeichnungen der Piazza S. Giovanni und der Piazza della Signoria wieder. Brunelleschi wird als der Begründer der Zentralperspektive bezeichnet [Sch05, S. 9–10]. Die perspektivische Projektion einer dreidimensionalen Szene auf eine zweidimensionale Bildebene bildet bis heute die Grundlage von Kamerasystemen in der Filmproduktion.

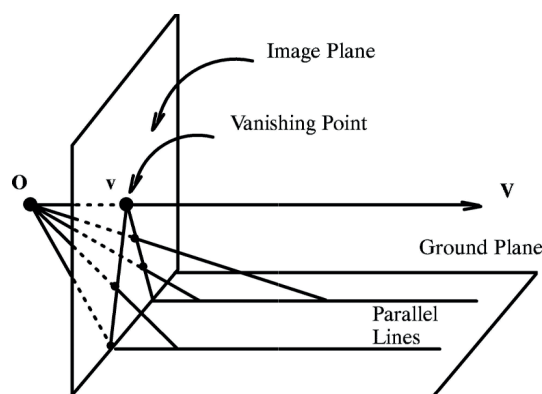


Abbildung 2.1.: Eine zweidimensionale Darstellung der perspektivischen Betrachtung, zur Darstellung des Fluchtpunktes [MZ92, S. 469]

Das Ziel der perspektivischen Darstellung ist es, einem Bild einen realistischen Eindruck von Tiefe auf einer zweidimensionalen Oberfläche zu vermitteln. In Abbildung 2.1 ist eine einfache Darstellung der Zentralperspektive abgebildet. Die Darstellung

zeigt zwei parallele Linien auf einer Grundebene im dreidimensionalen Raum. Der Punkt O zeigt den idealen Blickpunkt des Betrachters. Aus dem Vektor $\vec{OV}$ zwischen dem Blickpunkt O und dem Horizont V ergibt sich ein Schnittpunkt auf der Bildebene. Dieser Schnittpunkt wird als Fluchtpunkt v bezeichnet [MZ92, S. 468–469]. Betrachten wir die Sehstrahlen zwischen dem Blickpunkt des Betrachters und den parallelen Linien im Raum auf der vertikalen Ebene, dann zeigen sich in den Schnittpunkten der Bildebene die Eigenschaften der Fluchtpunktperspektive [Sch05, S. 9–11]. Die wesentliche Eigenschaft der Fluchtpunktperspektive liegt darin, dass parallele Linien im Raum in der zweidimensionalen Projektion auf den Schnittpunkt zulaufen.

2.2. Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera

Die Projektion einer räumlichen Szene auf eine Bildfläche in einer Kamera oder im menschlichen Auge lässt sich vereinfacht mit Hilfe einer „camera obscura“ darstellen (deu. Lochkamera). Die „camera obscura“ wurde erstmals von Aristoteles 384–322 v. Chr. in der Apokryphenschrift „Problemata physica“ beschrieben. Leonardo Da Vinci erforschte später ihren Strahlengang und war der Erste, der den Grund der Darstellung richtig deutete.

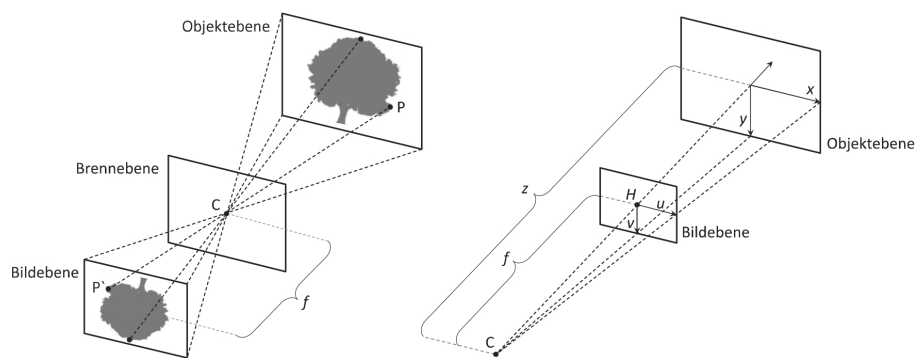


Abbildung 2.2.: Projektion einer räumlichen Szene auf eine zweidimensionale Bildebene. [Gru12, S. 5]

Die wesentliche Erkenntnis liegt darin, dass alle Punkte P im Raum über ein optisches Zentrum C als Bildpunkte P' auf die Bildebene projiziert werden können (vgl. Abbildung 2.2). Die Bildebene lässt sich vereinfacht als Äquivalent zu der Sensormatrix heutiger Kameras beschreiben. Der Brennpunkt C der Brennebene beschreibt vereinfacht die Blendenöffnung bei heutigen Kameras. Der Abstand zwischen der

2.2. Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera

Bildebene und dem optischen Zentrum C beschreibt die Brennweite f der Lochkamera [Gru12, S. 4 ff.]. Es gilt: „Eine idealisierte Lochkamera besteht aus einer Blende mit einem infinitesimal kleinen Loch und einer parallel dazu angeordneten Bildebene“ [BLF16, S. 121]. Die Projektion auf der Bildebene ist dabei punktgespiegelt durch das optische Zentrum C zu der 3D-Szene. Es ergibt sich demnach ein sowohl horizontal als auch vertikal gespiegeltes Abbild der Szene [Gru12, S. 4 ff.]. Das Abbild entspricht bei einer idealen Lochkamera dem exakten, jedoch je nach Betrachtungsabstand und Brennweite skalierten, gespiegelten Abbild der Szenerie. Da moderne Kameras jedoch nicht dem Modell der idealen Lochkamera entsprechen, lassen sich bei der heutigen Kameratechnik verschiedene Phänomene feststellen. Um diese Phänomene zu erläutern, betrachten wir zunächst die optischen Grundlagen für heutige Kamerasysteme.

3. Optische Grundlagen

Das Kapitel Optische Grundlagen setzt sich mit den physikalischen Grundlagen für heutige Kamerasysteme auseinander. Die Optik bildet das Fundament für eine korrekte Abbildung der dreidimensionalen Szene auf die zweidimensionale Bildebene. Darüber hinaus bildet sie die Voraussetzung für die Plenoptik und damit die Lichtfeldkameras im Allgemeinen.

3.1. Welle-Teilchen-Dualismus

Licht beschreibt den für das menschliche Auge sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Die Farbe des Lichts entspricht dabei seiner Wellenlänge und liegt etwa im Wellenlängenbereich zwischen 380nm (violetteres Licht) bis 760nm (rotes Licht) [BSS17, S. 45]. Die Wellenlänge des Lichts beschreibt den Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Phasen. Abbildung 3.1 zeigt den Farbverlauf im sichtbaren Spektrum. Die Amplitude der Welle beschreibt die Helligkeit des Lichts. [BSS17, S. 47]

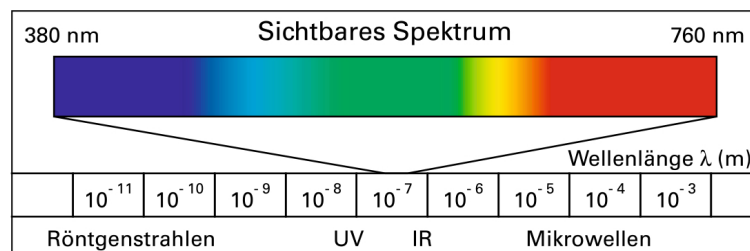


Abbildung 3.1.: Der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums [BSS17, S. 45]

In der Optik kann Licht den Wellen oder den Teilchen zugeordnet werden. Man spricht vom Welle-Teilchen-Dualismus. [BSS17, S. 45] Je nachdem in welcher Form wir das Licht betrachten, können wir verschiedene Charakteristika von Licht erklären. Betrachten wir Licht als Welle, dann lassen sich Ausbreitungs-, Beugungs- und Interferenzerscheinungen beschreiben. Um Emissions- und Absorptionserscheinungen beschreiben zu können, müssen wir das Licht jedoch als Teilchenstrahl bestehend

3. Optische Grundlagen

aus Photonen verstehen. [BSS17, S. 45] Im Folgenden werden die für die Plenoptik undameratechnik nötigen Charakteristika beschrieben.

3.2. Strahlenoptik

In der Strahlenoptik wird die Ausbreitung des Lichts durch Lichtstrahlen beschrieben. 1921 erklärte Albert Einstein, dass die Lichtenergie quantisiert sei, also in kleinen Lichtquanten auftritt, die auch als Photonen bezeichnet werden. Ein Lichtstrahl ist demnach eine Menge an Lichtteilchen. [TMW15, S. 1163] Durch Photonen lassen sich diverse Phänomene der Strahlenoptik beschreiben.

3.2.1. Reflexion und Remission

Bei dem Auftreffen eines Lichtstrahls auf eine Fläche wird ein Teil des Lichts zurückgestrahlt. Die Art der Rückstrahlung ist abhängig von der Oberflächenstruktur der Fläche. Die Reflexion beschreibt eine gerichtete Rückstrahlung des Lichts. Nach dem Reflexionsgesetz ist der Einfallswinkel zum Normalenvektor der Ebene gleich dem Ausfallswinkel zum Normalenvektor der Ebene. [BSS17, S. 49] Abbildung 3.2 zeigt diese Gesetzmäßigkeit.

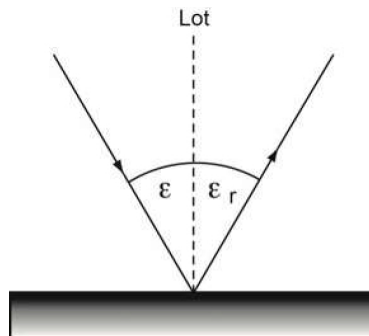


Abbildung 3.2.: Winkel bei der Lichtreflexion [Löf12, S. 3]

Bei der diffusen Rückstrahlung des Lichts spricht man von der Remission. [Sch13, S. 18] Die Ursache für die Remission liegt dabei in der ungeordneten Oberflächenstruktur. An einer rauen Oberfläche werden die Photonen in alle Richtungen in den Raum reflektiert. Generell gilt für die Reflexion und Remission:

„ Je glatter die Oberfläche ist, desto höher ist der reflektierte Anteil.“
[BSS17, S. 49]

3.2.2. Absorption und Emission

Bei einer Oberfläche wird neben dem reflektierten Anteil ein Teil der Lichtenergie absorbiert. Die Absorption tritt in Atomen durch die Aufnahme eines Photons durch Elektronen auf. Dabei springen die Elektronen innerhalb des Atoms auf ein höheres Energieniveau in der Atomhülle. [Cam06, S. 113–114] Die Atome gehen dabei in einen angeregten Zustand über. [RS19, S. 7] Abbildung 3.3 zeigt dieses Phänomen.

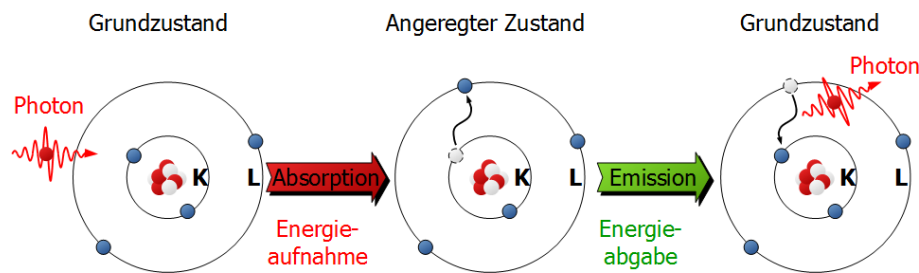


Abbildung 3.3.: Winkel bei der Lichtreflexion [Höf20]

Bei der Rückreaktion vom angeregten Zustand des Atoms in den Grundzustand durch die Abgabe von Photonen sprechen wir von der Emission. Bei der Emission werden die Photonen in beliebiger Raumrichtung emittiert. Dadurch nehmen wir die Emission als Streuung wahr. [RS19, S. 7] Die Wellenlänge des emittierten Lichts hängt dabei von dem Energieniveau des Elektronen ab. Je energiereicher der Übergang des Elektrons ist, desto kurzwelliger wird das Licht emittiert. [BSS17, S. 45]

3.2.3. Streuung

Die Richtungsänderung von Licht auf Grundlage der Ablenkung an einer Struktur eines Mediums wird als Streuung bezeichnet. [BSS17, S. 50] Die Streuung von Licht tritt bei Stoffen durch eine Wechselwirkung des Lichts mit den Atomen oder Molekülen auf. Ein Beispiel für die Streuung von Licht liegt in der Streuung des Sonnenlichts in der Atmosphäre. Durch die Atmosphäre wird der kurzwellige Anteil des Lichts stärker gestreut als die langwelligen Anteile. Bei einer direkten Einstrahlung am Tag dominiert durch den kurzen Weg durch die Atmosphäre der kurzwellige Anteil. Der Himmel wirkt deshalb blau. Am Abend dominiert der langwelligere Anteil des Lichts, da der Weg durch die Atmosphäre durch den veränderten Einfallswinkel in die Atmosphäre sich verlängert. Der Abendhimmel wirkt deshalb rötlicher. [BSS17, S. 50]

3.2.4. Photoelektrischer Effekt

Der Photoelektrische Effekt beschreibt eine Wechselwirkung zwischen den Photonen des Lichts und den Elektronen im Halbleitermaterial. Bei der Wechselwirkung werden Elektronen durch Photonen in Abhängigkeit von ihrer Frequenz beeinflusst.[SK15, S. 255] Die Emission von Elektronen aus einem Atom wird als äußerer Photoeffekt bezeichnet. (Siehe Kapitel 3.2.2: Absorption und Emission) Die Wechselwirkung des Photons emittiert dabei das Elektron aus dem Atom. Als Reaktionsprodukt ergibt sich ein ionisiertes Atom und ein freies Elektron. [Jäh12, S. 188] Neben dem äußeren Photoeffekt gibt es auch den inneren Photoeffekt. Der innere Photoeffekt tritt an Halbleitern auf. Durch die Absorption eines Photons wird ein gebundenes Elektron über eine Bandlücke in einen höheren energetischen Zustand im Leitungsband angeregt. [SK15, S. 255] Dadurch entstehen ungebundene Elektronen/Loch-Paare, die die Leitfähigkeit des Halbleiters erhöhen. [Löf12, S. 39] Der Photoelektrische Effekt bildet die Grundlage für die Lichtdetektion heutiger Kamerasensoren.

3.3. Wellenoptik

In der Wellenoptik wird die Ausbreitung des Lichts durch elektromagnetische Wellen beschrieben. [RS19, S. 240] Durch die elektromagnetischen Wellen lassen sich verschiedene Phänomene beschreiben, die wir mit der Strahlenoptik nicht erklären können. Im Folgenden werden die relevanten Phänomene für die Kameratechnik und Plenoptik beschrieben.

3.3.1. Polarisation

Bei elektromagnetischen Wellen handelt es sich um transversale Wellen. [RS19, S. 375] Der Winkel, in dem die Welle im Raum steht, kann dabei variieren. Bei einer variablen Ausrichtung der Welle im Raum, wie es beispielsweise von der Sonne emittiert wird, spricht man von unpolarisiertem Licht. Demnach beschreibt die Polarisation die Ausrichtung der Schwingung im Raum. [Löf12, S. 55]

Polarisiertes Licht kann als lineare und zirkuläre Polarisation auftreten. Bei der linearen Polarisation schwingt die Welle senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Die zirkuläre Polarisation kann über zwei senkrecht zueinander stehenden Wellen mit einer 90 Grad Phasenverschiebung erzeugt werden. Eine zirkular polarisierte Lichtwelle breitet sich kreisförmig auf einer Ebene aus, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts steht. [RS19, S. 377]

Eine Form der Polarisation ist der Dichroismus. Als Dichroismus bezeichnet man eine selektive Absorption. Dadurch werden mit Hilfe des Polarisators, selektiv die elektromagnetischen Wellen absorbiert, die außerhalb einer bestimmten Ausbreitungsrichtung schwingen. [Löf12, S. 57] Moderne Kamera-Polfilter verwenden dieses Verfahren. Abbildung 3.4 zeigt die lineare Polarisation von Licht.

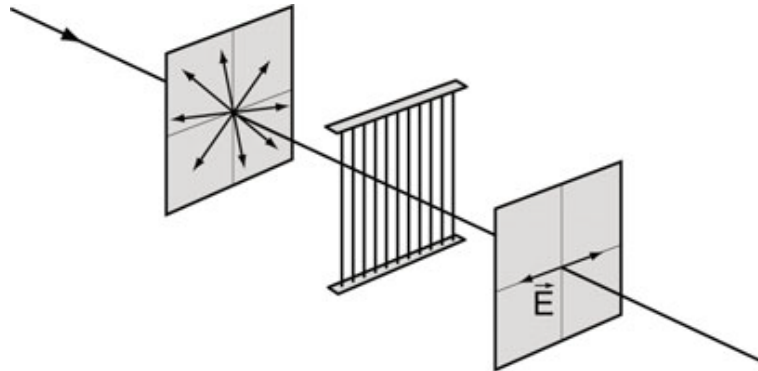


Abbildung 3.4.: Lineare Polarisation einer Welle [Löf12, S. 57]

3.3.2. Interferenz

Die Interferenz beschreibt die Überlagerung von Wellen nach dem Superpositionsprinzip. Die Überlagerung der Wellen ist demnach ungestört. Bei der Überlagerung kommt es zu einer Veränderung der Amplitude. Dabei kann es je nach Phasenlänge der Wellen zur Auslöschung der Amplitude oder zur Verstärkung der Amplitude kommen. [RS19, S. 240] Bei der gegenseitigen Auslöschung spricht man von destruktiver Interferenz, bei der gegenseitigen Verstärkung spricht man von konstruktiver Interferenz. [BSS17, S. 48]

3.3.3. Brechung

Neben den, in den Kapiteln Reflexion und Remission (3.2.1), sowie Absorption und Emission (3.2.2) beschriebenen Phänomenen zur Wechselwirkung zwischen Photonen an Oberflächen, können wir in der Wellenoptik die Lichtbrechung beschreiben. Trifft Licht auf eine teildurchlässige Oberfläche, dann kommt es an der Grenzfläche zwischen den zwei Medien zu einem Lichteintritt. Dabei werden Teile des Lichts reflektiert, absorbiert und transmittiert. [Löf12, S. 4] Bei der Transmission von Licht kommt es zu einer Richtungsänderung des Lichts bei Übertritt zwischen zwei unterschiedlich dichten Medien.

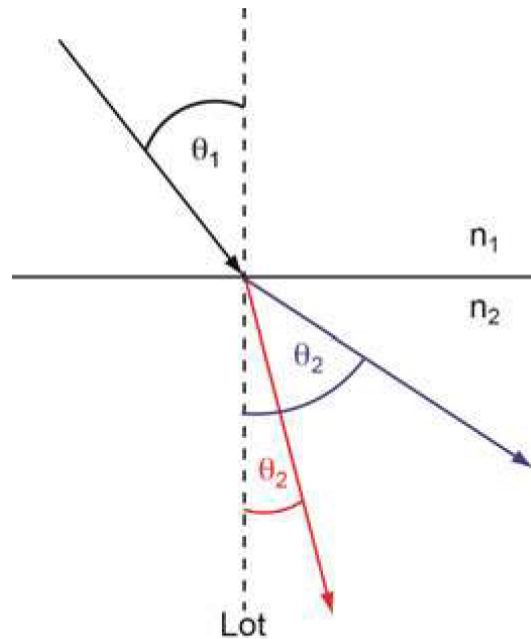


Abbildung 3.5.: Brechung an der Grenzfläche zwischen zwei Medien. [Löf12, S. 6]

Die Ursache der Richtungsänderung liegt in der Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem anderen Medium. [Löf12, S. 5–6] Je dichter ein optisches Medium ist, desto langsamer bewegt sich das Licht in diesem. Bei einer Brechung des Lichts von einem optisch dichteren zum optisch dünneren Medium wird der Strahl vom Lot weg gebrochen. Bei einer Brechung des Lichts von einem optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres wird der Strahl zum Lot hin gebrochen. [Ped+05, S. 48]. Abbildung 3.5 zeigt die Brechung in ein optisch dichteres (rot) und optisch dünneres Medium (blau).

3.3.4. Dispersion

Wie in Kapitel Welle-Teilchen-Dualismus (3.1) bereits beschrieben, besteht Licht aus verschiedenen Wellenlängen. In dem Kapitel Brechung (3.3.3) haben wir darüber hinaus festgestellt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts durch das Medium, in dem es sich befindet, beeinflusst wird. Neben der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit zum Medium gibt es eine Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Wellenlänge des Lichts. Diese Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu der Wellenlänge des Lichts sorgt für eine wellenlängenabhängige Brechzahl. Diese Abhängigkeit wird als Dispersion bezeichnet. [RS19, S. 44]

Abbildung 3.6 zeigt die Dispersion des Lichtes an einer Linse. Bei der Dispersion gilt, je kürzer die Wellenlänge ist, desto höher ist ihre Brechzahl.

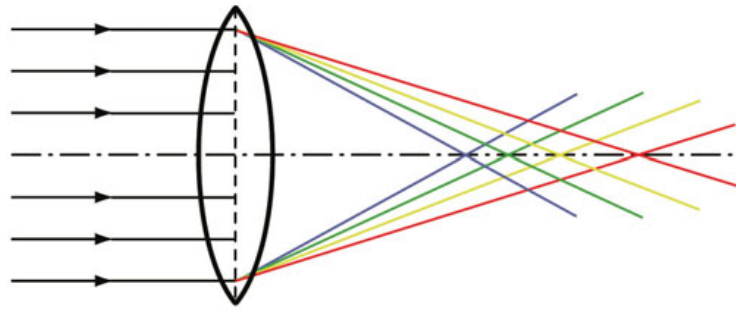


Abbildung 3.6.: Die Dispersion von Licht an einer Linse [Löf12, S. 66]

3.3.5. Beugung/Diffraktion

Als Beugung wird die Abweichung von einer geradlinig verlaufenden Ausbreitung von Licht bezeichnet, die an Kanten von Hindernissen auftritt. [Ped+05, S. 42] Beugung zeigt sich dahin gehend, dass sich das Licht hinter einem Hindernis auch in die Schattenräume ausbreitet. Dieses Verhalten kann nur über eine wellenförmige Ausbreitung des Lichts erklärt werden. Die Beugung des Lichts wird durch die Überlagerungen von Lichtwellen verursacht. [RS19, S. 302] Grundsätzlich lassen sich zwei Formen der Beugung unterscheiden. Sie sind abhängig davon, wie das Licht auf das Hindernis auftrifft. Abbildung 3.7 zeigt eine schematische Darstellung der Fraunhofer-Beugung (links) und der Fresnel-Beugung (rechts).

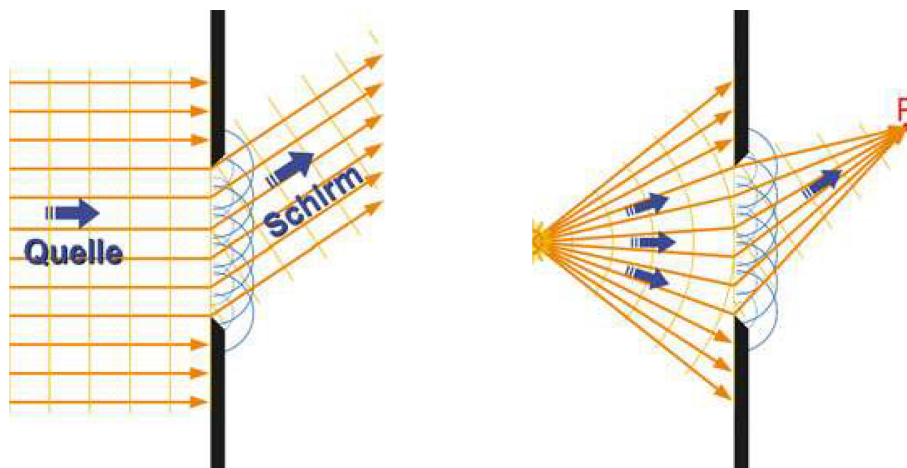


Abbildung 3.7.: Schematische Darstellung der Fraunhofer-Beugung (links) und Fresnel-Beugung (rechts) [RS19, S. 303]

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Beugungen liegt in der Form der Wellenfront. Die Fraunhofer-Beugung resultiert aus einer gleichmäßigen parallelen Beleuchtung, während die Fresnel-Beugung aus einer Punktbeleuchtung resultiert. [RS19, S. 303] Für eine detaillierte Beschreibung der Beugungsformen sei an dieser

3. Optische Grundlagen

Stelle auf folgende Literatur verwiesen: [RS19], [BSS17], [Sch13]

Grundsätzlich lässt sich die Beugung auf das Huygens'sche Prinzip zurückführen. Nach dem Huygens'schen Prinzip kann jede Lichtwelle als Ausgangspunkt für neue Elementarwellen angesehen werden. [RS19, S. 304] Abbildung 3.8 zeigt die Ausbreitung einer Wellenfront (rot). Die grüne Wellenfront in der Mitte zeigt eine Wellenfront, die aus der Überlagerungen der Wellen resultiert.

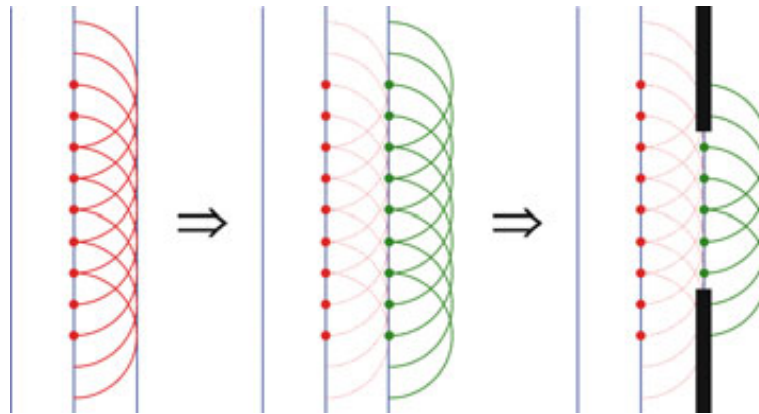


Abbildung 3.8.: Das Huygen'sche Prinzip [RS19, S. 304]

Am Spalt kommt es bei der Überlagerung des Lichts zur wellenförmigen Ausbreitung hinter dem Spalt. Dieses Phänomen beschreibt die Beugung am Spalt.

Die Beugung an einer Lochblende spielt in derameratechnik eine wichtige Rolle. Wie bei der Beugung am Spalt, kommt es bei sehr kleinen Blendenöffnungen zu Beugungseffekten an der Lochblende. [Sch13, S. 388] Diese Beugungseffekte tragen zur Unschärfefeldung von Kameras bei.

4. Kamerasysteme

In diesem Kapitel wird auf die grundlegende Funktionsweise heutiger Kameratechnik eingegangen. Dazu betrachten wir die Eigenschaften der elektrischen und optischen Kameraelemente. Darüber hinaus werden das Rauschverhalten und die Abbildungsfehler von Kameras besprochen. Diese Eigenschaften dienen neben weiteren als Bewertungsbasis für die Qualität von Kamerasystemen. Anschließend wird auf die Stereoskopie eingegangen.

4.1. Der Aufbau von Kamerasystemen

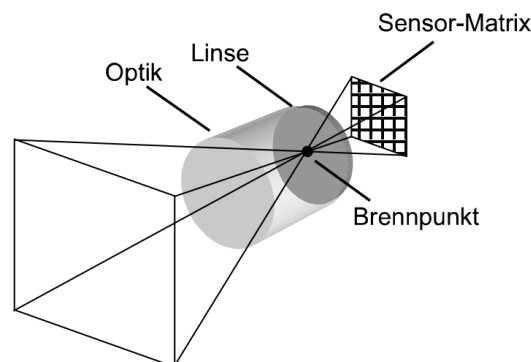


Abbildung 4.1.: Der prinzipielle Aufbau einer DSLM-Kamera [Sch05, S. 38]

Abbildung 4.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau heutiger Kamerasysteme. Grundsätzlich lässt sich in der Kameratechnik zwischen vier Kamerasystemen unterscheiden: Die Kompaktkamera, die Bridgekamera, die Systemkamera und die Spiegelreflexkamera [Böh+00, S. 116–118]. Da die Kamerasysteme in heutigen Filmproduktionen vorwiegend auf Systemkameras abgestimmt sind, wird im Folgenden nur auf die Funktionsweise der Systemkamera eingegangen. Die Grundlagen lassen sich jedoch auf die anderen Systeme übertragen.

Die Systemkamera besteht für gewöhnlich aus einem Kameragehäuse mit einem integrierten Bildsensor (Sensor-Matrix) und einem Objektiv. Im Kameragehäuse befinden sich in der Regel die meisten der elektrischen Bauteile der Kamera, während

das Objektiv die meisten optischen Bauteile vereint. Im Folgenden werden die mit der Lichtfeldkamera vergleichbaren optischen und elektrischen Kameraelemente und Charakteristika der Bauteile betrachtet.

4.2. Eigenschaften elektrischer Kameraelemente

Die elektrischen Bauteile von Kamerasystemen lassen sich mit der Bildebene der „camera obscura“ vereinfacht darstellen (siehe Kapitel 2.2: Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera). Das wesentliche Element der elektrischen Bauteile ist der Bildwandler.

4.2.1. Bildwandler

Bildwandler sind der Kernbaustein von Bildaufnahmesystemen und bilden die Schnittstelle zwischen den elektrischen und optischen Kameraelementen. Sie dienen der Umwandlung von optischen Abbildungen in ein speicherbares, elektronisches oder chemisches Abbild [Sch13, S. 353–355]. Um ein optisches Abbild einer 3D-Bildebene in ein 2D-Bild zu transformieren, muss das Licht zunächst in ein elektrisches Signal gewandelt werden und dann örtlich und zeitlich diskretisiert, quantisiert und schließlich gespeichert werden. [BLF16, S. 247–249] Es gilt:

„Ein System zur Digitalisierung von Bildern muss mithin in der Lage sein, das aufzunehmende Bild in einzelne Elemente (Pixel) örtlich aufzuteilen, diese einzeln anzusprechen (zu adressieren), eine Integration der Bestrahlungsstärke über eine definierte Zeitspanne vorzunehmen, den Bildwert an jedem Pixel zu messen, diesen zu quantisieren und in einen Speicher zu schreiben.“ [BLF16, S. 247]

Aktuelle Bildwandlersysteme erfüllen diese Eigenschaften. Grundsätzlich lassen sich drei Arten von Bildsensoren unterscheiden:

Punktsensoren können eine Aufnahme nur mit einem Lichtintensitätswert erfassen. Um aus dem Lichtintensitätswert ein zweidimensionales Bild zu erfassen, muss die Aufnahme flächenhaft gescannt werden. Ein Zeilensensor besteht aus einer Reihe von nebeneinander angeordneten Fotodetektoren bei der immer nur eine einzelne Reihe von Pixeln erfasst wird. Ein zweidimensionales Bild entsteht durch das Verschieben des Sensors und dem anschließenden Zusammensetzen des Gesamtbildes. Ein Flächensensor hat ein flächenmäßig aufgebautes Array aus Fotodetektoren. Die Anzahl der verbauten Fotodetektoren entspricht dabei der Pixelanzahl des resultierenden Bildes. Es können dabei alle Pixel zu einem festgelegten gleichen Zeitraum

belichtet werden. Aktuelle charge-coupled device (CCD)- und complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)-Chips zählen zu den Flächensensoren. [BLF16, S. 248–250]

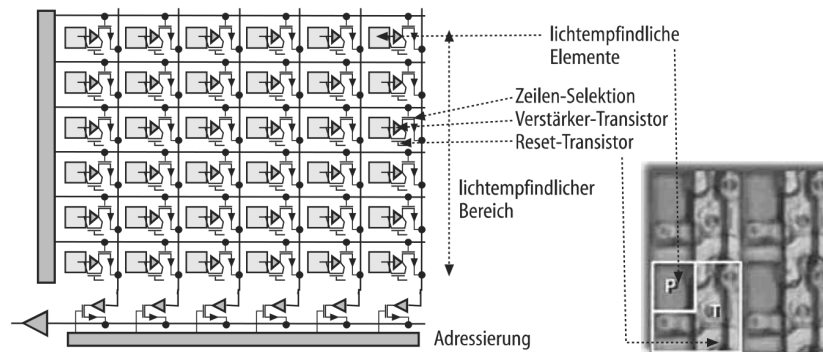


Abbildung 4.2.: Der Aufbau eines CMOS Sensors [Sch13, S. 369]

Die aktuellen CMOS-Chips sind in den meisten aktuellen Filmkameras wie der Arri Alexa XT, der RED Epic Dragon oder der Panaflex Millenium XL2 verbaut. Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau von CMOS-Sensoren. Sie bestehen aus einem Array, eng nebeneinander liegenden lichtempfindlichen Elementen (MOS-Photodioden). Die Anzahl der MOS-Photodioden bestimmt dabei die Auflösung. Photodioden sind Halbleiterbauteile, die es ermöglichen Lichtenergie in elektrische Energie umzuwandeln. Dies geschieht durch den photoelektrischen Effekt (siehe Kapitel 3.2.4: Photoelektrischer Effekt). Durch den photoelektrischen Effekt lässt sich die Lichtintensität der einfallenden Photonen in eine messbare elektrische Spannung transformieren. Um die elektrische Spannung messen zu können, müssen die Elektronen in der Photodiode über den Belichtungszeitraum gesammelt und anschließend ausgelesen werden. Die Funktionsweise einer Fotodiode wird anhand der Abbildung 4.3 deutlich:

Photodioden teilen sich auf in eine lichtdurchlässige Elektrodenschicht und eine Trägerschicht aus Halbleitermaterial (vgl. Abbildung 4.3). Hier wird n-dotiertes Halbleitermaterial verwendet. Wird an die Metallelektrode eine negative Spannung angelegt, so entsteht ein negatives Potential an der Elektrode. Dadurch wird das negativ dotierte Silizium aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung abgestoßen. Es bildet sich eine ladungsträgerfreie lichtdurchlässige Zone aus Siliziumoxid, die als Isolationsschicht agiert. Aufgrund des photoelektrischen Effekts lösen sich Elektronen aus dem Halbleitermaterial und hinterlassen positiv geladene Silizium-Ionen. Die Elektronen werden durch die Metallelektrode abgestoßen. Die Siliziumionen lagern sich an der Grenzfläche an. Die optische Information wird dadurch als elektrische Ladung messbar. [EE13, S. 380–382]

Betrachten wir Abbildung 4.2 rückblickend, dann wird die Messbarkeit der opti-

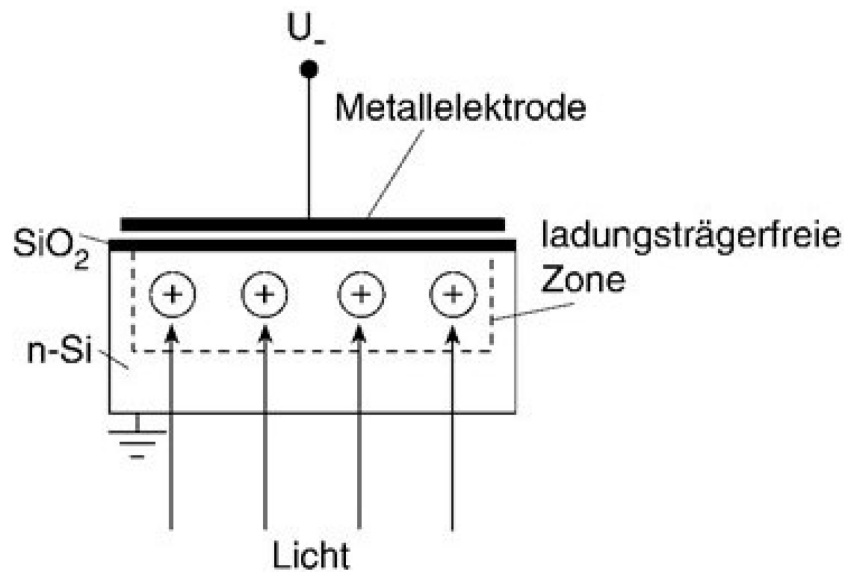


Abbildung 4.3.: Der Aufbau einer MOS-Photodiode [EE13, S. 382]

schen Information klar. Jede Photodiode ist mittels einer xy-Matrix elektrisch verbunden und das Signal kann mittels verschiedener Transistoren weiter verarbeitet werden. Bei den Pixeln handelt es sich um active pixel sensor (APS). Die APS sind im Gegensatz zu passive pixel sensor (PPS) von beispielsweise CCD-Sensoren über Transistorschaltungen an jedem einzelnen Pixel elektrisch angebunden. Die direkte Verbindung ermöglicht es, die Informationen am Pixel schnell und gezielt zu verarbeiten. Die Transistoren dienen der Adressierung der Pixel, der Ableitung der elektrischen Ladung und der Verstärkung des Signals. Eine direkte Verarbeitung des Signals ermöglicht ein besseres Signal-Rauschverhalten, da Rauscheffekte durch Eigenwiderstände der Signalleitungen reduziert werden können. [Sch13, S. 368–370]

4.2.2. Rauschen

In dem Frequenzband einer Kamera kommt es zu verschiedenen Rauschformen. Bei einem frequenzunabhängigen Rauschen sprechen wir von weißem Rauschen (white noise). Ein Rauschsignal, das mit der zunehmenden Frequenz abnimmt, wird als pinkes Rauschen (pink noise) bezeichnet. [KW16, S. 791–792] Wir können bei den CMOS-Sensoren zwischen den folgenden fundamentalen Rauschquellen unterscheiden:

- Thermisches Rauschen (TR)
- Schrotrauschen (SR)
- Funkelrauschen (FR)

Das TR tritt an Ohm'schen Widerständen aufgrund der statistischen Wärmebewegung der Ladungsträger auf. Dieser Effekt wird als Brown'sche Bewegung bezeichnet. [Sti15, S. 259–260] Aufgrund der kinetischen Energie der Ladungsträger kommt es zu einer Bewegungsschwankung. [KW16, S. 793] Die Bewegung der Ladungsträger verhält sich dabei proportional zur Temperatur. [Hup00, Anhang A, S. 1] Das Rauschsignal überlagert die Signalspannung des Bildsignals. Das TR tritt unabhängig von der angelegten Signalfrequenz auf und ist über das gesamte Spektrum verteilt. Daher handelt es sich hierbei um weißes Rauschen. [KW16, S. 793]

Das SR (engl. photon shot noise) tritt bei Sensoren an der Potentialbarriere auf (siehe Kapitel 4.2.1: Bildwandler). [Sti15, S. 259–266] Die Photonen-Absorption des Halbleiter-Materials ist ein Zufallsprozess. [Sch13, S. 373–374] Die angeregten Elektronen bewegen sich diskontinuierlich über die Potentialbarriere hinaus. Da dies kein gleichmäßiger Prozess ist, sondern ein stochastischer Prozess, kommt es zum SR. Die Spektralverteilung ist dabei konstant. Dadurch spiegelt sich das SR als weißes Rauschen in dem Bild wieder. [Sti15, S. 260–261] Am intensivsten tritt das SR in dunklen Umgebungen oder bei kurzen Belichtungszeiten auf. [Goo+12, S. 10]

Das FR entsteht in aktiven Bauteilen und Widerständen und ist auf die Verunreinigungen und Kristallgitterfehler in Leitern und Halbleitern zurückzuführen. Darüber hinaus kommt es an Sperrschichten zu Rekombinationsprozessen zwischen Halbleiterionen und freien Elektronen. [Sti15, S. 261] Das FR ist frequenzabhängig und nimmt mit zunehmender Frequenz ab. [KW16, S. 794–795] Der Rauschstrom ist also umgekehrt proportional zur Frequenz, weshalb das FR auch als $1/f$ -Rauschen bezeichnet wird. [Sti15, S. 261] Als frequenzabhängiges Rauschen fällt das $1/f$ -Rauschen in die Kategorie der pinken Rauschsignale.

4.2.3. Rauschempfindlichkeit von Kamerasystemen

Die Rauschempfindlichkeit einer Kamera ist ein wichtiges Merkmal für die Bildqualität. Die Grundlage für eine qualitative rauscharme Aufnahme ist ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SRV). Die Sichtbarkeitsgrenze für das Rauschen liegt bei 42dB. [Sch13, S. 374] Im Laufe des Aufnahmeprozesses treten verschiedene Rauschquellen auf, die das SRV beeinflussen. Abbildung 4.4 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Prozessablaufs einer Kamera.

Den größten Einfluss auf das Rauschverhalten hat die direkte Beleuchtung der 3D-Szene. Eine gut ausgeleuchtete Szene minimiert die benötigte Signalverstärkung durch den Verstärkertransistor am Sensor. Dadurch maximiert sich das SRV.

Neben der Beleuchtung der Szene spielt die Sensorempfindlichkeit eine wichtige Rolle. Die Sensorempfindlichkeit von CMOS-Sensoren wird über die Quantenausbeute

4. Kamerasysteme

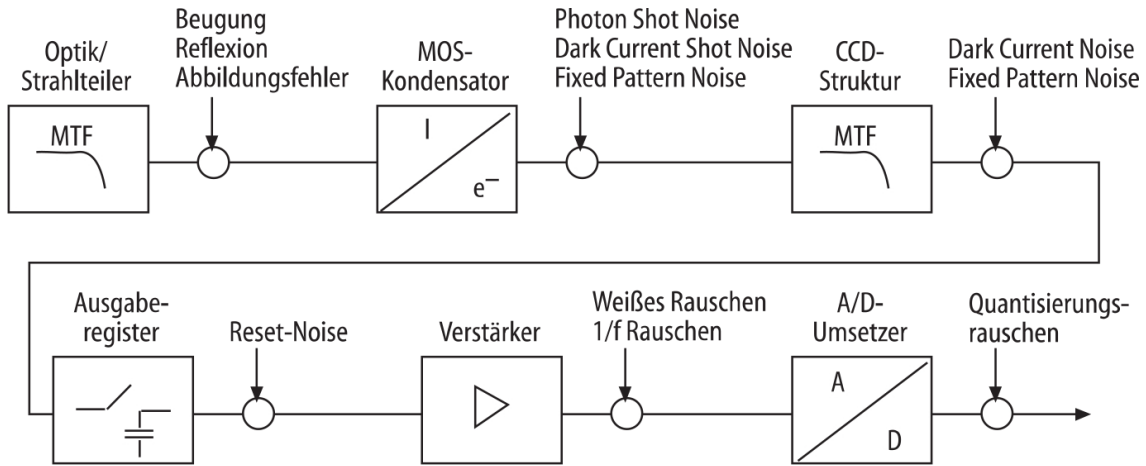


Abbildung 4.4.: Rauschquellen in einer Kamera [Sch13, S. 373]

bestimmt. Die Quantenausbeute gibt die Rate an, bei der ein Elektron durch Photonen beim Photoeffekt freigesetzt wird. [Sch13, S. 372] Je höher die Quantenausbeute eines Sensors ist, desto geringer darf die Beleuchtungsstärke der Szene sein, um den gleichen Signalpegel zu erhalten. Bei konstantem Signalpegel ist die Quantenausbeute also umgekehrt proportional zur Beleuchtungsstärke der Szene.

Auf dem Sensor treten verschiedene Rauscheffekte auf. Neben den in Kapitel 4.2.2 genannten Rauscharten tritt das fixed-pattern-noise auf. Da die Vielzahl an signalverarbeitenden Transistoren, mit denen die Lichtinformationen des Pixels verarbeitet werden, nicht völlig gleich gestaltet werden können, reagieren einige Pixel empfindlicher auf Helligkeitswerte als andere. [Sch13, S. 370] Das Rauschen tritt als Grundrauschen unabhängig von der Belichtungszeit der Pixel auf.

Das dark-current-shot-noise wird auch als Dunkelstromrauschen bezeichnet und wird in der Literatur als Stromfluss bezeichnet, der durch die Wärmebewegung der Ladungsträger im Sensor auftritt. [Sch13, S. 373] [Tia00, S. 9–11] [JFS11, S. 5] [Goo+12, S. 10] Dunkelstrom entsteht durch die spontane Bildung von freien Ladungsträgern durch Wärme in einem lichtempfindlichen Halbleiter, in unserem Fall in der MOS-Photodiode. Dunkelstromrauschen ähnelt dem thermischen Rauschen. Beides wird durch Wärmebewegung hervorgerufen. Der Unterschied besteht darin, dass thermisches Rauschen an Ohmschen Widerständen auftritt und Dunkelstromrauschen an Halbleitern.

Das Reset-Noise entsteht am Reset-Transistor durch die Pegelvariationen des Widerstandes durch eine thermische Veränderung. Diese Pegelvariationen resultieren in falschen Auslesezeitpunkten der Register. Dadurch kommt es zum Reset-Noise. [JFS11, S. 4]

Bei der Analog/Digital Umwandlung tritt das Quantisierungsrauschen auf. Dabei

handelt es sich um einen Quantisierungsfehler, der dadurch entsteht, dass bei der Speicherung abgetasteter diskreter Werte nur eine begrenzte Anzahl an Binärstellen zur Verfügung steht. Dadurch kann das ursprüngliche analoge Signal nicht mehr fehlerfrei rekonstruiert werden. Der Quantisierungsfehler ist durch eine erhöhte Bitrate minimierbar. [Wer19, S. 310] Eine Erhöhung der Bitrate kann demnach die Qualität der Quantisierung und damit die Qualität des Bildes verbessern.

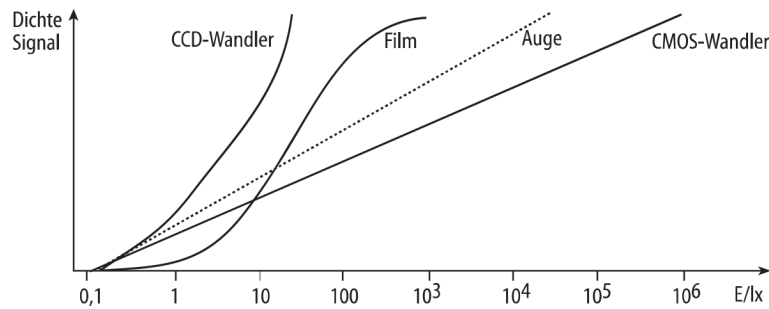


Abbildung 4.5.: Vergleich der erfassbaren Szenenkontraste [Sch13, S. 370]

Um den SRV zu maximieren ist der Szenenkontrast ein wichtiger Parameter. Der Szenenkontrast beschreibt den Dynamikbereich zwischen dem hellsten und dunkelsten Punkt eines Bildes, die von den Pixeln eines Sensors aufgezeichnet werden können. Der Dynamikbereich ist dabei nach oben durch die Maximalladung eines einzelnen Pixels und nach unten durch den Rauschteppich begrenzt. [Sch13, S. 374] Moderne CMOS-Sensoren verarbeiten das Signal direkt am Pixel. Dadurch können durch teillineares Auslesen der Pixel sowohl helle, als auch dunkle Bildbereiche erfasst werden, wodurch Szenenkontraste von über 90dB erreicht werden. [Sch13, S. 370, 374] Abbildung 4.5 zeigt, dass moderne CMOS-Sensoren die Fähigkeiten des Auges übersteigen.

4.3. Eigenschaften optischer Kameraelemente

Die optischen Bauteile von Kamerasystemen lassen sich mit der Brennebene der „camera obscura“ vergleichen (siehe Kapitel 2.2: Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera). Das wesentliche Element der optischen Bauteile sind die Objektive. In diesem Teil wird auf das Objektiv im allgemeinen und auf die Abbildungsfehler als ein Qualitätsmerkmal für Kameras im speziellen eingegangen.

4.3.1. Objektive

Das Kameraobjektiv ist ein wesentliches filmerisches Gestaltungsmittel. Es besteht aus einem Linsensystem, welches die optische Abbildung der Szene auf den Bildwandler der Kamera reguliert. Das Ziel ist es, das Licht einer Szene möglichst fehlerfrei abzubilden. Dafür bedarf es meist komplexer Linsensysteme, um die weitgehend fehlerfreie Abbildung zu gewährleisten.

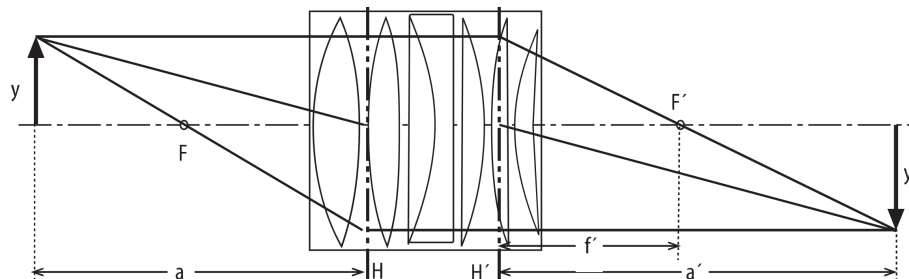


Abbildung 4.6.: Linsensystem zur Abbildung der Szene auf den Bildwandler [Sch13, S. 386]

Abbildung 4.6 zeigt ein beispielhaftes Linsensystem zur Projizierung der Szene auf ein optisches Zentrum. Hochwertige Objektive enthalten viele Linsen, um die Abbildungsfehler durch Dispersion, Brechungs- sowie Beugungseffekte zu minimieren (siehe Kapitel 3.3.4: Dispersion, Kapitel 3.3.3: Brechung und Kapitel 3.3.5: Beugung/Diffraktion) [Sch13, S. 384–387]. Eine genauere Betrachtung dieser Phänomene findet sich in Kapitel 4.3.2. Linsensysteme in Objektiven regulieren die Fokussierung und die Brennweite der dargestellten Szene, sowie die Qualität der Abbildung auf den Sensor. Über die in Objektiven eingebaute Blende wird darüber hinaus der Lichteinfall auf den Bildsensor reguliert.

Brennweite

Die Brennweite f ist definiert durch den Abstand der Brennebene zu der Linse. Die Brennebene beschreibt die Ebene des Brennpunkts F . Der Brennpunkt liegt auf dem Punkt, auf dem sich alle Lichtstrahlen kreuzen. [Har06, S. 251] Aufgrund der hohen Linsenanzahl in heutigen Objektiven ist die Berechnung der Gesamtbrennweite für ein Objektiv schwierig. Aus diesem Grund wird die Brennweite in die objektseitige Hauptebene (H) und bildseitige Hauptebene (H') eingeteilt. [Sch13, S. 384–386]

Durch die Brennweite des Objektivs werden verschiedene Parameter festgelegt. Die Brennweite beeinflusst durch den Bildwinkel die dargestellte Szene. [BSS17, S. 35] Je

kürzer die Brennweite ist (Weitwinkelobjektiv), desto weitwinkliger ist der Bildwinkel und desto kleiner wird der Abbildungsmaßstab zwischen der Abbildungsgröße des Objektes und der Größe des Originalobjekts. Im Umkehrschluss gilt, je länger die Brennweite ist (Teleobjektiv), desto flachwinkliger ist der Bildwinkel und desto größer wird der Abbildungsmaßstab zwischen der Abbildungsgröße des Objektes und der Größe des Originalobjekts.

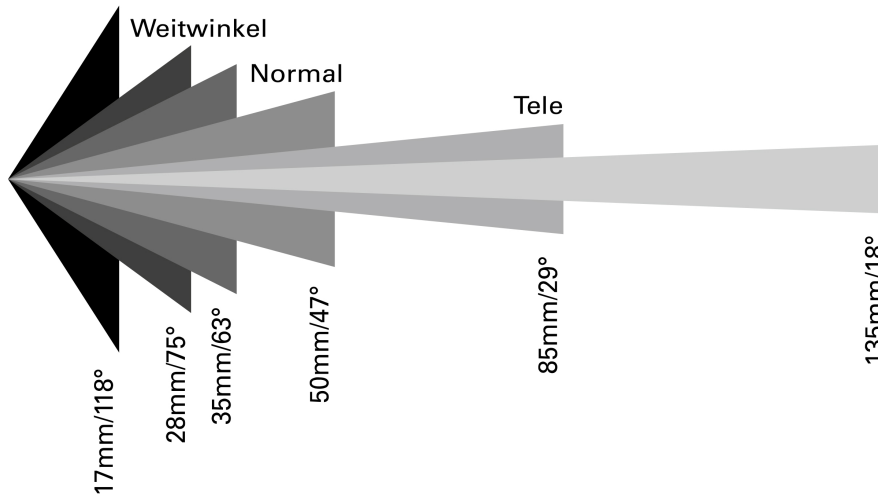


Abbildung 4.7.: Die Brennweiten von Objektiven mit ihren Bildwinkeln [BSS17, S. 36]

Abbildung 4.7 zeigt die verschiedenen Brennweiten der Objektive und ihre Bildwinkel. Neben dem Bildwinkel und dem Abbildungsmaßstab hat die Brennweite darüber hinaus auch Einfluss auf den Schärfetiefenbereich der Szene.

Blende

Die Blende ist ein optisches Bauteil, das mechanisch den Lichteinfall auf den Sensor reguliert. Die Helligkeit des Bildes wird durch die sogenannte Aperturblende bestimmt. [Ped+05, S. 148] Je stärker die Blende geöffnet ist, desto mehr Licht kann auf den Sensor fallen. Die Größe der Öffnung wird durch die Blendenzahl angegeben. Als F-Stop wird dabei die Blendenzahl bezeichnet, die von der Einstellung der Blende im Objektiv abhängig ist. Als T-Stop bezeichnet man die lichttechnisch gemessenen Werte im Objektiv. Die Bezeichnung T-Stop ist deshalb genauer, da die Transmissionsverluste durch beispielsweise Reflexionen der Linsen im Objektiv berücksichtigt werden. [Sch13, S. 387–388]

Die Blende ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität der Abbildung auf dem Sensor. Bei einer hohen Blendenzahl, also einer stark geschlossenen Blende, treten vermehrt Beugungseffekte auf, die die Schärfe der Abbildung beeinträchtigen.

4. Kamerasysteme

Bei einer niedrigen Blendenzahl, also einer stark geöffneten Blende, treten hingegen Vignettierungseffekte auf. Die Vignettierung beschreibt einen Helligkeitsabfall in den Randbereichen des Objektivs. Darüber hinaus werden sphärische Aberrationen stärker sichtbar und es kommt zur verstärkten Bildfeldwölbung (siehe Kapitel 4.3.2: Bildfeldwölbung). [Sch13, S. 387–388]

Darüber hinaus nimmt die Blende neben dem Abbildungsmaßstab unmittelbar Einfluss auf die Schärfentiefe. [Goc12, S. 23]

Schärfe

Die Schärfe eines Bildes ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal für die exakte Darstellung der Szene. Um eine exakte Abbildung der Szene zu erhalten, gehört eine gute Fokussierung zu den wichtigsten Qualitätskriterien.

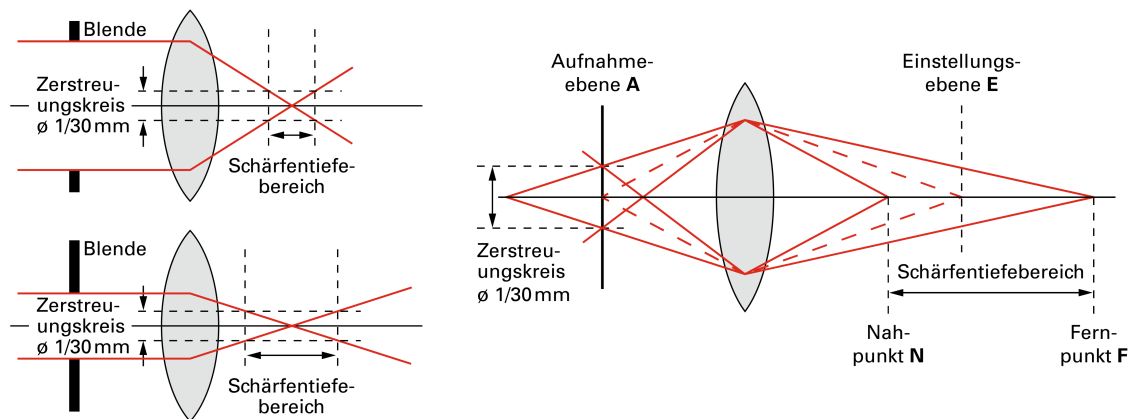


Abbildung 4.8.: Die Schärfentiefe bei Kameraobjektiven [BSS17, S. 38]

Abbildung 4.8 zeigt die Schärfentiefe bei Kameraobjektiven als Grundlage für die Fokussierung. Die Schärfentiefe beschreibt den Bereich einer Abbildung, der für das menschliche Auge scharf dargestellt ist. Das menschliche Auge sieht, je nach Alter der Person, durchschnittlich Flächen bis zu einem Durchmesser von 1/30 mm aus einer Sehtfernung von bis zu 30 cm scharf. Der Zerstreuungskreis beschreibt den Bereich, in dem der Lichtkegel einen Durchmesser von unter 1/30 mm erreicht. [BSS17, S. 37] Die Punkte im Raum, die gerade noch scharf erkannt werden können, wo also der Lichtkegel noch innerhalb des Zerstreuungskeises liegt, werden als Nahpunkt und Fernpunkt bezeichnet (siehe Abbildung 4.8). [BSS17, S. 37] Der Fokuspunkt liegt auf der Einstellungsebene an dem Ort, an dem der Lichtkegel die optische Achse schneidet.

Abbildung 4.8 (links) zeigt den Einfluss der Blende auf den Schärfentiefebereich. Je offener die Blende ist, desto kürzer ist der Schärfentiefebereich. Die Ursache

dafür liegt in den Brecheigenschaften der Linse. Je weiter außen das Licht eine konvexe Linse durchläuft, desto stärker wird das Licht gebrochen. Mit dem daraus resultierenden höheren Brechwinkel verschiebt sich der Nah- und Fernpunkt näher zum Fokuspunkt. Dadurch sinkt der Schärfentiefebereich.

Neben der Blende beeinflusst der Abbildungsmaßstab den Schärfentiefebereich. Der Abbildungsmaßstab lässt sich durch die Brennweite und den Abstand zum Objekt verändern. Generell gilt, je größer der Abbildungsmaßstab ist, desto kleiner ist der Schärfentiefebereich. Der Abbildungsmaßstab vergrößert sich durch die Verringerung des Abstandes der Kamera zum Objekt oder durch die Vergrößerung der Brennweite. Daraus folgt, dass sich bei Vergrößerung der Brennweite oder bei Verkleinerung des Abstandes der Schärfentiefebereich verkleinert.

4.3.2. Abbildungsfehler

Bisher sind wir von Idealbedingungen ausgegangen, um die optischen Kameraelemente zu erklären. In der Realität treten jedoch verschiedenste Abbildungsfehler durch die physikalischen Eigenschaften der Objektive auf. Im Folgenden werden die wichtigsten Abbildungsfehler erörtert.

Sphärische und chromatische Aberration

Die sphärische Aberration ist ein Schärfefehler. Der Schärfefehler resultiert aus den Eigenschaften von Linsen. Je weiter ein Lichtstrahl von der optischen Achse entfernt auf die Linse trifft, desto stärker wird er auch gebrochen. [HI16, S. 94] Dadurch treffen sich die Parallelstrahlen nicht genau in einem Punkt. Dieser Effekt führt zu einer Abnahme der Bildschärfe bei Vergrößerung der Blendenöffnung (siehe Kapitel 4.3.1: Blende). Abbildung 4.9 (oben) zeigt die sphärische Aberration. Der Punkt F' beschreibt dabei den Fokuspunkt.

Bei der chromatischen Aberration wird das Licht entsprechend seiner Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen. Die Ursache für die chromatische Aberration liegt in der Dispersion des Lichts an der Linse. (siehe Kapitel 3.3.4: Dispersion) [HI16, S. 96] Die chromatische Aberration ist wie die sphärische Aberration abhängig von der Entfernung des Lichts zu der optischen Achse. Dadurch ist die Stärke der chromatischen Aberration abhängig von der Blendenöffnung. Die chromatische Aberration ist als Farbverschiebung der einzelnen Farben in der Abbildung zu sehen.

4. Kamerasysteme

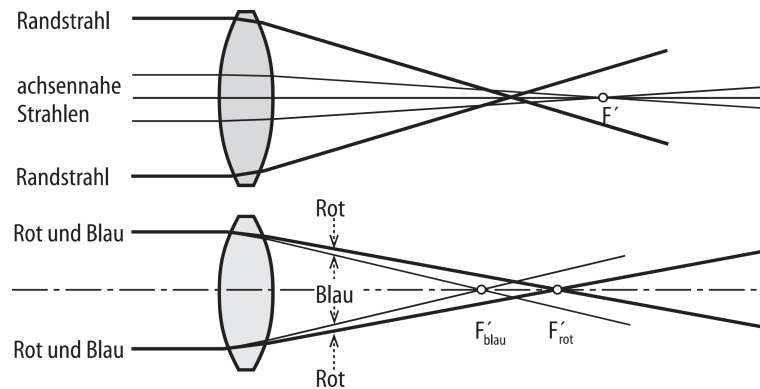


Abbildung 4.9.: Die sphärische und chromatische Aberration bei Kameraobjektiven [Sch13, S. 385]

Verzeichnung

Die Verzeichnung beschreibt Abbildungsfehler des Bildes, wie sie in Abbildung 4.10 dargestellt sind. Das erste Bild zeigt eine ideale Abbildung der Szene auf dem Sensor ohne eine Verzeichnung. Das zweite Bild zeigt eine Kissenverzeichnung. Das dritte Bild zeigt eine Tonnenverzeichnung. [HI16, S. 95] Allgemein bewirkt die Verzeichnung, dass gerade Linien im Objektraum als gekrümmte Kurven im Bildraum abgebildet werden. [BLF16, S. 165]

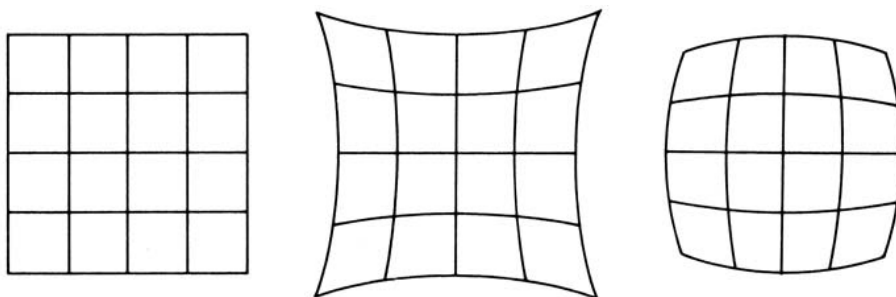


Abbildung 4.10.: Die Verzeichnung von Kameraobjektiven [Ped+05, S. 134]

Die Ursache für die Verzeichnung eines Bildes liegt in der Brennweite des optischen Systems. Es gilt:

Je weiter sich die Brennweite des optischen Systems vom Blickwinkel des menschlichen Auges in beide Richtungen entfernt, desto stärker tritt dieser Fehler auf. [HI16, S. 95]

Weitwinkelobjektive erzeugen eine tonnenförmige Verzeichnung, Teleobjektive erzeugen eine kissenförmige Verzeichnung.

Bildfeldwölbung

Die Bildfeldwölbung ist ein Lagefehler, der entsteht, wenn sich ein Objekt im Objekt-raum von der optischen Achse der Kamera entfernt. [BLF16, S. 165] Das optische System projiziert nicht auf die Ebene des Bildsensors, sondern auf eine gewölbte Fläche. Je größer der Abstand des Objekts zur optischen Achse ist, desto stärker wird das Objekt in die Unschärfe geschoben. [HI16, S. 95] Abbildung 4.11 zeigt dieses Phänomen. Weitwinkelobjektive sind aus diesem Grund oftmals anfällig für Unschärfefeffekte in den Rändern der Abbildung (siehe Kapitel 4.3.1: Blende)

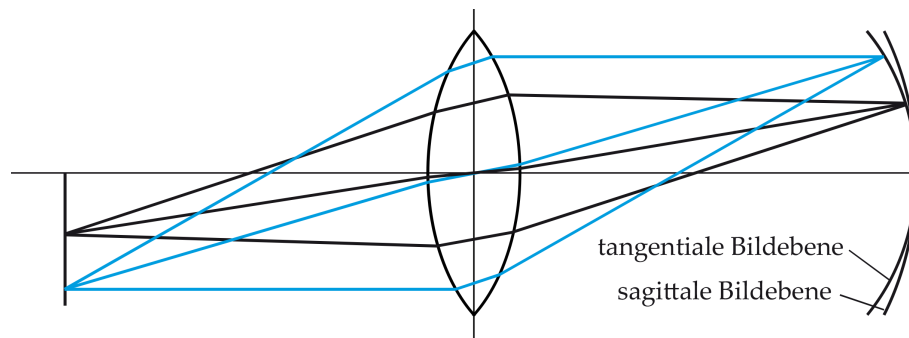


Abbildung 4.11.: Die Bildfeldwölbung bei Kameraobjektiven [BLF16, S. 165]

Blendenflecken und Blendensterne

Blendenflecken entstehen durch die Reflexion des Lichts an den Objektivlinsen. Objektivlinsen reflektieren einen kleinen Teil des einstrahlenden Lichts. Bei Objektiven mit einer Vielzahl an Linsen werden kleine Teile des Lichts mehrfach reflektiert und treffen auf den Sensor. Die entstehenden Lichtflecken im Bild sind durch die Form der Blende beeinflusst. Deshalb werden sie als Blendenflecken bezeichnet. Bei der Aufnahme lassen sich Blendenflecken durch den schrägen Lichteinfall mit Hilfe von Gegenlichtblenden minimieren. [Tau10, S. 127] Darüber hinaus können Blendenflecken über die Vergütung der Linsen reduziert werden. Bei der Vergütung werden die Linsen mit Hilfe einer Metallverbindungs-schicht entspiegelt. Anteile des einfallenden Lichts werden an der Linse und an der Metallschicht reflektiert. Durch den Wegunterschied kommt es zu einer Phasenverschiebung zwischen den beiden Reflexionen. Die reflektierte Welle der Metallverbindung ist dabei im Idealfall um genau eine halbe Wellenlänge zum reflektierten Licht an der Linse verschoben. Durch die Überlagerung der beiden Wellen kommt es zur destruktiven Interferenz (siehe Kapitel 3.3.2: Interferenz), wodurch sich die Wellen gegenseitig auslöschen. [Sch13, S. 386]

Blendensterne entstehen bei kontraststarken Lichtelementen wie beispielsweise der Sonne und treten umso stärker auf, je geschlossener die Blende ist. Grund dafür ist

die Beugung des Lichts an der Blende (siehe Kapitel: 3.3.5: Beugung/Diffraktion). Durch die Beugung werden scharf fokussierte Lichtelemente mit einer diffusen unregelmäßigen Umrandung abgebildet. Da bei den Blenden oft Lamellenblenden eingesetzt werden, die keinen perfekten Kreis bilden, kommt es zur unregelmäßigen Beugung an der Blende. Dadurch entstehen die sternartigen Beugungseffekte, weshalb wir von Blendensternen sprechen. Durch das Aufblenden können Blendensterne reduziert werden, da sich die Beugung an der Blende reduziert. [Tau10, S. 128]

4.4. Stereoskopie

In den bisherigen Kapiteln haben wir die Kameratechnik aufgrund ihrer monokularen Eigenschaften betrachtet. Der Begriff monokular beschreibt den Seheindruck, der über ein Auge oder ein Objektiv gewonnen werden kann. [Gra16, S. 35] Im kamera-technischen Kontext beschreibt monokular also die Projektion des dreidimensionalen Raums auf eine einzelne zweidimensionale Bildebene (siehe Kapitel 2: Geometrische Grundlagen). Die Stereoskopie verfolgt das Ziel der Abbildung einer binokularen zweidimensionalen Bildebene, die einen räumlichen Eindruck beim Betrachter hervorruft. Binokular sind also Kamerasysteme, die eine Szene aus zwei Blickwinkeln betrachten. [Gra16, S. 53–54] Sie sind dem menschlichen Sehen nachempfunden. Wie bei einem binokularen Kamerasystem wird auch auf der Netzhaut jedes einzelnen Auges eine flache zweidimensionale Abbildung der Umgebung dargestellt. Das Gehirn verarbeitet aus den beiden zweidimensionalen Abbildungen schließlich die dreidimensionale Illusion. [Gra16, S. 23]

4.4.1. Stereoskopische Kamerasysteme

In der Stereoskopie wird versucht, zwei monokulare Einzelbilder als Stereobildpaar dem jeweiligen Auge des Betrachters eindeutig zuzuordnen. Das aufgenommene Bild der linken Kamera wird also dem linken Auge zugeordnet, und das aufgenommene Bild der rechten Kamera wird dem rechten Auge zugeordnet. [Gra16, S. 53–54] Die folgenden Verfahren kommen für die Aufnahme der einzelnen Teilsequenzen zum Einsatz.

Bei den stereoskopischen Kamerasystemen gibt es zwei verschiedene Anordnungen auf einem Kamerarig. Bei einem Side-by-Side-Rig werden die Kameras nebeneinander auf einem Rig montiert. Bei einem Beamsplitter-Spiegel-Rig werden die Kameras mithilfe eines halbdurchlässigen Spiegels angeordnet. Im Folgenden werden diese beiden Verfahren genauer erläutert.

Neben den Kamerarig-Systemen gibt es verschiedene Konvertierungsverfahren, um aus einzelnen monokularen Bildaufnahmen eine binokulare Aufnahme zu generieren. Jedoch liefern diese Verfahren bislang kein überzeugend konvertiertes Stereo3D. [HI16, S. 220] Aus diesem Grund sind diese Verfahren für die Analyse von Lichtfeldkameras nicht relevant und werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Side-by-Side-Rig

Das Side-by-Side-Rig besteht aus zwei horizontal nebeneinander liegenden Kameras. Die Kameras können auf zwei Arten ausgerichtet werden. Abbildung 4.12 zeigt die Anordnung von Kameras auf einem Side-by-Side-Rig.

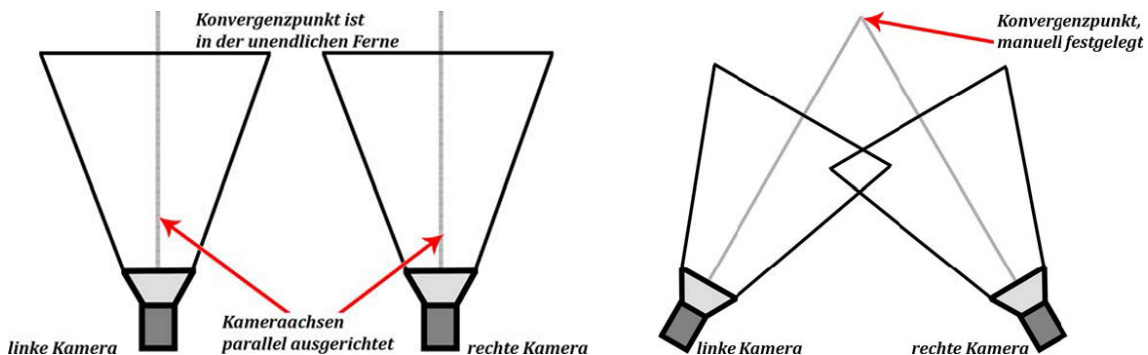


Abbildung 4.12.: Die Stereoanordnung von Kameras auf einem Side-by-Side-Rig [HI16, S. 211]

Der Parallel-Shot (links) zeigt die Kameraanordnung parallel zueinander. Der Konvergenzpunkt des Kamerapaars liegt im Unendlichen. Durch das horizontale Verschieben der Teilsequenzen in der Postproduktion werden die Konvergenzpunkte fixiert. [HI16, S. 211]

Der Converged-Shot (rechts) ist eine Kameraanordnung mit einem gemeinsamen Konvergenzpunkt, der bereits bei der Aufnahme festgelegt werden muss. Dieses Verfahren erlaubt die Aufnahme eines weitestgehend finalen Stereo3D-Bildes. Der Nachteil bei diesem Verfahren liegt darin, dass es bei der Überlagerung der beiden Teilsequenzen zu unerwünschten Verzerrungen durch die unterschiedlichen Perspektiven kommt. [HI16, S. 211]

Beamsplitter-Spiegel-Rig

Das Beamsplitter-Spiegel-Rig verwendet einen halbdurchlässigen Spiegel, der das Licht auf die jeweiligen Kameras verteilt. Bei dem Beamsplitter-Spiegel-Rig gibt

4. Kamerasysteme

es zwei Montagemöglichkeiten. Während die erste Kamera direkt durch den Spiegel filmt, kann die zweite Kamera von oben oder von unten an dem Rig montiert sein. Der große Vorteil eines Beamsplitter-Spiegel-Rigs liegt in der Verringerung des horizontalen Abstandes zwischen den Kameras. Dadurch lassen sich Verzerrungen minimieren. Die Nachteile des Systems liegen in den Reflexionseigenschaften des Spiegels. Dadurch, dass nur 50 Prozent des Lichts reflektiert und 50 Prozent transmittiert werden, sinkt die auf den Sensor fallende Beleuchtungsstärke des Lichts.

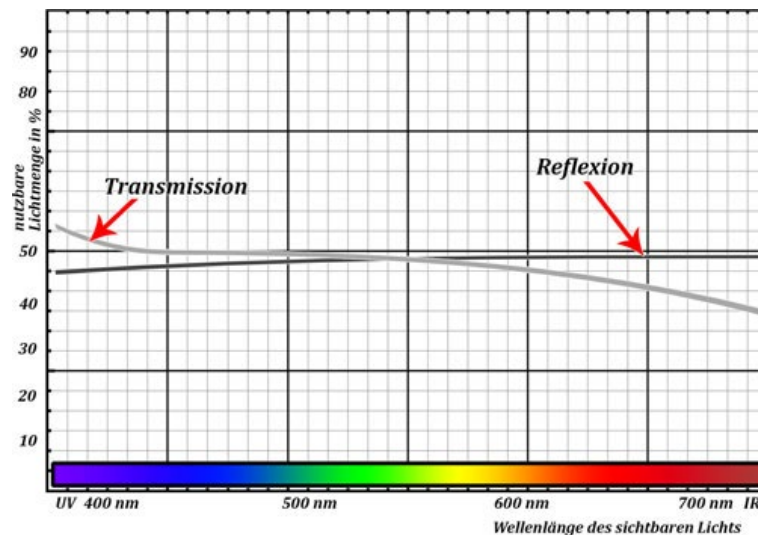


Abbildung 4.13.: Die Farbverschiebung am Spiegel eines Beamsplitter-Spiegel-Rigs [HI16, S. 214]

Darüber hinaus kommt es am Spiegel zu Farbverschiebungen, da unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich reflektiert bzw. transmittiert werden. Abbildung 4.13 zeigt die Verschiebung am Spiegel in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Farbunterschiede in den Sequenzen müssen in der Nachbereitung des Materials korrigiert werden. [HI16, S. 212–216]

4.4.2. Stereoskopische Wiedergabesysteme

Um die Teilbilder des dreidimensionalen Films passend auf die Augen zu verteilen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Folgenden wird das Anaglyphe-, Polarisations-, Shutter- und Autostereoskopische Wiedergabeverfahren dargestellt.

Anaglyphe Wiedergabeverfahren

Das anaglyphe Wiedergabeverfahren basiert auf der Bildtrennung durch eine Farbseparation. Dabei werden die jeweiligen Teilsequenzen komplementär eingefärbt und

anschließend überlagert. Mit Hilfe von Farbfilterbrillen wird jeweils eine der beiden Farben pro Auge herausgefiltert. Dadurch werden die beiden Teilsequenzen separiert auf das jeweilige Auge abgebildet. [Sch13, S. 516]

Der große Vorteil ist die synchronisationslose Wiedergabefähigkeit auf Bildschirmen. Jedoch ist die Farbtreue und Kanaltrennung dieses Verfahrens für die geforderte hohe Qualität in Kinos und im Heimbereich nicht geeignet. [HI16, S. 216]

Polarisationsverfahren

Beim Polarisationsverfahren wird die Bildtrennung der Teilbilder mit Hilfe von Polfiltern in den Brillen vorgenommen. Die Teilbilder werden jeweils unterschiedlich polarisiert. Dadurch filtern die Polfilter der 3D-Brille das entsprechende Teilbild aus der Sequenz und separieren die Bilder für das jeweilige Auge. In der Praxis wird zirkular und nicht linear polarisiert (siehe Kapitel 3.3.1: Polarisation). Dadurch bekommt der Betrachter die Möglichkeit seinen Kopf zu neigen ohne den 3D-Effekt zu mindern. Bei der Projektion kommen spezielle Silberleinwände zum Einsatz, um die Polarisationsänderung durch Reflexion zu minimieren (siehe Kapitel 3.3.1: Polarisation). [Sch13, S. 517]

Vorteile des Polarisationsverfahrens sind die vollständige Farabbildung sowie die preisgünstigen Polarisationsbrillen. Der Nachteil ist jedoch der starke Lichtverlust durch das Durchlaufen der Polarisationsfilter. Außerdem bedarf es Projektoren, die auf Grund der sequenziellen Darstellung der Frames eine Darstellungsfrequenz von der doppelten Bildfrequenz des Filmes erreichen. [Sch13, S. 517]

Shutterverfahren

Das Shutterverfahren ist ein aktives Verfahren. Es basiert auf einer Shutterbrille, die zu einem definierten Zeitpunkt Teilbilder für das betreffende Auge sichtbar machen. Das Licht wird dabei immer genau für das Auge durchgelassen, für das das Teilbild gerade auf der Projektionsfläche wiedergegeben wird. Für die Umsetzung bedarf es einer genauen Synchronisation zwischen dem Projektor und den Brillen der Zuschauer. Dies wird mit Hilfe von Infrarotsendern realisiert, die Sync-Impulse an die Brillen übermitteln. [HI16, S. 217]

Anders als das Polarisationsverfahren kann dieses Verfahren Projektionen unabhängig von der Oberfläche abbilden. Auch bei diesem Verfahren ist eine erhöhte Darstellungsfrequenz notwendig. Es erhöhen sich jedoch die Kosten für die 3D-Brillen. [HI16, S. 217] Helligkeitsverluste wie beim Polarisationsverfahren treten hier nicht auf.

Autostereoskopisches Verfahren

Das autostereoskopische Verfahren unterscheidet sich von den anderen Verfahren vor allem dadurch, dass für autostereoskopische Displays keine Brillen notwendig sind. Bei autostereoskopischen Displays wird durch Barrieren aus Flüssigkristallstreifen eine Halbbildtrennung durchgeführt. Diese Halbbilder fallen dann entsprechend auf die einzelnen Augen.

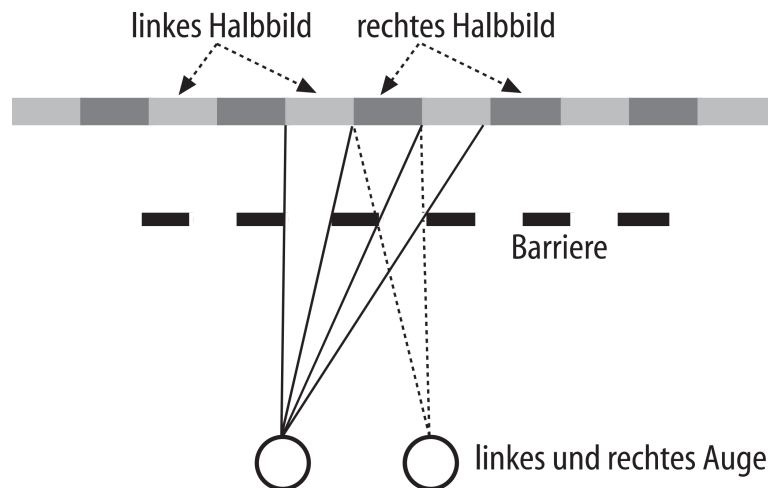


Abbildung 4.14.: Das autostereoskopische Verfahren [Sch13, S. 492]

Abbildung 4.14 zeigt dieses Verfahren. Durch die Halbbildtrennung kommt es zu einer Reduzierung der Bildauflösung. Das in Abbildung 4.14 gezeigte Verfahren ist darüber hinaus nur für eine einzelne Person in einem Sweet Spot nutzbar. Moderne autostereoskopische Displays unterstützen mehrere variable Betrachterpositionen. Die Anzahl der Betrachterpositionen beeinflusst jedoch für alle Personen die Gesamtauflösung. Sie ist deshalb aktuell noch stark begrenzt. Mit Hilfe von Tracking-Systemen kann die Kopfposition der Betrachter detektiert werden. Dadurch lässt sich die Barriere und damit der Blickwinkel auf das Display beeinflussen. Für den Einsatz in Kinos ist dieses Verfahren aktuell nicht geeignet, da die Betrachteranzahl noch stark begrenzt ist. [Sch13, S. 492–493]

4.4.3. Störeffekte und Artefakte

Während des Aufnahmeprozesses und in der Nachbearbeitung von stereoskopischen Videosequenzen kommt es zu unterschiedlichen Störfaktoren, die die Qualität des Materials beeinflussen.

Geometrische Fehler

Geometrische Fehler sind eine Folge der fehlerhaften Kalibrierung des Kamerasystems oder eine Folge von Fertigungstoleranzen an den Kameras selbst. Auch bei einer fehlerfreien Ausrichtung kann es auf Grund der Abweichungen bei Objektiven und Kameras zu leichten Transformationen kommen. Dabei sind horizontale als auch vertikale Verschiebungen, Skalierungen und Rotationsfehler möglich. [HI16, S. 207]

Farbfehler

Farbfehler können auf Grund eines unterschiedlichen Weißabgleichs zwischen den beiden Kameras auftreten. Die Teilbilder müssen in einer separaten Farbkorrektur in der Postproduktion angeglichen werden. [HI16, S. 207]

Schärfefehler

Schärfefehler entstehen durch einen schlecht gesetzten Fokusabgleich der beiden Kameras des Kamerasystems. Schärfefehler sind in der Postproduktion nur bis zu einem bestimmten Grad korrigierbar. Die sphärischen Aberrationen können ebenfalls eine Ursache für Schärfefehler sein (siehe Kapitel 4.3.2: Sphärische und chromatische Aberration). [HI16, S. 207]

Retinale Rivalität

Die retinale Rivalität beschreibt eine Differenz in einzelnen Bereichen der beiden Teilsequenzen. Dieser Fehler tritt vor allem bei der Verwendung des Beamsplitter-Spiegel-Rig auf, da die Trennung der Bildinformationen mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels geschieht. Das auf den Kamerasensor treffende Licht ist durch die Reflexion unterschiedlich polarisiert. Das führt zu Unterschieden in der Farbgebung der Objekte in den Teilbildern (siehe Kapitel 3.3.1: Polarisierung und Kapitel 4.4.1: Beamsplitter-Spiegel-Rig). [HI16, S. 207]

Eine weitere Ursache findet sich bei der unterschiedlichen Ausrichtung der einzelnen Kameras wie beispielsweise beim Converged-Shot (siehe Kapitel 4.4.1: Side-by-Side-Rig). Durch die unterschiedliche Ausrichtung der Kameras können unterschiedliche Reflexionen in den Teilbildern entstehen, wie beispielsweise Reflexionen auf spiegelnden Oberflächen. Darüber hinaus kann es zu unterschiedlichen Linsenreflexionen wie Blendenflecken kommen (siehe Kapitel 4.3.2: Blendenflecken und Blendensterne). Beide Ursachen führen zu einer retinalen Rivalität. Derartige Fehler müssen

mit Hilfe einer selektiven Farbkorrektur behoben werden. Beim Betrachter können retinale Rivalitäten zu Kopfschmerzen führen. [HI16, S. 208]

Pseudostereo

Das Pseudostereo beschreibt das Vertauschen der beiden Teilbilder. Das Vertauschen der beiden Teilbilder bewirkt, dass Objekte, die eigentlich in der Ferne wahrgenommen werden sollen, nach vorne springen und umgekehrt. Eine korrekte stereoskopische Wahrnehmung von vertauschten Teilbildern ist nicht möglich. Durch das Zurücktauschen der Teilsequenzen kann der Fehler behoben werden. [HI16, S. 208]

5. Lichtfeldkameras

Lichtfeldkameras sind Kamerasysteme, die neben den Bildinformationen des einfallenden Lichts auch die Lichtrichtung bestimmen und abspeichern können. Dadurch ergeben sich einige Vor-, aber auch Nachteile in der Verarbeitung der Daten. In diesem Kapitel werden die technischen Eigenschaften und die Funktionsweise der Lichtfeldkamera, sowie ihre Vor- und Nachteile genauer betrachtet.

5.1. Grundlagen der Plenoptik

Der Ursprung der Lichtfeldkameras geht zurück auf die Entwicklungen von Frederic E. Ives im Jahr 1903 [Ive03] und Gabriel Lippmann im Jahr 1908 [Lip08]. Beide stellten theoretische und praktische Überlegungen vor, auf denen heutige plenoptische Systeme aufgebaut sind. Ihre Überlegungen ermöglichen es, in der Theorie eine perspektivische Tiefenwirkung zu erzeugen, ohne auf ein Doppelstereogramm zurückgreifen zu müssen. Eine technische Umsetzung ist jedoch erst seit wenigen Jahren möglich, da uns zuvor die nötige Rechenleistung nicht zur Verfügung stand. [ZQS14, S. 1]

1991 definierten Edward H. Adelson und James R. Bergen schließlich die plenoptische Funktion in ihrem Artikel „The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision“ [AB91], welche die geometrische Gesamtverteilung des Lichts, die als Lichtfeld beschrieben wird, in einem Raum als eine plenoptische Funktion darstellt. [Ng06, S. 12]

5.1.1. Plenoptische Funktion

Um die plenoptische Funktion zu verstehen, betrachten wir zunächst rückblickend noch einmal die Lichtverteilung bei einer Lochkamera (siehe Kapitel 2.2: Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera). Abbildung 2.2 zeigt, wie der dreidimensionale Raum (hier als Objektebene dargestellt) auf die Bildebene projiziert wird. Der Punkt P' gibt einen Intensitätswert des Lichts (Helligkeitswert) auf

der Bildebene wieder. Um alle Punkte der Bildebene zu beschreiben, können wir die Intensitätswerte in Abhängigkeit von ihren kartesischen Koordinaten oder ihren Kugelkoordinaten betrachten. Diese Abhängigkeit gibt uns die Intensitätsverteilung auf der Bildebene wieder, wodurch wir die Helligkeitswerte eines jeden Punktes auf der Bildebene erhalten. Diese Intensitätsverteilung kann mathematisch durch die Formel $P'(x, y)$ im kartesischen Koordinatensystem oder durch die Formel $P'(\theta, \phi)$ im Kugelkoordinatensystem beschrieben werden. Wir erhalten also eine mathematische Beschreibung für ein Schwarz-Weiß-Foto. [AB91, S. 4–6]

Um ein Farbfoto mathematisch zu beschreiben, ist die Intensität des Lichts neben der Position des Licht auf der Bildebene auch von der Wellenlänge des Lichts λ abhängig. Ein Farbfoto lässt sich mathematisch durch die Formel $P'(\theta, \phi, \lambda)$ beschreiben. [AB91, S. 4–6]

Betrachten wir fortlaufend nun eine Videosequenz, also eine Abfolge von Farbfotos über einen bestimmten Zeitraum z , dann erhalten wir eine weitere Abhängigkeit der Intensität. Eine Videosequenz wird über die Formel $P'(\theta, \phi, \lambda, z)$ definiert. [AB91, S. 4–6]

Die Formeln der verschiedenen zweidimensionalen Abbildungen einer Szene lassen keine Rückschlüsse auf die Szene selbst zu. Die Szene wird immer als einzelne Objekt-ebene betrachtet (siehe Kapitel 2.2: Die Zentralprojektion einer räumlichen Szene in der Kamera). Um eine dreidimensionale Abbildung einer Szene zu realisieren, wie sie bei einem Hologramm denkbar wäre, bedarf es einer echten Rekonstruktion der Szene zu jedem Zeitpunkt, von jeder denkbaren Position im Raum. Dafür ist es notwendig, die Lichtintensität des Lichtes von jeder Betrachtungsposition Vx , Vy und Vz im Raum aus, messen zu können. Das Licht fällt dabei aus jedem möglichen horizontalen θ und vertikalen ϕ Winkel auf die Positionen im Raum. Die beschriebene Menge des Lichts, die sich an jedem beliebigen Punkt im dreidimensionalen Raum in alle Richtungen ausbreitet, wird als Lichtfeld bezeichnet. Um ein Lichtfeld abbilden zu können, ergibt sich folgende mathematische Formel: [AB91, S. 4–6]

$$P'(\theta, \phi, \lambda, z, Vx, Vy, Vz) \tag{5.1}$$

Diese mathematische Darstellung einer dreidimensionalen Szene von der Betrachtungsposition wird als plenoptische Funktion bezeichnet. [AB91, S. 4–6]

Die plenoptische Funktion beschreibt ein idealisiertes Konzept zur Abbildung eines dreidimensionalen Raums, welches aber in der praktischen Umsetzung so nicht realisierbar ist. In der Praxis wird sich dem Ideal deshalb genähert. Eine stereoskopische binokulare Aufnahme (siehe Kapitel 4.4.1: Stereoskopische Kamerasysteme)

kann beispielsweise mittels der plenoptischen Funktion von zwei unterschiedlichen Betrachterpositionen, einem definierten Zeitraum, einem eingeschränkten Wellenlängenbereich (sichtbares Licht) und zwei durch die Brennweite bestimmte Betrachtungswinkel beschrieben werden.

Vereinfacht kann eine plenoptische Funktion als Funktion mit 5 Dimensionen betrachtet werden. Dabei wird die Abhängigkeit von der Zeit zunächst nicht betrachtet, da sie keine Informationen über die räumliche Struktur des Lichtfelds enthält. Des weiteren wird davon ausgegangen, dass sich die Wellenlänge eines Lichtstrahls innerhalb der Szene nicht ändert. Wir betrachten die plenoptische Funktion also ausschließlich auf Grundlage der Betrachtungsposition und der Ausrichtung. Wellenoptische Phänomene, wie beispielsweise die Brechung, sind abhängig von der Wellenlänge des Lichts. Sie können deshalb über ein fünfdimensionales Lichtfeld nicht abgebildet werden.

5.1.2. Das 4D-Lichtfeld

Die plenoptische Funktion lässt sich auf ein vierdimensionales Lichtfeld vereinfachen. 1996 haben Marc Levoy und Pat Hanrahan in ihrem Fachartikel „4D light field“ [LH96] und Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard Szeliski und Michael F. Cohen in ihrem Fachartikel „The Lumigraph“ [Gor+96] eine Methode vorgestellt, um ein Lichtfeld über vier Dimensionen zu beschreiben.

Für die Vereinfachung der plenoptischen Funktion von einem fünfdimensionalen Lichtfeld auf ein vierdimensionales Lichtfeld gehen wir davon aus, dass sich Licht als Lichtstrahl im Raum bewegt (siehe Kapitel 3.2: Strahlenoptik). Darüber hinaus wird bei der Betrachtung eines vierdimensionalen Lichtfelds von einer streuungsfreien Szene ausgegangen (siehe Kapitel 3.2.3: Streuung), in der sich die Intensität einzelner Lichtstrahlen durch den Raum konstant hält und nur durch die äußeren Punkte der Objekte abgestrahlt wird. [Gor+96, S. 44] [LH96, S. 2–3] Dadurch werden die Intensitäten aller Punkte eines Lichtstrahls eindeutig dem gesamten Strahl zugeordnet. Über die Position des Strahls lassen sich also Rückschlüsse auf das gesamte Licht im Raum ziehen. Wellenoptische Phänomene werden auch bei dem 4D-Lichtfeld nicht berücksichtigt.

Abbildung 5.1 zeigt das Prinzip des 4D-Lichtfeldes. Der Lichtstrahl L wird durch die Schnittpunkte von zwei Ebenen beschrieben. Der Schnittpunkt der beiden Achsen gibt uns die Strahlenkoordinaten des Lichtstrahls. Die Differenz der Schnittpunkte mit der jeweiligen Ebene gibt uns darüber hinaus die Richtung des Lichts wieder. Dadurch können wir die Position und die genaue Ausrichtung des Strahls an jedem Punkt im Raum abbilden. Die vierdimensionale Funktion des Lichtfelds ist demnach

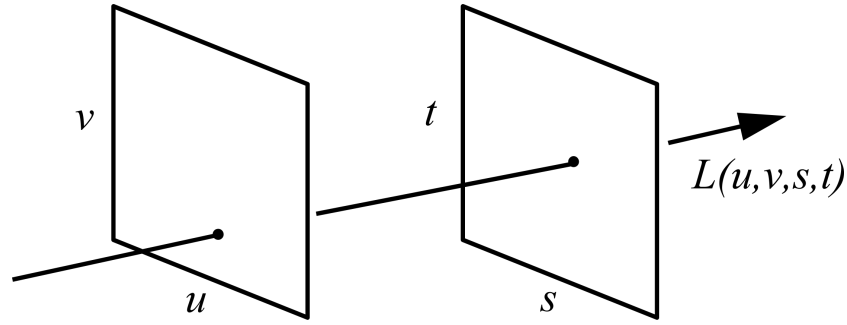


Abbildung 5.1.: Das 4D-Lichtfeld [LH96, S. 2]

ausschließlich von den vier Koordinatenpunkten an den Achsen abhängig. Es ergibt sich folgende Funktion [Gor+96, S. 44]:

$$L(u, v, s, t) \quad (5.2)$$

Die Zwei-Ebenen-Parametrisierung der plenoptischen Funktion durch zwei Schnittpunkte mit den Ebenen, ermöglicht eine wesentlich einfachere Verarbeitung der Daten in einem Kamerasystem. [Ng06, S. 11–13]

5.2. Aufbau der Lichtfeldkamaseras

Lichtfeldkamaseras bauen auf der Theorie des 4D-Lichtfelds auf. Das Ziel der Lichtfeldkameratechnik ist es, die Eigenschaften des einfallende Licht als Funktion im Inneren der Kameraoptik zu ermitteln. Vor allem zielt die Lichtfeldkameratechnik darauf ab, die Einfallrichtung der Lichtstrahlen zu ermitteln, um über die vierdimensionale plenoptische Funktion, Tiefeninformationen der Szene zu erhalten. [Ng06, S. 12–14]

Abbildung 5.2 zeigt eine zweidimensionale Ansicht des Strahlenverlaufs eines Lichtstrahls innerhalb der Kamera. Der Lichtstrahl wird an der Position u in der Linse gebrochen und trifft den Sensor an der Position x . [Ng06, S. 12] Die Vereinfachung repräsentiert nicht den dreidimensionalen Strahlenverlauf des Lichts. Ein Strahl im Raum würde die Schnittpunkte (u, v) an der Linse und die Schnittpunkte (x, y) auf dem Sensor haben. Im Folgenden wird die vereinfachte zweidimensionale Betrachtung der Ebenen verwendet, um das Phänomen verständlich darzustellen.

Die Parametrisierung des Lichtstrahls lässt sich auf alle Lichtstrahlen in einer Kamera übertragen. Abbildung 5.3 (links) zeigt schematisch, wie alle Lichtstrahlen in einer Kamera verlaufen. Es ist zu sehen, dass sich auf jedem Pixel auf dem Fotosensor

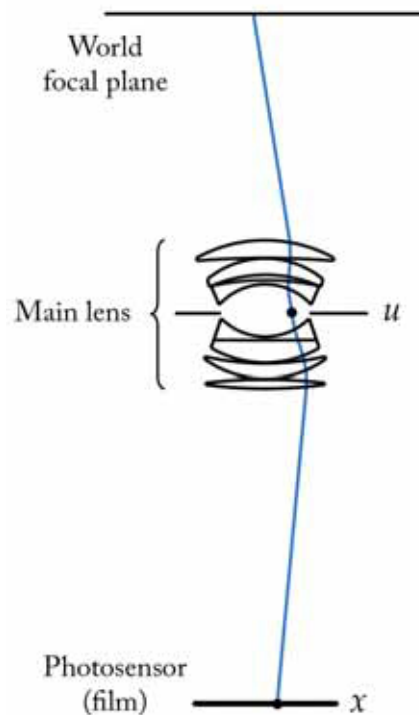


Abbildung 5.2.: Die Parametrisierung eines Lichtstrahls in einer Kamera [Ng06, S. 12]

mehrere Lichtstrahlen summieren. Abbildung 5.3 (rechts) verdeutlicht den Strahlengang der Lichtstrahlen, die sich in einem Punkt auf dem Bildsensor treffen. Die in der Linse einfallenden Lichtstrahlen unterscheiden sich in ihrer Position u , summieren sich jedoch auf dem Pixel an der Position x . Die Pixel sammeln die Informationen über die Intensität des einfallenden Lichts (siehe Kapitel 4.2.1: Bildwandler). Durch die Summierung mehrerer Strahlen mit unterschiedlichen Ausrichtungen ist über die Helligkeitsinformation kein Rückschluss auf die Richtung des einfallenden Lichts möglich.

Um die Richtungsinformationen zu erhalten, müssen den Lichtstrahlen eindeutige Werte x auf dem Sensor zugeordnet werden. Dazu kommen Mikrolinsenarrays zum Einsatz. Das Mikrolinsenarray ist ein optisches Bauteil bestehend aus vielen kleinen Linsen. Ein konkretes Verfahren zur Aufzeichnung des Lichtfelds einer Szene mittels eines Mikrolinsenarrays ist in Abbildung 5.4 dargestellt. [Ng06, S. 24]

Bei diesem Verfahren wird zwischen der Linse der Kamera und dem Photosensor ein Mikrolinsenarray angebracht. Jede Mikrolinse deckt dabei mehrere Sensorpixel ab. [Ng06, S. 23]. Die einfallenden Lichtstrahlen werden von der Hauptlinse auf das Mikrolinsenarray geleitet, an dem sie entsprechend der Größe der Mikrolinsen auf mehrere Pixel des Sensors projiziert werden. Die Größe der Mikrolinsen nimmt demnach

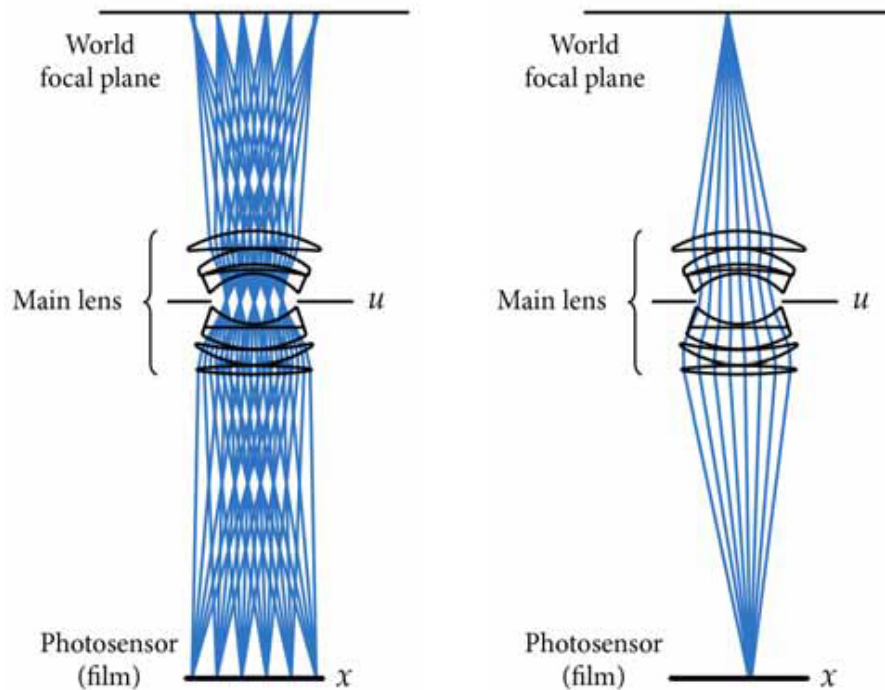


Abbildung 5.3.: Die Parametrisierung aller Lichtstrahlen in einer Kamera (links) und die Parametrisierung aller Lichtstrahlen auf einem Punkt des Sensors (rechts) [Ng06, S. 15–16]

direkten Einfluss auf die Auflösung der Abbildung. Man kann sich das Mikrolinsenarray als viele kleine Objektive vorstellen, die die Szene aus vielen verschiedenen Perspektiven betrachten. Dadurch ergeben sich verschiedene Abbildungen der Szene, in Abhängigkeit von den einfallenden Lichtstrahlen und ihren Ausrichtungen. Es findet also eine Abtastung des 4D-Lichtfelds statt. Die Schnittpunkte der Strahlen mit der Mikrolinsenebene und der Linsenebene bestimmt seine (x, u) - Position. [Ng06, S. 24]

5.3. Verarbeitung und Eigenschaften von Lichtfeldaufnahmen

Auf Grundlage des Aufbaus von Lichtfeldkamas ergeben sich verschiedene Eigenschaften der Lichtfeldkamas und Verarbeitungsschritte in der Nachbearbeitung. Im Folgenden wird auf diese eingegangen.

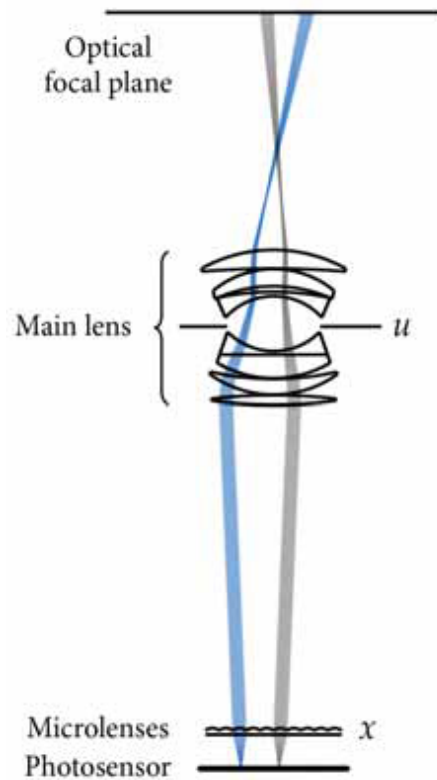


Abbildung 5.4.: Die Funktionsweise einer Lichtfeldkamera [Ng06, S. 25]

5.3.1. Blende

Die Blendenöffnung spielt bei den Lichtfeldkameras eine entscheidende Rolle. Die Blende einer Kamera reguliert den Lichteinfall auf den Sensor (siehe Kapitel 4.3.1: Blende) und reguliert damit unmittelbar auch die Breite des Lichtkegels, der in die Kamera eintritt. Durch die Brechung der Hauptlinse wird bei einer stärker geöffneten Blende der Lichtkegel an den Außenkanten in einem größeren Winkel gebrochen. Die Folge daraus wird durch Abbildung 5.5 deutlich.

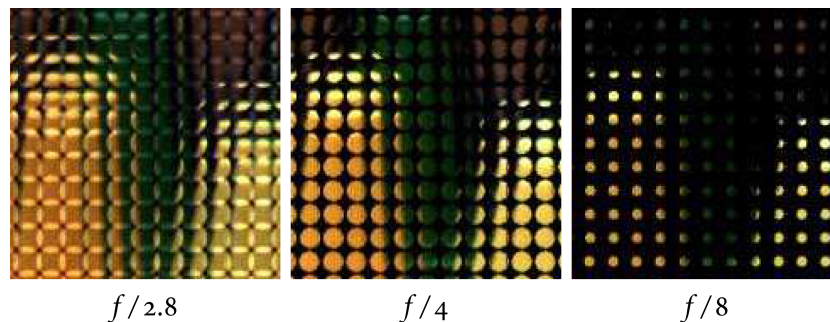


Abbildung 5.5.: Die Abbildung auf den Sensor der Lichtfeldkamera in Abhängigkeit von ihrer Blendenöffnung. [Ng06, S. 35]

Bei einer für die Mikrolinsen zu weit geöffneten Blende kommt es zu einer Überlagerung an den Pixeln der benachbarten Mikrolinsen. Diese Überlagerung führt zu Unschärfen in der Abbildung. Die Grenze der Blendenöffnung hängt dabei von den Mikrolinsen selbst ab. Diese müssen auf eine Blendenöffnung der Kamera fokussiert werden. Bei einer für die Mikrolinsen zu weit geschlossenen Blende wird die Breite des Lichtkegels verringert, wodurch sich der Winkel der Brechung an der Hauptlinse verringert. In Folge dessen werden die Pixel unter den Mikrolinsen nicht vollständig ausgenutzt, was zu einer Reduzierung der Auflösung führt. Das Ziel der Blendenwahl der Lichtfeldkamera ist demnach, dass die Pixel durch die Mikrolinsen maximal ausgenutzt werden, ohne dass es zur Überlappung kommt. [Ng06, S. 34–35]

5.3.2. Auflösung

Wie bereits zuvor erwähnt, hängt die Auflösung direkt mit der Größe der Mikrolinsen zusammen. Je kleiner die Linsen sind, desto weniger Pixel werden benötigt, um das Teilbild der Mikrolinse darzustellen. Dadurch steigt die Anzahl der darstellbaren Teilbilder und unmittelbar die Auflösung. In der reinen Betrachtung von strahlenoptischen Phänomenen wäre eine unendliche Vergrößerung durch die stetige Verkleinerung der Mikrolinsen und der darunter liegenden Pixel denkbar (siehe Kapitel 3.2: Strahlenoptik). Betrachten wir das Licht jedoch auf Grundlage der Wellenoptik, so treten bei der Verkleinerung der Linsen stärkere Beugungseffekte auf (siehe Kapitel 3.3.5: Beugung/Diffraktion). Durch die Beugungseffekte kommt es demnach zu Unschärfen auf den Pixeln, welche die effektive Auflösung der Kamera begrenzen. [Ng06, S. 36–37] Die Auflösungen von Lichtfeldkamerasystemen liegen aktuell mit dem Faktor 8 - 10 unter der Auflösung des Sensors.

5.3.3. Datenverarbeitung

Das Datenvolumen einzelner Lichtfeldaufnahmen übersteigt das Datenvolumen gängiger Kamerasysteme. Die Ursache dafür liegt in der separaten Aufzeichnung der Lichtfelddaten. Aufgrund des erhöhten Datenvolumens und einer Erhöhung des nötigen Rechenaufwands, müssen Lichtfeldkameras hohe Prozessorleistungen und Schreibgeschwindigkeiten erreichen.

5.3.4. Schärfe und Refokussierung

Eine der Kernneuerungen der Lichtfeldtechnik ist die Möglichkeit der Refokussierung in der Nachbearbeitung. Durch die gewonnenen Tiefeninformationen lässt sich

der Fokus durch Algorithmen nachträglich verändern. Die Nachfokussierung beruht auf physikalischen Simulationen, die aus den Tiefeninformationen gewonnen werden. Der generelle Fokus der Aufnahme wird dadurch nicht beeinträchtigt. Die Simulation beruht im Wesentlichen auf einer virtuellen Nachbildung eines echten Strahlenflusses in der Kamera. Die einzelnen Lichtstrahlen werden dabei in der Software bis zu ihrer Endposition auf der Objektebene verfolgt. Die virtuellen Strahlen werden anschließend auf einen virtuellen Sensor gelegt und in jedem virtuellen Pixel die einzelnen Lichtstrahlen summiert. [Ng06, S. 49]

Ein weiterer Anwendungsfall der Tiefeninformationen ist die Erweiterung der Schärfentiefe. Da wir den Fokus nachträglich verändern können, bietet die Technologie auch die Möglichkeit, durch nachträgliche Überlagerung verschiedener Fokuspunkte, die generelle Schärfentiefe zu erhöhen. Ein wesentlicher Vorteil aus dieser Möglichkeit ergibt sich im Vergleich zum Fokusbereich der gängigen Kamerasysteme, die die Schärfentiefe über die Blendenöffnung regulieren (siehe Kapitel 4.3.1: Schärfe). Lichtfeldkameras müssen die Blendenöffnung nicht verändern, um die Schärfentiefe zu variieren. [Ng06, S. 50]

5.3.5. Rauschverhalten

Im Rauschverhalten unterscheiden sich die Sensoren von Lichtfeldkameras grundsätzlich nicht von gängigen Sensoren heutiger Videokameras. Bei gleichen Lichtverhältnissen, der gleichen Belichtungszeit und der gleichen Blendenöffnung dringen auch gleich viele Photonen in die Objektivapertur der Kamera und der Lichtfeldkamera ein. Einen Unterschied in dem Signal-Rausch-Verhältnis erhalten wir durch den Fakt, dass Lichtfeldkameras bei voller Blendenöffnung die Schärfentiefe variieren können. Gängige Kamerasysteme müssen dazu die Blendenöffnung weiter schließen (siehe Kapitel 4.3.1: Blende). Dadurch erzielen Lichtfeldkameras eine höhere Schärfentiefe, ohne das Signal-Rausch-Verhältnis zu verringern oder die Belichtungszeit zu erhöhen. In Situationen, in denen eine hohe Schärfentiefe notwendig ist, sind die Lichtfeldkameras also den gängigen Kamerasystemen überlegen. [Ng06, S. 61–63]

5.3.6. Abbildungsfehler

Abbildungsfehler von Kameras wurden bisher über komplexe Kombinationen verschiedener Linsen minimiert (siehe Kapitel 4.3.2: Abbildungsfehler). Lichtfeldkameras bieten neue Möglichkeiten, optische Abbildungsfehler zu minimieren. Da Lichtfeldkameras die Einfallrichtung des Lichts aufzeichnen, das sich entlang der Lichtstrahlen in der Kamera bewegt, können wir mit dem Computer einige optische Fehler

softwareseitig herausrechnen. [Ng06, S. 131–133] Zu den optischen Abbildungsfehlern, die herausgerechnet werden können, zählen die chromatischen und sphärischen Aberrationen, sowie Verzeichnungen und Bildfeldwölbungen. Die Algorithmen zur Reduktion dieser Fehler sind aktueller Forschungsstand und stark von der konkreten Lichtfeldkamera abhängig, da Fertigungstoleranzen der einzelnen Lichtfeldkameras in die Algorithmen eingearbeitet werden müssen. Moderne Lichtfeldkameras, wie der Lytro Illum, verwenden aus diesem Grund kameraabhängige Algorithmen. Eine genauere Betrachtung der Algorithmen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Im Kern unterscheiden sich Lichtfeldkameras gegenüber konventionellen Kameras jedoch dahingehend, dass Abbildungsfehler bei Lichtfeldkameras softwareseitig herausgerechnet werden können.

5.3.7. Stereoskopie

Auf Grundlage der Tiefeninformationen von Lichtfeldkameras lassen sich dreidimensionale Abbildungen von Szenen generieren. Da über die volle Breite des Sensors Richtungsinformationen gesammelt werden, ist es möglich eine Szene aus leicht variablen Positionen zu betrachten. Dadurch lassen sich auch stereoskopische Sequenzen rendern. Abbildung 5.6 zeigt die vertikale Verschiebung der Abbildung.

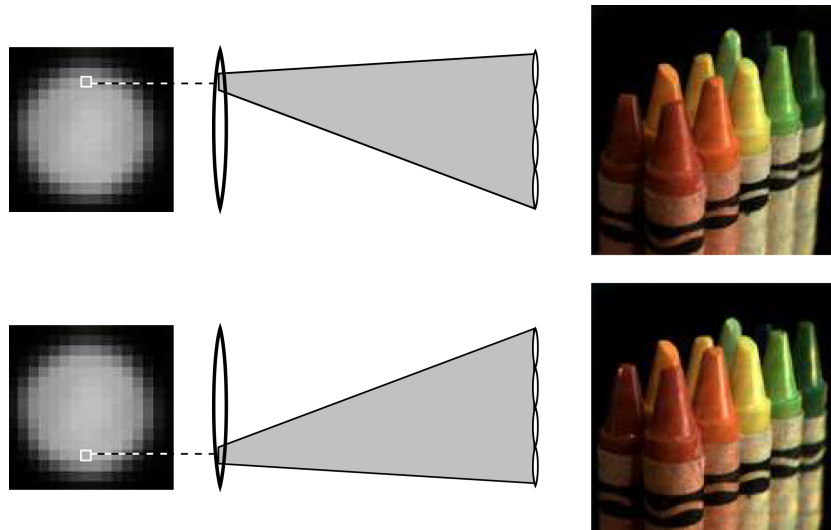


Abbildung 5.6.: Stereoskopie bei Lichtfeldkameras [Ng+05, S. 4]

Die Genauigkeit der Abbildung bei Lichtfeldkameras ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Auflösung spielt für die Abbildung von feinen Strukturen eine wichtige Rolle, um die Tiefe der Objekte in der Szene gut darstellen zu können. Im Vergleich zu stereoskopischen Kamerasystemen sind Lichtfeldkameras in diesem Punkt deutlich unterlegen.

Bei den Störeffekten und Artefakten finden sich weitere Differenzen zwischen Lichtfeldkameras und stereoskopischen Kamerasystemen (siehe Kapitel 4.4.3: Störeffekte und Artefakte).

Geometrische Fehler lassen sich in der Lichtfeldtechnik weitestgehend ausschließen, da die Bildinformationen über einen Sensor und ein Objektiv eingefangen werden. Fehler durch Fertigungstoleranzen gleichen sich aus diesem Grund im Resultat aus (siehe Kapitel 4.4.3: Geometrische Fehler).

Farbfehler auf Grundlage eines unterschiedlichen Weißabgleichs sind ebenfalls durch die Aufzeichnung über ein Kamerasystem nicht vorhanden (siehe Kapitel 4.4.3: Farbfehler).

Schärfefehler lassen sich im Vergleich zu stereoskopischen Kamerasystemen bei Lichtfeldkameras nachträglich beheben. Generelle Schärfedifferenzen der stereoskopischen Sequenz sind in der Lichtfeldtechnik nicht möglich, da auch hier die Aufzeichnung über ein einzelnes Kamerasystem stattfindet (siehe Kapitel 4.4.3: Schärfefehler).

Retinale Rivalität ist abhängig von den Unterschieden in den Teilbildern. Da sich die Teilbilder bei Lichtfeldkameras aus einem Objektiv ergeben, gleichen sich die Ausrichtungen der Linse in beiden Teilbildern (siehe Kapitel 4.4.3: Retinale Rivalität). Blendenflecken entstehen aus diesem Grund in beiden Teilbildern gleichermaßen. Die retinale Rivalität gleicht sich für Blendenflecken aus. Reflexionen sind für Lichtfeldkameras in besonderer Weise ein Problem, da sie in dem 4D-Lichtfeld nicht berücksichtigt werden. Durch die Reflexionen des Lichtes an einer Oberfläche, wie beispielsweise dem menschlichen Auge, können Tiefeninformationen fehlinterpretiert werden. In Folge dessen entstehen Fehler in der 3D-Darstellung, die eine aufwendige Nachbearbeitung benötigen.

Pseudostereo kann wie bei den stereoskopischen Kameras durch das Vertauschen der Teilbilder auftreten (siehe Kapitel 4.4.3: Pseudostereo).

6. Empirische Untersuchung

Nach den bisherigen theoretischen Betrachtungen zur Lichtfeldtechnik wird im zweiten Teil der Arbeit empirisch untersucht, welchen Einfluss Lichtfeldkameras auf die Filmproduktionen in Deutschland haben. Da dem Autor keine vergleichbaren Studien zu diesem Thema bekannt sind, ist eine Einordnung in den Stand der Forschung nicht möglich.

6.1. Fragestellung und methodische Vorgehensweise

Auf Grundlage der theoretischen Auseinandersetzung mit Lichtfeldkameras und den gängigen Kamerasystemen (siehe Kapitel 4: Kamerasysteme und Kapitel 5: Lichtfeldkameras) wird eine empirische Untersuchung durchgeführt. Die Fragestellungen der empirischen Untersuchung ergeben sich aus der Gesamtfragestellung dieser Arbeit (siehe Kapitel 1: Einleitung) und lauten:

1. „Wie nehmen Lichtfeldkameras technischen Einfluss auf die zukünftige Kinetographie bei großen Filmproduktionen in Deutschland?“
2. „Welche Ansprüche haben Filmstudios an die aktuelle Kamera- und Lichtfeldtechnik?“

Auf Basis der Fragestellung ist die Untersuchung als Expertenbefragung konzipiert worden. Für diesen Forschungsansatz wird eine standardisierte Befragung in Form eines schriftlichen Fragebogens entwickelt. Um möglichst viele Experten erreichen zu können, wird die Untersuchung als Onlinebefragung gewählt. Die Methodik der Umfrage ist eine quantitative Datenerhebung. Qualitative Aspekte kommen nur zum Tragen, wenn für eine quantitative Angabe eine Begründung von Interesse ist.

6.2. Durchführung

Um möglichst viele Teilnehmer für die Umfrage zu erreichen, sollen zunächst Experten, Firmen und Verbänden per E-Mail angeschrieben werden. Um die Reichweite der Umfrage zu erhöhen, werden diese gebeten, die Anfrage an ihnen bekannte

Experten weiterzuleiten. Zur Sicherstellung der Expertise der Umfrageteilnehmer müssen Kontrollfragen in den Fragebogen integriert werden.

6.2.1. Fragebogenkonstruktion

Der Fragebogen wurde auf Basis der Forschungsfragen konstruiert und enthält Fragen zur Personengruppe, zur Plausibilisierung der Expertise, zu Anforderungen an dieameratechnik, zur Relevanz der Lichtfeldtechnik und der Bedeutung des 3D-Films für Filmproduktionen. Eine genaue Klassifizierung der einzelnen Fragen in die Fragengruppen findet sich in Anhang A.1. Die Fragen ergeben sich einerseits aus den theoretischen Überlegungen zu Kamerasystemen (siehe Kapitel 4: Kamerasysteme), zu Lichtfeldkameras (siehe Kapitel 5: Lichtfeldkameras) und zu stereoskopischen Kamerasystemen (siehe Kapitel 4.4: Stereoskopie), andererseits aus Kontrollfragen zur Verifikation der Expertise.

Im Bereich der Fragen zu den Personengruppen werden die relevanten Kerndaten zu den Personen abgefragt. Hierunter fallen die Angaben zum Alter, zu dem aktuellen Beruf und der Erfahrung im Umgang mit Kamerasystemen (siehe Anhang A.2). Die Angaben zum Alter der Personen dienen der Plausibilisierung der Berufserfahrung. Der aktuelle Beruf der Teilnehmer, sowie die Frage nach den Erfahrungen im Umgang mit Kamerasystemen dient der Verifizierung des Teilnehmers als geeigneter Experte im Bereich der Kamera- und Lichtfeldtechnik.

Neben dem Berufsfeld und der Erfahrung des Teilnehmers lässt sich die Expertise über die Frage nach dem Kamerasystem und der Sensorgröße, welches von den Teilnehmern in ihrem Alltagsgeschäft hauptsächlich verwendet wird, überprüfen. Die Kombination der Antwortmöglichkeiten lässt sich mit den technischen Daten der Kameras abgleichen. Die Gewissenhaftigkeit beim Ausfüllen der Umfrage lässt sich darüber feststellen.

Bei den Fragen zu den Anforderungen an dieameratechnik werden die aktuellen Anforderungen der Experten an die Videoauflösung, die Sensorgröße, die Bitrate, den Signal-Rausch-Abstand, die Effizienz und die Entwicklung dieser Anforderungen in den nächsten 5 Jahren abgefragt. Die Fragen dienen der technischen Einordnung der aktuellen und zukünftigen Anforderungen an dieameratechnik. Diese Einordnung dient als Grundlage, um den technischen Stand von Lichtfeldkameras (siehe Kapitel 5: Lichtfeldkameras) mit den Anforderungen vergleichen zu können.

Die Fragen zur Stereoskopie dienen ebenfalls der Einordnung der Lichtfeldkameras, allerdings mit den Anforderungen an die stereoskopischen Kamerasysteme. Zu diesen gehören die Fragen zur Rolle des 3D-Films in den Filmproduktionen der Teilnehmer,

die Einschätzungen der Bedeutung des 3D-Films in den nächsten Jahren und die Einschätzung der Einflüsse von Lichtfeldkameras auf die Stereoskopie.

Der letzte Fragenblock enthält konkrete Fragen zum Thema Lichtfeldkameras. Mit den Antworten der Teilnehmer sollen Lichtfeldkameras in die aktuelleameratechnik eingeordnet werden. Dazu wird direkt nach Einsatzmöglichkeiten von Lichtfeldkameras in Filmproduktionen gefragt. Da eine Expertise zum Thema Lichtfeldkameras bei den Befragten nicht vorausgesetzt werden kann, wird dieser Fragenblock nur Teilnehmern gezeigt, die nach eigenem Bekunden über ein Grundverständnis von Lichtfeldkameras verfügen.

6.2.2. Durchführung der Umfrage

Die Durchführung der Umfrage findet über die Survey42-Server der Hochschule Emden/Leer statt. Als Umfragesoftware dient LimeSurvey, eine freie Open-Source-Umfrage-Applikation der LimeSurvey GmbH [Lim20]. Die Umfrage wurde an insgesamt 65 Adressaten mit der Bitte zur Weitergabe an weitere Experten gesendet. Darunter fallen 6 Verbände und 59 Filmstudios in Deutschland. Die Datenerhebung erfolgte in einem Zeitraum vom 17.01.2020 bis 10.02.2020.

6.3. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Zur Auswertung der Daten wird der Datensatz aufbereitet und anschließend ausgewertet. Zunächst werden die Teilnehmer hinsichtlich ihrer Expertise bewertet. Die weitergehende Auswertung orientiert sich an den theoretischen Grundlagenkapiteln. Sie wird getrennt nach den Themen der Auflösung, der Sensorgröße, des Signal-Rauschabstandes, der Fokussierung und der Stereoskopie durchgeführt. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt jeweils direkt in diesen Abschnitten. Im Anschluss an die Auswertung werden die Ergebnisse reflektiert, und es wird ein Ausblick für zukünftige Forschungsthemen gegeben.

6.3.1. Datenaufbereitung

Für die Datenaufbereitung und Auswertung der Daten wurde die Limesurvey Umfragesoftware verwendet. An der Datenerhebung haben insgesamt $N_{Gesamt} = 75$ Personen teilgenommen, wovon $N_{Stichprobe} = 34$ Personen, die für die Auswertung verwendet werden. Das sind diejenigen Personen, die die Umfrage vollständig ausgefüllt haben (siehe Anhang A.3). Ausgeschlossen wurden Teilnehmer, die bis auf

über ihr Alter, ihren Beruf und ihre Berufserfahrung keine Angaben gemacht haben, sowie zwei korrupte Datensätze, bei denen die Timestamps fehlten. Die Expertise konnte für alle Teilnehmer der Stichprobe bestätigt werden. Die Antworten zu den Fragen zum Feedback, sowie die Fragen die Rückfragen an den Teilnehmer betreffen werden aufgrund des Datenschutzes aus der Auswertung ausgeschlossen.

6.3.2. Stichprobe

Im Folgenden werden die in der Stichprobe berücksichtigten Personen betrachtet. Das Alter des Teilnehmerkreises liegt zwischen 30 und 70 Jahren mit einem durchschnittlichen Alter von 48,5 Jahren.

Der Teilnehmerkreis verfügt über eine durchschnittliche Berufserfahrung von 24.3 Jahren mit einem Minimum von 10 Jahren und einem Maximum von 45 Jahren. Eine Berufserfahrung von 10 Jahren wird für die Fragen zurameratechnik und Stereoskopie als ausreichend für eine Expertise in diesen Bereichen bewertet.

Die Berufsverteilung der Umfrageteilnehmer ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Insgesamt haben 27 Kameramänner/-frauen, 4 Kameraassistenten/-innen, 1 Mediengestalter/-in, 1 Bildingenieur/-in und 1 Digital Imaging Specialist, der in der Abbildung unter Sonstiges fällt, teilgenommen.

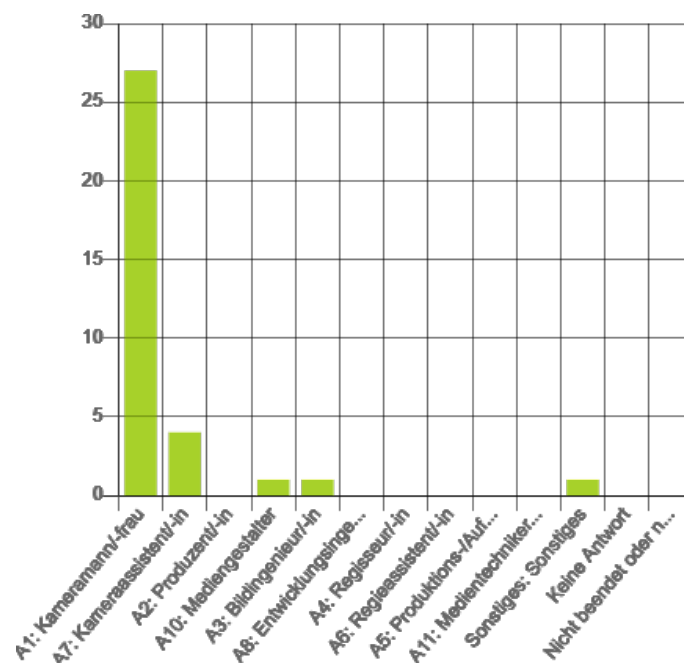


Abbildung 6.1.: Die Verteilung der Berufe der Umfrageteilnehmer

Die Berufsverteilung zeigt eine überdurchschnittliche Teilnahme von Kameramännern/-frauen an der Umfrage. Die Ursache dafür liegt darin, dass die angeschriebenen Ver-

bände eine Vielzahl an Mitgliedern aus diesem Berufsfeld haben. Die Verbandsmitglieder sind meist als Freelancer tätig und nicht an einzelne Filmstudios oder Filmprojekte gebunden. Dadurch lässt sich eine Unabhängigkeit bei der Beantwortung der Umfrage feststellen. Eine Unterscheidung zwischen den Berufen ist auf Grund der geringen Teilnehmerzahlen in den anderen Feldern nicht möglich. Dies ist in der Betrachtung und Auswertung der folgenden Fragen zu beachten. Die Expertise im Bereich der Kamera- und Lichtfeldtechnik kann auf Grundlage des Arbeitsalltages von Kameraleuten dennoch gewährleistet werden.

Um eine Expertise im Bereich der Lichtfeldtechnik gewährleisten zu können, werden die Umfrageteilnehmer gefragt, ob Sie über ein Grundverständnis zu Lichtfeldkameras verfügen. Die spezifischen Fragen zu der Lichtfeldtechnik werden nur Teilnehmern gestellt, die diese Frage mit „ja“ beantworten. Diese Frage haben 17 Umfrageteilnehmer positiv beantwortet. Das sind 50% der Stichprobe.

6.3.3. Ergebnisdarstellung

Die Forschungsergebnisse werden im Verlauf der Ergebnisdarstellung ausgewertet und mit den theoretischen Grundlagen verglichen.

Auflösung

Die Auflösung von Lichtfeldkameras ist durch die Beugungseffekte am Mikrolinsen-Array beschränkt (siehe Kapitel 5.3: Verarbeitung und Eigenschaften von Lichtfeldaufnahmen). Mit der Frage, welche Ansprüche an die Auflösung der heutigen Kameras gestellt werden, lässt sich überprüfen welche Auflösung Lichtfeldkameras abdecken müssen, um sie in der Kinematografie ohne Einschränkungen nutzen zu können.

Abbildung 6.2 zeigt die Verteilung der Auflösungen, wie sie bei deutschen Filmproduktionen zum Einsatz kommen. 11 Teilnehmer geben an, die Produktionen in Full-HD (1920x1080) zu filmen, 16 Teilnehmer geben an, ihre Filmproduktionen in 4K (3840x2160) zu filmen. Sieben Teilnehmer geben eine sonstige Auflösung an. Unter den sonstigen Auflösungen befinden sich zwei Personen die angeben in UHD zu filmen, zwei Personen die in Full HD und 4K filmen, 2 Personen die angeben, dass Sie in 2K und 4K filmen und 1 Person die angibt zwischen Full HD und 8K zu filmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich eine aktuelle Mindestanforderung für die deutsche Filmproduktion von Full-HD ergibt. 33 der 34 Befragten reicht eine Auflösung von 4K aus.

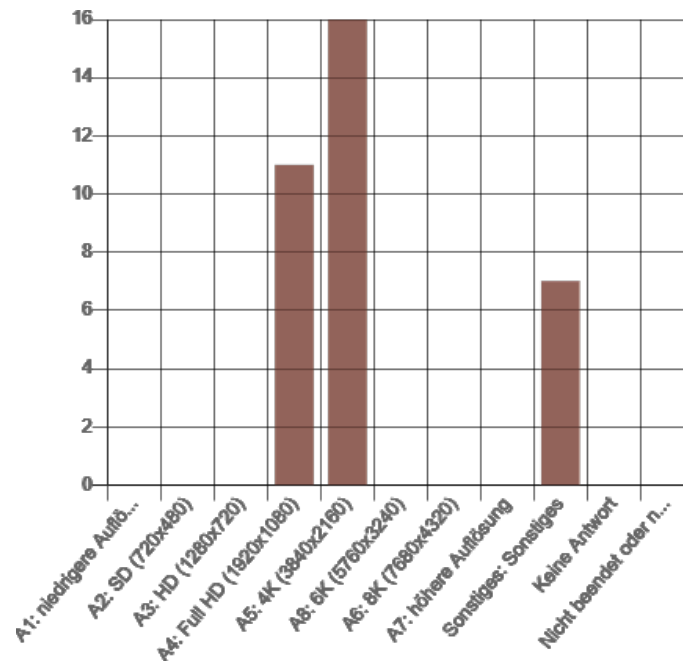


Abbildung 6.2.: Die Anforderungen an die Auflösung in Filmproduktionen

Ein weiterer Forschungsansatz behandelt die Frage, wie sich die Anforderungen in den nächsten Jahren entwickeln werden. Für diesen Ansatz lassen sich zwei Möglichkeiten formulieren.

Die erste Möglichkeit behandelt das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Dieser Ansatz ist ein durchaus kontrovers diskutiertes Thema, da das Sehvermögen der Einzelperson von vielen Faktoren abhängig ist. Für die Lichtfeldtechnik stellt dieser Ansatz jedoch eine relevante Grenze dar. Eine visuelle Auflösungsgrenze definiert ein mögliches Ziel für die Maximalauflösung, das für Kamerasysteme notwendig ist. Die Konkurrenzfähigkeit der Auflösung von Lichtfeldkameras gegenüber der Auflösung von gängigen Kamerasystemen kann sich so über die Entwicklung der Bildwandlertechnik und mittels Linsenoptimierungen und Softwarelösungen ergeben. Um eine genaue Grenze für die Sichtbarkeit von Auflösungen zu definieren, bedarf es einer umfassenden Studie zu diesem Thema. Eine mögliche Lösung könnte ein umfassender Probandentest liefern, bei dem die Probanden durch einen Blindtest mittels einer quantitativen Studie die Sichtbarkeit verschiedener Auflösungen bewerten. Eine Tendenz gibt uns die Frage, ob die Erhöhung der Videoauflösung seine Steigerung der Qualität des Films bedeutet.

Abbildung 6.3 zeigt, dass sich 72,7% der Stichprobe gegen eine Qualitätssteigerung durch Erhöhung der Auflösung aussprechen. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei dieser Befragung maximal um Tendenzen handeln kann, da eine Qualität des Film nicht grundsätzlich definiert werden kann. Vielmehr kann die Qualität von Fil-

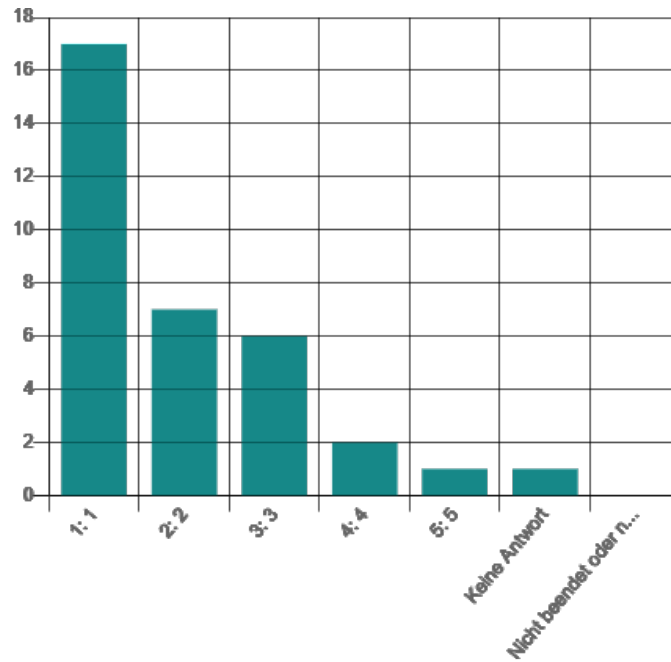


Abbildung 6.3.: Analyse, ob die Erhöhung der Videoauflösung eine Steigerung der Qualität des Films bedeutet.

men in verschiedenen technischen und künstlerischen Weisen gedeutet werden. Eine genauere Betrachtung auf Grundlage einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung ist notwendig.

Die zweite Möglichkeit behandelt eine marktanalytische Entwicklung der Auflösung. Die Anforderungen an die Lichtfeldtechnik sind demnach unmittelbar an die Entwicklungen auf dem Kameramarkt verknüpft, da sie unmittelbar mit dem Kameramarkt verglichen werden. Es stellt sich die Frage, warum die Filmschaffenden sich für eine bestimmte Auflösung entscheiden und wie sich die Anforderungen an die Auflösung in den kommenden Jahren entwickeln werden.

Abbildung 6.4 zeigt die Umfrageergebnisse zu den Entwicklungen der Auflösung in den kommenden 5 Jahren. Von insgesamt 34 Teilnehmern haben 17 Personen angegeben, dass sich Ihre Anforderungen an die Kameratechnik in Bezug auf die Auflösung ändern wird. Bei den 17 Personen erhöht sich die Anforderung an die Auflösung in den nächsten 5 Jahren auf eine Auflösung zwischen 4K und 8K. Diese Ergebnisse in Kombination mit den aktuellen Anforderungen an die Auflösung lässt darauf schließen, dass eine Auflösung von 4K in den nächsten 5 Jahren von Lichtfeldkameras erreicht werden muss, um in der Praxis nutzbar zu sein.

Auf die Frage, warum die Teilnehmer sich in Ihrem Anwendungsbereich für eine zuvor genannte Auflösung entscheiden, gaben 29 Personen eine Antwort. Von den 29 Personen gaben 17 Personen an, dass die Ursache dafür in den Vorgaben der Sender,

6. Empirische Untersuchung

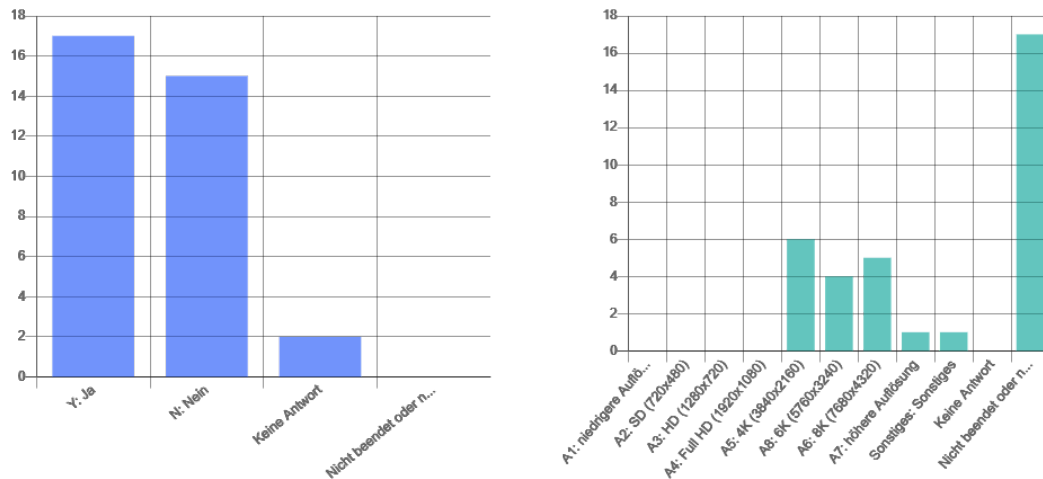


Abbildung 6.4.: Analyse, ob (links) und wie (rechts) sich die Anforderungen in den nächsten Jahren entwickeln werden.

Auftraggeber, Produzenten, Kinos, ect. liegt. 8 Personen gaben an, eine Auflösung zu wählen, um einen Spielraum für die Verwertung in der Post-Produktion zu haben. 4 Personen gaben an, dass eine Auflösung auf Grund der geringen Datenmenge gewählt wird. Es zeigt sich, dass die Vorgaben der Auftraggeber den Grund für die Wahl einer Videoauflösung dominieren. Eine genauere Aussage über den Grund für die Wahl der Auflösung des Auftraggebers lässt sich im Rahmen dieser Arbeit nicht treffen. Eine umfangreiche Marktanalyse könnte die Entwicklung der Auflösung in den nächsten Jahren aufzeigen. Es ergibt sich jedoch auf Grundlage der Umfrage die Tendenz, dass sich die Mindestanforderung in den nächsten Jahren auf eine 4K-Auflösung erhöhen wird.

Sensorgröße

Ein möglicher Lösungsansatz, um die Auflösung von Lichtfeldkameras zu erhöhen, ist es, die verwendeten Sensoren zu vergrößern. Aufgrund der Beugungseffekte an Mikrolinsen ist eine Verkleinerung der Linsen selbst nur bedingt möglich (siehe Kapitel 5.3.2: Auflösung). Es stellt sich die Frage, mit welchen Sensorgrößen in heutigen Filmproduktionen gearbeitet wird, um eine ideale Sensorgröße als Kompromiss aus Auflösung und Mobilität zu finden, und wie sich die Anforderungen an die Sensorgröße entwickeln. Die Umfrage zu diesem Bereich ergibt folgende Ergebnisse:

Abbildung 6.5 zeigt die aktuelle Verteilung von Sensorgrößen. Von insgesamt 34 Personen gab eine an, mit Micro Four Thirds Sensoren zu arbeiten. 8 Personen gaben an, mit APS-C Sensoren zu arbeiten. 16 Personen gaben an, mit Vollformatsensoren zu arbeiten, und 1 Person gab an, mit Mittelformatsensoren zu arbeiten. Unter

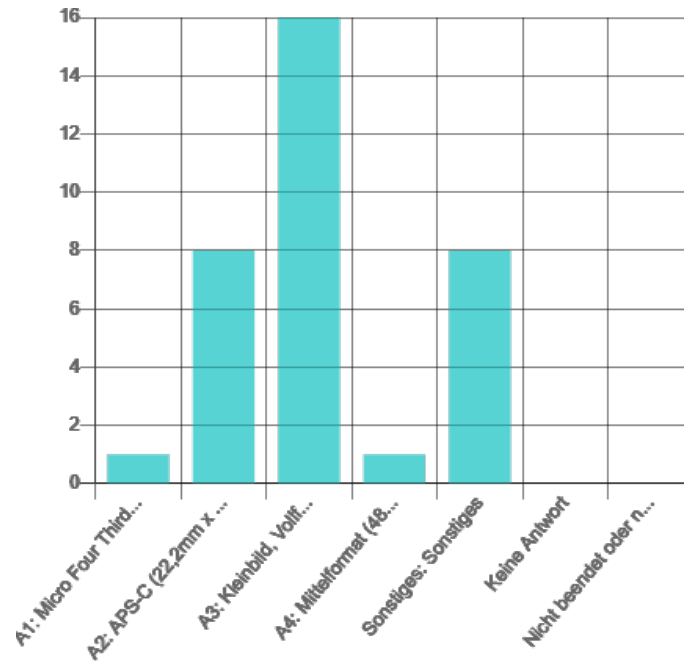


Abbildung 6.5.: Die aktuelle Anforderung an die Sensorgrößen

Sonstiges gaben 6 Personen an, mit Super 35 Sensoren zu arbeiten, und 2 Personen gaben an, 2/3 Zoll Sensoren zu verwenden.

Von den 34 Personen gaben 10 Personen an, dass sich Ihre Anforderungen an die Sensortechnik in den kommenden 5 Jahren verändern wird. Abbildung 6.6 zeigt die Verteilung der Auflösungsanforderungen dieser Personengruppe. Alle Personen erwarten eine Vergrößerung des Sensorformats.

Die Ergebnisse der aktuellen Sensorgröße zeigen eine Tendenz zum Vollformat-Sensor. Eine Prognose über die Entwicklung in den kommenden Jahren lässt sich nur bedingt stellen, da 10 Personen nicht für eine quantitative Auswertung ausreichen. Bei den sieben Personen, die einen Wechsel auf den Vollformat-Sensor in Betracht ziehen, ist jedoch eine Tendenz zu beobachten.

Die Vergrößerung der Sensoren von Lichtfeldkameras erhöht die Datenmenge erheblich. Mit einer Verdopplung der Sensorgröße vervierfacht sich die zu verarbeitende Datenmenge. Die Datenverarbeitung solcher Datenmengen bedarf leistungsstarker Computer und insbesondere leistungsstarker Speichermedien. Dies gilt es bei der Sensorgröße von Lichtfeldkameras zu beachten.

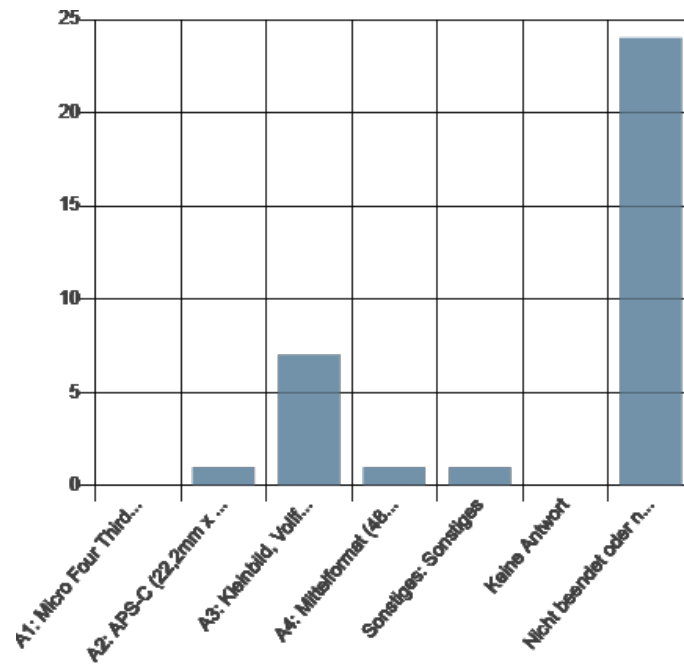


Abbildung 6.6.: Die zukünftige Anforderung an die Sensorgrößen

Signal-Rausch-Abstand

Der Signal-Rausch-Abstand ist ein wichtiges technisches Qualitätsmerkmal für den Film. Die Umfrageergebnisse von Abbildung 6.7 sowie die theoretischen Grundlagen (siehe Kapitel 4.2: Eigenschaften elektrischer Kameraelemente und Kapitel 5.3.5: Rauschverhalten) zum Signal-Rausch-Abstand bestätigen diese Annahme.

Die Ergebnisse auf die Frage, ob ein Signal-Rausch-Verhältnis die Qualität des Films steigern kann, zeigt trotz einer bereits sehr rauscharmenameratechnik (siehe Kapitel 4.2.3: Rauschempfindlichkeit von Kamerasystemen), dass die Möglichkeit die Schärfentiefe softwareseitig zu beeinflussen (siehe Kapitel 5.3.5: Rauschverhalten) die Qualität des deutschen Films verbessern kann. Gerade in dunklen Szenen, in denen eine hohe Tiefenschärfe gefordert ist, können Lichtfeldkameras die Qualität des Films maßgeblich verbessern.

Fokus

Ein großer Vorteil der Lichtfeldtechnik ist die Möglichkeit, den Fokusbereich nachträglich zu verändern (siehe Kapitel 5.3.4: Schärfe und Refokussierung). Es stellt sich jedoch die Frage, wie sehr diese Technologie im Filmgeschäft benötigt wird und ob sich ein Mehrwert trotz der Schwächen der Lichtfeldtechnik für Produzenten ergeben kann.

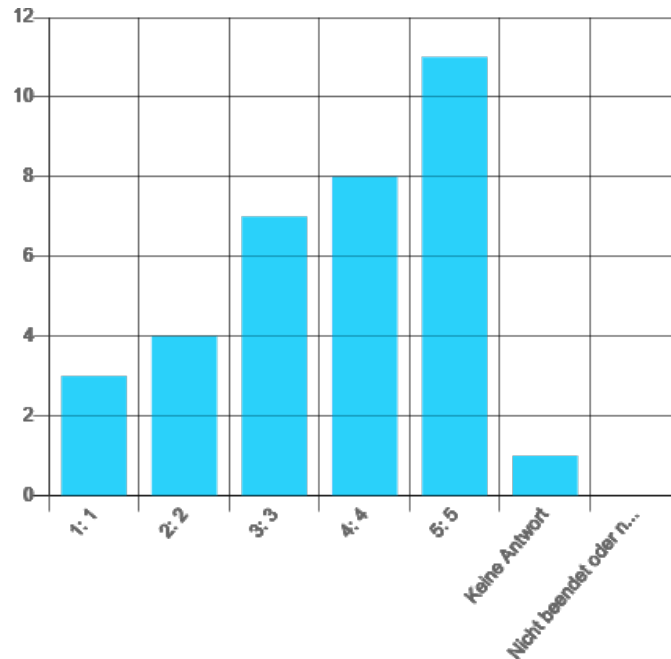


Abbildung 6.7.: Die Ergebnisse auf die Frage ob eine Steigerung des Signal-Rauschabstandes die Qualität des Films verbessern kann. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

Tabelle 6.1 zeigt die Angaben der Umfrageteilnehmer, wie oft Szenen aufgrund eines falsch gesetzten Fokus nachgedreht werden.

Aus den Antworten der 30 Teilnehmer ergibt sich ein Mittelwert von 3,2% mit einer Standardabweichung von 4,7%. Die große Standardabweichung könnte durch eine starke Abhängigkeit vom Einsatzgebiet der Kameras erklärt werden. Bei Anwendungsbereichen, wie der Tier-, Sport- und Actionkinematografie ist eine höhere Zahl an nachgedrehten Szenen zu erwarten, als beispielsweise bei Studioaufnahmen. Da das Einsatzgebiet der Kameras in dieser Umfrage nicht abgefragt wurde, lässt sich diese Hypothese mit den vorliegenden Daten nicht bestätigen. Unter der Annahme, dass diese Hypothese richtig ist, haben Anwendungsbereiche, die schnelle Fokuswechsel haben, einen Mehrwert von Lichtfeldkameras.

Ob Lichtfeldkameras die Qualität von Filmen oder die Arbeitsabläufe einer Filmproduktion verbessern können, zeigt sich in Abbildung 6.8.

11 von 17 Umfrageteilnehmer/-innen stimmen nicht oder stimmen eher nicht zu, dass Lichtfeldkameras die Qualität des Films verbessern. 13 von 17 Umfrageteilnehmer/-innen stimmen nicht oder stimmen eher nicht zu, dass die Möglichkeit nachträglich zu fokussieren die Arbeitsabläufe bei der Filmproduktion verbessert.

Die Ergebnisse der Umfrage machen deutlich, dass Lichtfeldkameras die Qualität des Films und die Arbeitsabläufe in Bezug auf die Fokussierung nur bedingt verbes-

6. Empirische Untersuchung

Nachgedrehte Szenen (Angabe in Prozent)	Anzahl der Antworten
0	13
1	4
2	3
4	1
5	3
7	1
10	4
20	1

Tabelle 6.1.: Die Häufigkeitsverteilung auf die Frage nach der Anzahl der nachgedrehten Szenen

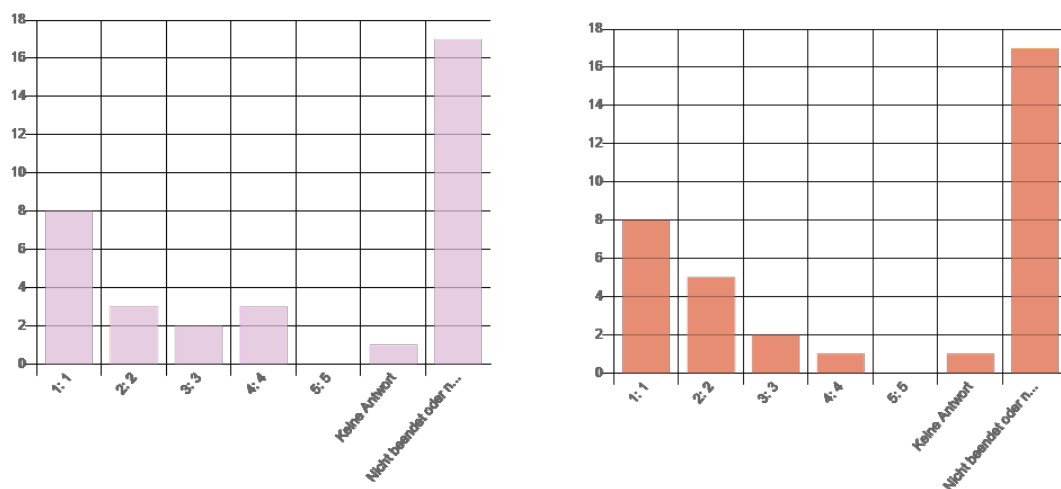


Abbildung 6.8.: Antwortverteilung zu der Aussage, ob nachträgliches Fokussieren die Qualität des Films verbessert (links) und, ob nachträgliches Fokussieren die Arbeitsabläufe bei der Filmproduktion verbessert (rechts) (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

sern. Es wird auch deutlich, dass eine Abhängigkeit vom Einsatzgebiet der Kamera bestehen kann. Dieser Eindruck bestätigt sich, da Lichtfeldkameras die Fokussierung in die Post-Produktion verlegen, sie aber nicht ersetzen können. Auch in der Post-Produktion bedarf es einer umfangreichen Nachbearbeitung, die auf Grund der wesentlich höheren Rechenleistung für Lichtfeldaufnahmen umfangreicher ausfallen muss. Gerade in Studioaufnahmen fällt die Zeitersparnis am Set nicht ins Gewicht, da Szenen meist vor Ort betrachtet und gegebenenfalls schnell nachgedreht werden können.

Einen echten Mehrwert kann die Lichtfeldtechnik bei Drehs bieten, die für einzelne Aufnahmen nur wenige Versuche haben oder anspruchsvolle Fokusänderungen beinhalten.

Stereoskopie

Ein großer Vorteil der Lichtfeldkameras ist die Minimierung der Abbildungsfehler in der Stereoskopie. Dadurch dass Lichtfeldkameras ein stereoskopisches Bild auf einen Sensor aufnehmen können, werden viele Fehlerquellen ausgeschlossen (siehe Kapitel 5.3.7: Stereoskopie). Lichtfeldkameras sind technisch in der Lage, die Stereoskopie zu vereinfachen. Die Umfrage bestätigt diese Hypothese tendenziell.

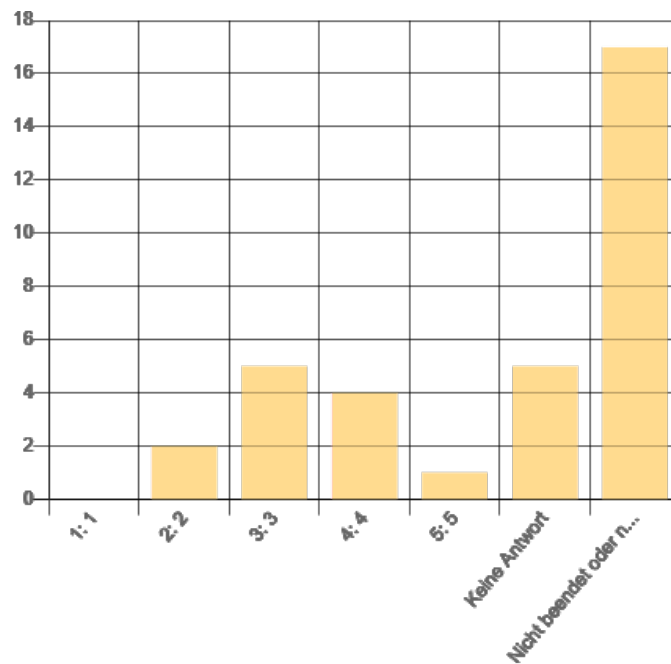


Abbildung 6.9.: Antwortverteilung zu der Aussage ob Lichtfeldkameras die 3D-Kinematografie vereinfachen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse zu der Aussage, ob Lichtfeldkameras die 3D-Kinematografie vereinfachen können. Insgesamt haben 12 Personen diese Frage beantwortet. 41 Prozent geben an, dass sie der Aussage eher oder voll zustimmen. 17 Prozent geben an, dass Sie der Aussage eher nicht zustimmen. Aufgrund der kleinen Stichprobe lässt sich nur eine Aussage über die Tendenz treffen. Die Tendenz bestätigt die Hypothese, dass Lichtfeldkameras die Stereoskopie vereinfachen.

An die Fragen, ob sich Lichtfeldkameras im Bereich der Stereoskopie zukünftig durchsetzen können, knüpft die Frage an, wie sich die 3D-Filmkultur allgemein in den nächsten Jahren entwickeln wird.

Abbildung 6.10 zeigt die Ergebnisse zu den Aussagen der Bedeutung des 3D-Films in den nächsten Jahren. Die Frage ob der 3D-Film in den nächsten Jahren an Bedeutung verlieren wird, haben 30 von 34 Personen beantwortet. Sieben Personen

6. Empirische Untersuchung

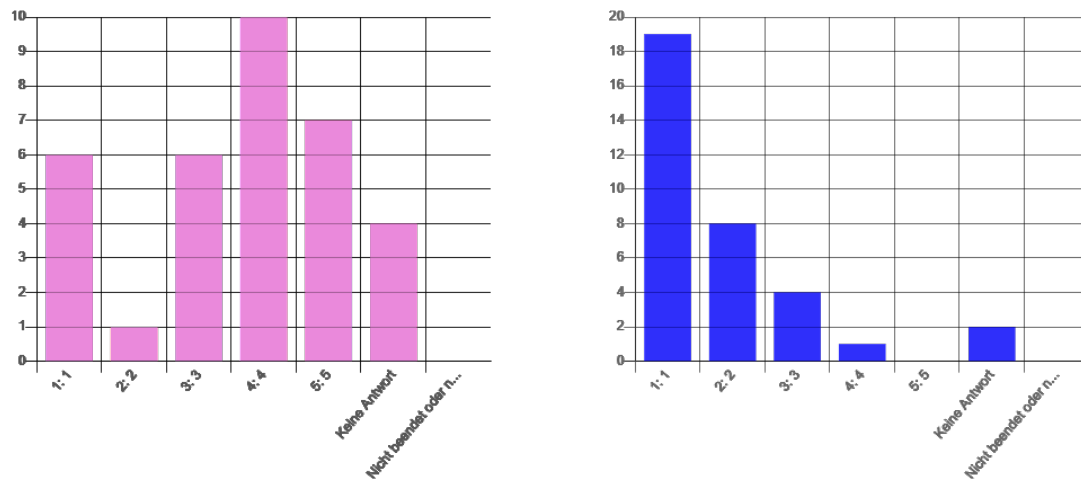


Abbildung 6.10.: Antwortverteilung zu der Aussage die Bedeutung des 3D-Films in den nächsten Jahren an Bedeutung verlieren (links) oder gewinnen (rechts) wird. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

sind der Meinung, dass dieses nicht oder eher nicht der Fall ist (23,3%), während 17 Personen dem zustimmen oder eher zustimmen (56,7%).

Die Gegenfrage ob der 3D-Film in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen wird, haben 32 von 34 Personen beantwortet. 27 Personen sind der Meinung, dass dieses nicht oder eher nicht der Fall ist (84,4%), während eine Person dem eher zustimmt (3,1%).

Die Ergebnisse zeigen, dass der 3D-Film in den kommenden Jahren an Bedeutung verlieren wird.

7. Reflexion

Die Durchführung der empirischen Untersuchung als Online-Befragung hat sich bewährt. Die Bitte um Weiterleitung der Anfrage hat zu einer Erhöhung der Teilnehmerzahl beigetragen. Auf diese Weise konnten deutlich mehr Teilnehmer erreicht werden als zunächst angenommen. Die Akquise der Teilnehmer per E-Mail, insbesondere an Verbände, hat im Falle der Kameralente zu einer überdurchschnittlich hohen Teilnehmerzahl geführt. Diese Teilnehmerzahl ist jedoch nicht für alle Berufsgruppen gleich hoch. Die Kameralente sind in der Umfrage deutlich überrepräsentiert. Eine bessere Verteilung der Berufsfelder ist für zukünftige Untersuchungen anzustreben.

Die Fragen zur Expertise haben in dieser Untersuchung zu keinem Ausschluss einzelner Teilnehmer geführt. Die Fragen waren dennoch notwendig, um den Nachweis zu führen, dass die Teilnehmer geeignet sind.

Die Antwortmöglichkeiten zu den Fragen der verwendeten Kameras und der Sensorgrößen waren unvollständig. Zu beiden Fragen sind eine Reihe von Kameras oder Sensorgrößen unter „Sonstiges“ angegeben worden. Durch eine Vorbefragung hätte man die Liste der Auswahlmöglichkeiten verbessern können.

Die Fragen zur Qualität des Films bieten verschiedene Interpretationsmöglichkeiten. Eine genauere Spezifizierung war aufgrund der deutlichen Antworten zwar nicht notwendig, wäre aber dennoch sinnvoll gewesen.

Da heutige Experten auf dem Gebiet derameratechnik sich nicht zwingend mit Lichtfeldkameras auseinandergesetzt haben müssen, ist die Frage, ob sich die Teilnehmer mit Lichtfeldkameras auskennen, zwingend notwendig. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Aussage der Teilnehmer vertraut. Eine Verifizierung zur Expertise zum Thema Lichtfeldkameras durch weitere Kontrollfragen wäre sinnvoll gewesen.

8. Fazit

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit lässt sich feststellen, dass Lichtfeldkameras eine Vielzahl an Vor- und Nachteilen zeigen. Die Lichtfeldtechnik ist eineameratechnik mit großem Potenzial aber auch wichtigen Forschungspunkten, die es zu lösen gilt. Die Kernaufgabe der Lichtfeldtechnik liegt in der Erhöhung der Auflösung. Nach aktuellem Forschungsstand können Lichtfeldkameras die Minimalanforderungen der Videoproduktionsfirmen nicht erfüllen. Die Umfrageergebnisse dieser Arbeit zeigen dies sehr eindeutig.

Es bleibt offen, ob die Lichtfeldtechnik die steigenden Anforderungen in den kommenden 5 Jahren erfüllen kann. Wenn sich die Anforderungen an die Auflösung von Kamerasystemen weiterhin am aktuellen Markt orientiert und grundsätzlich eine Verbesserung gefordert wird, dann haben Lichtfeldkameras mit heutiger Technologie keine Chance diese Maximalanforderungen zu erfüllen. Orientieren sich die Anforderungen aber am Auflösungsvermögen des menschlichen Auges als Obergrenze für die Auflösung von Kameras, dann können theoretisch auch Lichtfeldkameras diese Obergrenze erreichen.

Ein Lösungsansatz zur Erhöhung der Auflösung von Lichtfeldkameras ist die Vergrößerung der Bildsensoren. Für generelle Kamerasysteme zeigen die Umfrageergebnisse einen leichten Trend hin zu größeren Sensoren. Mit größeren Sensoren lässt sich bei Lichtfeldkameras die Anzahl der Mikrolinsen erhöhen, ohne die Größe der Linsen und damit die Beugungseffekte an der Linse zu beeinflussen.

Da Lichtfeldkameras im Vergleich zu konventionellen Kameras bei gleicher Auflösung einen wesentlich höheren Speicher- und Rechenbedarf haben, werden hohe Speicherkapazitäten, leistungsstarke Prozessoren, sowie optimierte Komprimierungsverfahren benötigt, um die anfallenden Datenmengen effektiv zu verarbeiten.

Die Datenmengen von Lichtfeldkameras sind in Bezug auf konventionelle Kameras zwar wesentlich größer, enthalten dafür aber auch zusätzliche Richtungsinformationen über das einfallende Licht. Mit diesen Zusatzinformationen können Abbildungsfehler und Störeffekte softwareseitig behoben werden. Darunter fallen sphärische und chromatische Aberrationen, Bildfeldwölbungen und Verzeichnungen.

Darüber hinaus können die Richtungsinformationen genutzt werden, um den Fokus softwareseitig zu verstellen und die Schärfentiefe unabhängig von der Blende zu erhöhen. Dadurch können Lichtfeldkameras den Signal-Rauschabstand erhöhen, wenn trotz schwach beleuchteter Szenen eine hohe Schärfentiefe gefordert ist.

Ein großes Potential zeigen Lichtfeldkameras in der 3D-Kinematografie. Viele der Störeffekte und Artefakte, die sich in stereoskopischen Kamerasystemen zeigen, sind in den Lichtfeldkameras ausgeschlossen. Die Ursache liegt vor allem in der Aufzeichnung der Tiefeninformationen über einen Sensor. Ob und wie Lichtfeldkameras sich in der Stereoskopie durchsetzen können, hängt auch von der zukünftigen Bedeutung des 3D-Films im Allgemeinen ab. Die Ergebnisse der Umfrage zeigen hier allerdings einen deutlichen Rückwärtstrend.

Generell nehmen Lichtfeldkameras technisch noch keinen Einfluss auf die aktuelle Kinematografie in Deutschland und können nicht mit der heutigenameratechnik mithalten. Auf Grund der aktuell stetig weiter wachsenden Anforderungen wird die Lichtfeldkamera dies in den kommenden Jahren wahrscheinlich auch noch nicht können. Dennoch bieten Lichtfeldkameras durch ihre innovativen Möglichkeiten einen neuen künstlerischen Spielraum, der vielleicht sogar eher als die gängigen Kamerasysteme ein Werkzeug der Filmschaffenden für kreative Momente sein kann.

9. Ausblick

Die Arbeit bietet verschiedene Anknüpfungspunkte zur weiteren Forschung. Ein wichtiger Aspekt der Lichtfeldtechnik ist der in Kapitel 6.3.3 angesprochene Aspekt zur Überprüfung des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges. Eine umfangreiche Studie zur Überprüfung des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges kann mittels eines Probandentests durchgeführt werden. Eine definierte visuelle Auflösungsgrenze kann dabei ausschlaggebend für die Konkurrenzfähigkeit von Lichtfeldkameras auf dem Kameramarkt sein, da die Auflösungen von gängigen Kamerasystemen nach aktuellem Kenntnisstand nicht erreicht werden können.

Lichtfeldkameras zeigen viele Vorteile in Bezug auf stereoskopische Kamerasysteme. Die Bedeutung des 3D-Films ist gleichzeitig ein bedeutender Aspekt für die Lichtfeldtechnik. Eine umfangreiche Studie zur Bedeutung des 3D-Films für die Kinetematografie ist ein weiterer wichtiger Ansatz, um die Relevanz der Lichtfeldtechnik auf dem Kameramarkt bewerten zu können.

Ein interessanter Ansatz ist die Betrachtung der Lichtfeldtechnik auf Grundlage der künstlerischen Aspekte der Filmproduktion. Innovationen wie die nachträgliche Fokussierung bringen neue künstlerische Möglichkeiten in der Filmproduktion hervor. Eine theoretische Betrachtung künstlerischer Aspekte in Kombination mit einer empirischen Anforderungsanalyse kann diese Arbeit ergänzen.

Der empirische Teil dieser Arbeit hat sich auf eine Umfrage in Deutschland beschränkt und die USA und Indien als wichtige Märkte für Filmproduktionen außer Acht gelassen. Eine Studie, die internationale Filmproduktionen berücksichtigt wäre sinnvoll um die Ergebnisse dieser Arbeit entweder zu bestätigen oder Unterschiede herauszuarbeiten.

A. Anhang

A.1. Übersicht

Frage	Fragengruppe	Skalierung
Wie alt sind sie?	Person	ordinal
Welchen Beruf üben Sie aktuell aus?	Person, Expertise	ordinal
Wie viel Erfahrung bringen Sie im Umgang mit heutigen Kamerasystemen mit?	Expertise	ordinal
Mit welchen der folgenden Kamerasysteme arbeiten Sie in Ihrem Alltagsgeschäft hauptsächlich?	Expertise	ordinal
Mit welcher Sensorgröße arbeiten Sie in ihrem Alltagsgeschäft?	Expertise,ameratechnik	ordinal
Welche Auflösungen verwenden Sie bei Ihren Filmproduktionen?	Kameratechnik	ordinal
Warum nutzen Sie in Ihrem Anwendungsbereich die zuvor genannte Auflösung?	Kameratechnik	ordinal
Wie oft müssen Sie aufgrund von falsch gesetztem Fokus Szenen nachdrehen? (Angabe in Prozent)	Lichtfeldtechnik	ordinal
Welche Rolle spielt der 3D-Film in ihren Filmproduktionen?	Stereoskopie	ordinal
Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre aktuellen Ansprüche?	Kameratechnik	ordinal
Wird sich Ihre Anforderung an die Videoauflösung in den nächsten 5 Jahren verändern?	Kameratechnik	ordinal
Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre Ansprüche in 5 Jahren?	Kameratechnik	ordinal
Welche Sensorgröße ist ideal für ihre aktuellen Ansprüche?	Kameratechnik	ordinal
Wird sich Ihre Anforderung an die Sensorgröße in den nächsten 5 Jahren verändern?	Kameratechnik	ordinal
Welche Sensorgröße ist ideal für Ihre Ansprüche in 5 Jahren?	Kameratechnik	ordinal
Verfügen Sie über ein Grundverständnis über Lichtfeldkameras?	Expertise, Lichtfeldtechnik	ordinal

Bewerten Sie die folgenden Aussagen.		
Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung gewinnen.	Stereoskopie	ordinal
Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung verlieren.	Stereoskopie	ordinal
Die Videoauflösung weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.	Kameratechnik, Lichtfeldtechnik	ordinal
Den Signal-Rauschabstand von Kameras weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.	Kameratechnik	ordinal
Die Bitrate von Kameras weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.	Kameratechnik, Lichtfeldtechnik	ordinal
Die Effizienz in der Filmproduktion zu steigern, steigert die Qualität des Films	Kameratechnik, Lichtfeldtechnik	ordinal
Lichtfeldkameras steigern die Effizienz von Filmproduktionen.	Lichtfeldtechnik	ordinal
Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren verbessert die Arbeitsabläufe bei einer Filmproduktion.	Lichtfeldtechnik	ordinal
Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren ergeben sich neue künstlerische Möglichkeiten.	Lichtfeldtechnik	ordinal
Lichtfeldkameras vereinfachen die 3D-Cinematografie	Stereoskopie, Lichtfeldtechnik	ordinal
Lichtfeldkameras werden sich gegenüber der Dual Camera Lösung für die 3D-Cinematografie durchsetzen.	Stereoskopie, Lichtfeldtechnik	ordinal
Zusätzliche Tiefeninformationen in Videosequenzen erleichtern die Nachbearbeitung des Bildmaterials.	Lichtfeldtechnik	ordinal
Lichtfeldkameras werden sich in den kommenden Jahren auf dem Kameramarkt durchsetzen.	Lichtfeldtechnik	ordinal

A.2. Fragen

Der Anhang der Umfrage wurde automatisch von dem Umfragetool generiert und manuell auf 2 Seiten pro A4 Seite skaliert. Sie zeigt die unveränderte Umfrage, wie Sie von den Teilnehmern durchgeführt wurde.

Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion

Sehr geehrte Teilnehmerinnen und Teilnehmer,

mein Name ist Jonas Stolzmann und ich bin Student der Medientechnik an der Hochschule Emden/Leer. Im Rahmen meiner Bachelorarbeit untersuche ich den Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion und benötige dafür Ihre Unterstützung. Betreut wird die Arbeit von Prof. Dr. Thomas Lemke. Diese Umfrage wird ungefähr 5-10 Minuten in Anspruch nehmen. An der Umfrage kann anonym teilgenommen werden. Ich versichere Ihnen, dass alle Ergebnisse vertraulich behandelt werden. Für Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Vielen Dank schon einmal im Voraus für Ihre Teilnahme.

Mit besten Grüßen,

Jonas Stolzmann

jonas.stolzmann@stud.hs-emden-leer.de

In dieser Umfrage sind 23 Fragen enthalten.

Fragen zur Person

Wie alt sind sie? *

❗ In diesem Feld darf nur ein ganzzahliger Wert eingetragen werden.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Welchen Beruf üben Sie aktuell aus? *

❗ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Kameramann/-frau
- ☐ Kameraassistent/-in
- ☐ Produzent/-in
- ☐ Mediengestalter
- ☐ Bildingenieur/-in
- ☐ Entwicklungsingenieur/-in
- ☐ Regisseur/-in
- ☐ Regieassistent/-in
- ☐ Produktions-/Aufnahmeleiter/-in
- ☐ Medientechniker/-in
- ☐ Sonstiges

Wie viel Erfahrung bringen Sie im Umgang mit heutigen Kamerasystemen mit? (Angabe in Jahren) *

❗ In dieses Feld dürfen nur Zahlen eingegeben werden.
Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Angaben zu Ihren Filmproduktionen

Mit welchen der Folgenden Kamerasystemen arbeiten Sie in Ihrem Alltagsgeschäft hauptsächlich?

❗ Bitte wählen Sie die zutreffenden Antworten aus:
Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- ☐ ARRI Alexa Mini LF
- ☐ ARRI Alexa LF
- ☐ ARRI Alexa SXT W
- ☐ ARRI Alexa Mini
- ☐ ARRI Amira
- ☐ RED DSCM2 MONSTRO 8K VV
- ☐ RED DSCM2 HELIUM 8K S35
- ☐ RED DSCM2 GEMINI 5K S35
- ☐ RED DSCM2 DRAGON-X 6K S35
- ☐ Panavision Panaflex Millennium
- ☐ Panavision Panaflex Panaflex Lightweight II
- ☐ Panavision Panaflex Large Format System 65
- ☐ Panavision Panaflex Platinum
- ☐ Panavision Panaflex XL2
- ☐ Panavision Panaflex Gold GII
- ☐ Sonstiges:

Mit welcher Sensorgröße arbeiten Sie in ihrem Alltagsgeschäft?

❗ Bitte wählen Sie die zutreffenden Antworten aus:

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- ☐ Micro Four Thirds (17,3mm x 13,0mm)
- ☐ APS-C (22,2mm x 14,8mm)
- ☐ Kleinbild, Vollformat (36,0mm x 24,0mm)
- ☐ Mittelformat (48,0mm x 36,0mm)

☐ Sonstiges:

Welche Auflösung verwenden Sie bei Ihren Filmproduktionen?

❗ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ niedrigere Auflösung
- ☐ SD (720x480)
- ☐ HD (1280x720)
- ☐ Full HD (1920x1080)
- ☐ 4K (3840x2160)
- ☐ 6K (5760x3240)
- ☐ 8K (7680x4320)
- ☐ höhere Auflösung

☐ Sonstiges:

10.2.2020

Survey42-Server der Hochschule Emden/Leer - Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion

Warum nutzen Sie in Ihrem Anwendungsbereich die zuvor genannte Auflösung?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Auf welche Bitrate (MBps) rendern Sie Ihre finalen Produkte aus?

❗ In dieses Feld dürfen nur Zahlen eingegeben werden.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

<https://survey42.hs-emden-leer.de/index.php/admin/printablesurvey/sa/index/surveyid/143653>

7/17

10.2.2020

Survey42-Server der Hochschule Emden/Leer - Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion

Wie oft müssen Sie aufgrund von falsch gesetztem Fokus Szenen nachdrehen? (Angabe in Prozent)

❗ In dieses Feld dürfen nur Zahlen eingegeben werden.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Welche Rolle spielt der 3D-Film in ihren Filmproduktionen?

(1 = nicht relevant; 5 = sehr relevant)

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ 1
☐ 2
☐ 3
☐ 4
☐ 5

Anforderungen an heutige Kamerasysteme

<https://survey42.hs-emden-leer.de/index.php/admin/printablesurvey/sa/index/surveyid/143653>

8/17

Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre aktuellen Ansprüche?

❗ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ niedrigere Auflösung
- ☐ SD (720x480)
- ☐ HD (1280x720)
- ☐ Full HD (1920x1080)
- ☐ 4K (3840x2160)
- ☐ 6K (5760x3240)
- ☐ 8K (7680x4320)
- ☐ höhere Auflösung
- ☐ Sonstiges

Wird sich Ihre Anforderung an die Videoauflösung in den nächsten 5 Jahren verändern?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre Ansprüche in 5 Jahren?

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '12 [Sensorzukunft]' (Wird sich Ihre Anforderung an die Videoauflösung in den nächsten 5 Jahren verändern?)

❗ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ niedrigere Auflösung
- ☐ SD (720x480)
- ☐ HD (1280x720)
- ☐ Full HD (1920x1080)
- ☐ 4K (3840x2160)
- ☐ 6K (5760x3240)
- ☐ 8K (7680x4320)
- ☐ höhere Auflösung
- ☐ Sonstiges

Welche Sensorgröße ist ideal für ihre aktuellen Ansprüche?**!** Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Micro Four Thirds (17,3mm x 13,0mm)
- ☐ APS-C (22,2mm x 14,8mm)
- ☐ Kleinbild, Vollformat (36,0mm x 24,0mm)
- ☐ Mittelformat (48,0mm x 36,0mm)
- ☐ Sonstiges

Wird sich Ihre Anforderung an die Sensorgröße in den nächsten 5 Jahren verändern?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Welche Sensorgröße ist ideal für ihre Ansprüche in 5 Jahren?

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '15 [Sensorzukunft2]' (Wird sich Ihre Anforderung an die Sensorgröße in den nächsten 5 Jahren verändern?)

! Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Micro Four Thirds (17,3mm x 13,0mm)
- ☐ APS-C (22,2mm x 14,8mm)
- ☐ Kleinbild, Vollformat (36,0mm x 24,0mm)
- ☐ Mittelformat (48,0mm x 36,0mm)
- ☐ Sonstiges

Welche Bitrate (MBps) erachten Sie als ideal für Ihren Film?**!** In dieses Feld dürfen nur Zahlen eingegeben werden.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Aussagenbewertung

Verfügen Sie über ein Grundverständnis über Lichtfeldkameras?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Bewerten Sie die folgenden Aussagen.

(1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	1	2	3	4	5
Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung gewinnen.	☐	☐	☐	☐	☐
Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung verlieren.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Videoauflösung weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.	☐	☐	☐	☐	☐
Den Signal-Rauschabstand von Kameras zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Bitrate von Kameras weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Effizienz in der Filmproduktion zu steigern, steigert die Qualität des Films.	☐	☐	☐	☐	☐

Bewerten Sie die folgenden Aussagen.

(1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '18 [Lichtfeldkameras]' (Verfügen Sie über ein Grundverständnis über Lichtfeldkameras?)

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	1	2	3	4	5
Lichtfeldkameras steigert die Effizienz von Filmproduktionen.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, verbessert die Qualität von Filmen.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, verbessert die Arbeitsabläufe bei einer Filmproduktion.	☐	☐	☐	☐	☐
Durch die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, ergeben sich neue künstlerische Möglichkeiten.	☐	☐	☐	☐	☐
Lichtfeldkameras vereinfachen die 3D-Cinematografie.	☐	☐	☐	☐	☐

	1	2	3	4	5
Lichtfeldkameras werden sich gegenüber der "Dual Camera" Lösung für 3D-Cinematografie durchsetzen.	☐	☐	☐	☐	☐
Zusätzliche Tiefeninformationen in Videosequenzen erleichtern die Nachbearbeitung des Bildmaterials.	☐	☐	☐	☐	☐
Lichtfeldkameras werden sich in den kommenden Jahren auf dem Kameramarkt durchsetzen.	☐	☐	☐	☐	☐

Feedback

Haben Sie Feedback zu der Umfrage?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Darf Ich für eventuellen Rückfragen auf Sie zu kommen?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Ja
☐ Nein

Für eventuelle Rückfragen möchte Ich Sie um Ihren Namen und eine Kontakt-Email bitten. Diese Informationen werden selbstverständlich vertraulich behandelt und fließen nicht in die Auswertung der Forschungsarbeit ein.

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '22 [Rueckfragen]' (Darf Ich für eventuellen Rückfragen auf Sie zu kommen?)

Liebe Teilnehmerinnen, liebe Teilnehmer,

Vielen Dank dass Sie mich bei meinen Forschungen mit ihren Antworten unterstützt haben. Wie bereits erwähnt werden alle Ergebnisse vertraulich behandelt. Bei Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Liebe Grüße, Jonas Stolzmann

Übermittlung Ihres ausgefüllten Fragebogens:

Vielen Dank für die Beantwortung des Fragebogens.

A.3. Antworten

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Ergebnisse

Umfrage 376924

Anzahl der Datensätze in dieser Abfrage:	34
Gesamtzahl der Datensätze dieser Umfrage:	34
Anteil in Prozent:	100.00%

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Alter

Wie alt sind sie?

Berechnung	Ergebnis
Anzahl	34
Summe	1650.000000
Standard Abweichung	8.86
Durchschnitt	48.53
Minimum	30.000000
1ter Viertelwert (Q1 unteres Quartil)	41.75
2ter Viertelwert (Mittleres Quartil)	50.5
3ter Viertelwert (Q3 Oberes Quartil)	54.5
Maximum	70.000000

Null-Werte werden in Berechnungen ausgelassen*Q1 und Q3 werden berechnet durch die minitab-Methode**

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Beruf

Welchen Beruf üben Sie aktuell aus?

Antwort	Anzahl	Prozent
Kameramann/-frau (A1)	27	79.41%
Kameraassistent/-in (A7)	4	11.76%
Produzent/-in (A2)	0	0.00%
Mediengestalter (A10)	1	2.94%
Bildingenieur/-in (A3)	1	2.94%
Entwicklungsingenieur/-in (A8)	0	0.00%
Regisseur/-in (A4)	0	0.00%
Regieassistent/-in (A6)	0	0.00%
Produktions-/Aufnahmeleiter/-in (A5)	0	0.00%
Medientechniker/-in (A11)	0	0.00%
Sonstiges	1	2.94%
Keine Antwort	0	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%

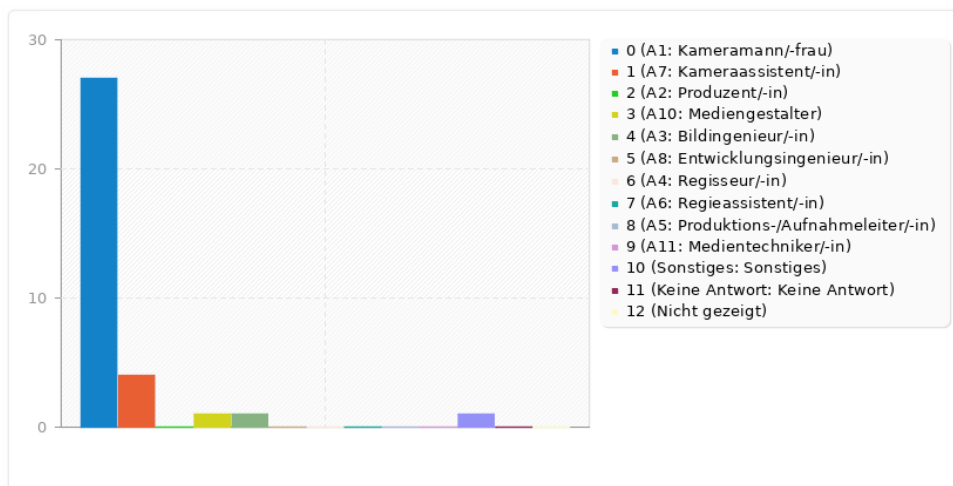
ID	Antwort
33	Digital Imaging Specialist / Colorist

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Beruf

Welchen Beruf üben Sie aktuell aus?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Erfahrung

Wie viel Erfahrung bringen Sie im Umgang mit heutigen Kamerasystemen mit? (Angabe in Jahren)

Berechnung	Ergebnis
Anzahl	34
Summe	825.000000
Standard Abweichung	9.07
Durchschnitt	24.26
Minimum	10.000000
1ter Viertelwert (Q1 unteres Quartil)	19.75
2ter Viertelwert (Mittleres Quartil)	25
3ter Viertelwert (Q3 Oberes Quartil)	30
Maximum	45.000000

***Null-Werte werden in Berechnungen ausgelassen**

Q1 und Q3 werden berechnet durch die minitab-Methode

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Kameranutzung

Mit welchen der Folgenden Kamerasystemen arbeiten Sie in Ihrem Alltagsgeschäft hauptsächlich?

Antwort	Anzahl	Prozent
ARRI Alexa Mini LF (SQ001)	11	32.35%
ARRI Alexa LF (SQ002)	8	23.53%
ARRI Alexa SXT W (SQ003)	15	44.12%
ARRI Alexa Mini (SQ004)	22	64.71%
ARRI Amira (SQ005)	18	52.94%
RED DSCM2 MONSTRO 8K VV (SQ006)	3	8.82%
RED DSCM2 HELIUM 8K S35 (SQ007)	5	14.71%
RED DSCM2 GEMINI 5K S35 (SQ008)	4	11.76%
RED DSCM2 DRAGON-X 6K S35 (SQ009)	6	17.65%
Panavision Panaflex Millennium (SQ010)	0	0.00%
Panavision Panaflex Panaflex Lightweight II (SQ011)	0	0.00%
Panavision Panaflex Large Format System 65 (SQ012)	0	0.00%
Panavision Panaflex Platinum (SQ013)	0	0.00%
Panavision Panaflex XL2 (SQ014)	0	0.00%
Panavision Panaflex Gold GII (SQ015)	0	0.00%
Sonstiges	17	50.00%

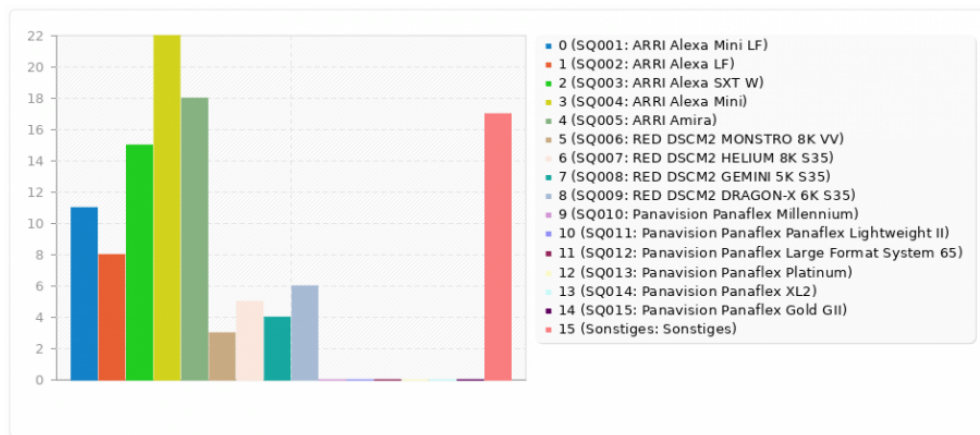
ID	Antwort
8	Sony FS7Mk2
9	panasonic varicam 35
12	diverse (Listenauswahl ist zumindest für den deutschen Markt wenig sinnvoll)
21	F55, FS7
27	U.a. Sony Fs7/Alpha7Mk3, Canon C300 ...
28	sony f55
30	Panasonic GH5 + GH5S
33	Sony Venice
35	BM Ursa Mini Pro G2
37	viele andere
53	C300 Mark II, Sony F5/55
57	Sony PDW 800
60	Arriflex, Sony
67	Sony FS7
68	Canon C300/Sony FS7
72	Sony FS7, Blackmagicdesign Kameras
77	sony fs7

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Kameranutzung

Mit welchen der Folgenden Kamerasystemen arbeiten Sie in Ihrem Alltagsgeschäft hauptsächlich?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensornutzung

Mit welcher Sensorgröße arbeiten Sie in ihrem Alltagsgeschäft?

Antwort	Anzahl	Prozent
Micro Four Thirds (17,3mm x 13,0mm) (SQ001)	6	17.65%
APS-C (22,2mm x 14,8mm) (SQ002)	17	50.00%
Kleinbild, Vollformat (36,0mm x 24,0mm) (SQ003)	19	55.88%
Mittelformat (48,0mm x 36,0mm) (SQ004)	2	5.88%
Sonstiges	10	29.41%

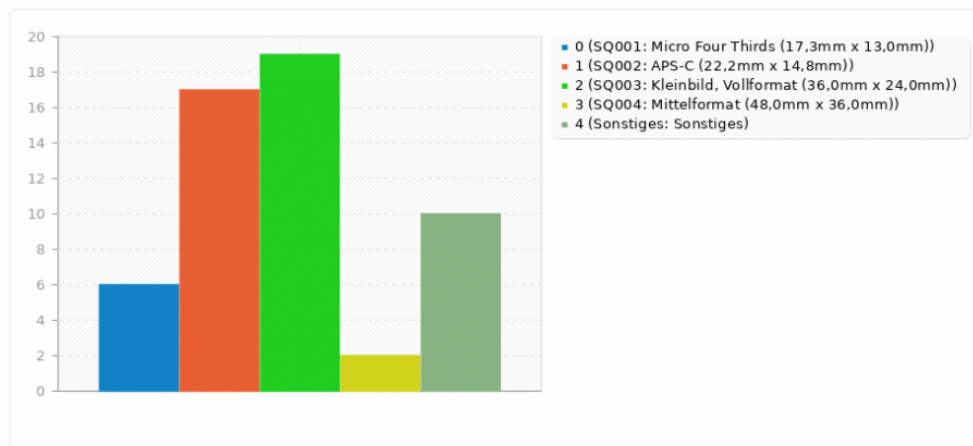
ID	Antwort
9	Super 35 und 2/3 Zoll
12	oder kleiner (auch hier gilt: Liste wenig den typischen deutschen Verhältnissen entsprechend)
19	Super 35
21	S35
35	S35
39	Super35 und Large Format
57	2/3 Zoll
67	S35
70	35mm
72	Teils mit künstlicher Vergrößerung des Sensors („Speedbooster“)

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensornutzung

Mit welcher Sensorgröße arbeiten Sie in ihrem Alltagsgeschäft?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Auflösungsnutzung

Welche Auflösung verwenden Sie bei Ihren Filmproduktionen?

Antwort	Anzahl	Prozent
niedrigere Auflösung (A1)	0	0.00%
SD (720x480) (A2)	0	0.00%
HD (1280x720) (A3)	0	0.00%
Full HD (1920x1080) (A4)	11	32.35%
4K (3840x2160) (A5)	16	47.06%
6K (5760x3240) (A8)	0	0.00%
8K (7680x4320) (A6)	0	0.00%
höhere Auflösung (A7)	0	0.00%
Sonstiges	7	20.59%
Keine Antwort	0	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%

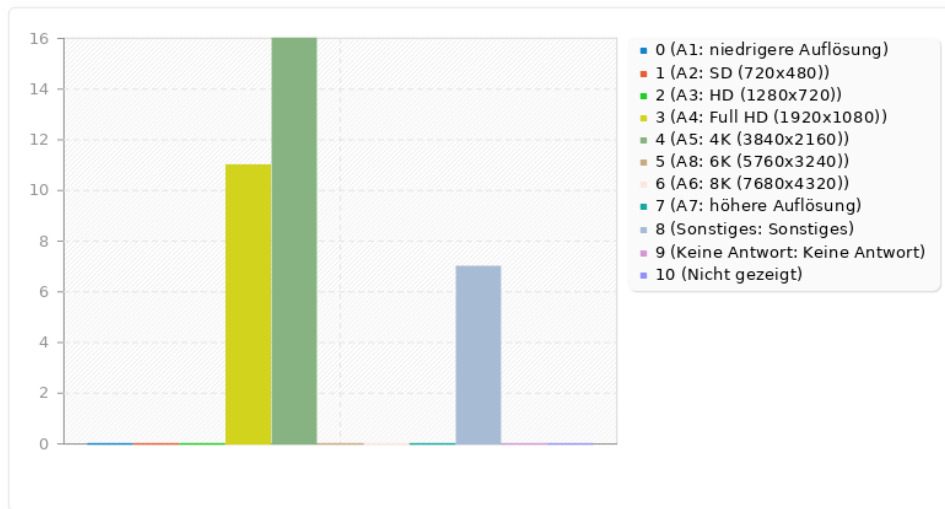
ID	Antwort
8	UHD
9	und UHD
35	2K, 3,2K, UHD
39	4k und full hd
40	2k und 4K hauptsächlich
69	zwischen Full HD und 8K
72	Full HD, 2K oder 4K

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Auflösungsnutzung

Welche Auflösung verwenden Sie bei Ihren Filmproduktionen?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Auflösungsnutzung2

Warum nutzen Sie in Ihrem Anwendungsbereich die zuvor genannte Auflösung?

Antwort	Anzahl	Prozent
Antwort	29	85.29%
Keine Antwort	5	14.71%
Nicht gezeigt	0	0.00%

ID	Antwort
8	Die Kunden fordern das. Zudem hilft UHD bei einer HD Auswertung ins Bild zu zoomen
9	Der Produzent gibt die Auflösung die seiner Vertriebskette entspricht vor.
12	FullHD: geringe Datenmenge, leicht zu handhaben, gute Qualität - entgegen der üblichen Meinung selbst für große Leinwände durchaus geeignet. oder 4K: bevorzugt für Kinowerbung und Industrie (wird vom Kunden gefordert, ist aber in der Praxis nur in wenigen Fällen sinnvoll)
19	In der Regel vollkommen ausreichend, ökonomische Gründe (Anzahl Medien für Kamera, Storage, Transferzeiten)
21	Reserve für Vergrößerungen, Stabilisierung
27	Für Fernsehformate/Dokumentarfilm meist HD (Workflow). Manchmal 4K, um bei Interviews eine nähere Einstellungsgröße im Schnitt zu generieren.
28	vorgabe der produktion
29	Sendervorgabe bzw. Vorgabe durch Agentur. 4k verwende ich am meisten, wenn mit Red gedreht wird auch oft 8k oder 7k R3D die dann in 4k ausgespielt werden.
30	Zukunftssichere Produktion für evtl. UHD-Standard; Crop-in bei der Nachbearbeitung für HD-Produktionen möglich; größerer Schreieindruck von UHD-Ausgangsmaterial, selbst bei HD-Nachbearbeitung
31	Anforderung des Verwerter
35	Produzentenvorgabe
37	Weil sie von Kunden gewünscht wird
38	Technische Anforderung von Sendern oder Streamingdiensten
39	Weniger ist heute nicht mehr vorzeigbar
40	2k, um in der Postproduktion noch etwas reinzucroppen (reinzoomen, falls z.B. der Boom mal im Bild sein sollte), ohne großartig größere Datenmengen zu produzieren. 4K bei jeweils besser budgetierten Produktionen als „Standardauflösung“ weil „die Kamera es hergibt“
45	für die Kinoauswertung
46	Anforderung der Sender und Verleiher
54	2K ausreichend für Kino
57	Ohne grosse umkonvertierung sendbares Material.
59	Ist ausreichend für deutsches TV; wird von den Sendern verlangt
60	Will der Kunde so, wechselt aber von Projekt zu Projekt zwischen HD, 4K ,RAW
61	Ich drehe immer mit der vollen Auflösung, die die jeweilige ARRI-Alexa bietet. Also zwischen ca. 2,3K und 3,6K
66	Vorgabe Auftraggeber.
67	4K ist inzwischen häufig das Abgabeformat. Wenn in geringerer Auflösung abgegeben werden soll, dann nutzen wir den Auflösungsüberschuss für mögliche Korrekturen.
69	Beim Dreh kommt es auf den Einsatzzweck an. Ausgehend von einer Full HD Delivery für einen TV-Film z.B. für ARD oder ZDF, reicht eine Aufzeichnung in 2K. Sollte der Aspekt für 4K Delivery wichtig sein, sollte die Aufzeichnung in 4-8K stattfinden. Je mehr VFX, desto höher die Auflösung und Qualität des Codecs.
70	Ich nutze natürlich unterschiedliche Auflösungen je nach Anforderung des Projektes. 4k kommt allerdings aktuell häufig vor, sei es um ein Master in 4k abzugeben, die zukünftige Verwertbarkeit zu gewährleisten oder die Möglichkeit des Reframings in der Post für Full HD zu ermöglichen.
72	Abwägung zwischen in der Postproduktion benötigter Auflösung und am Set managebarer Datenmenge
73	Aktuell ist UHD der Standard bei uns im Haus
77	sendervorgaben und stabiler, effektiver workflow

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Bitrate

Auf welche Bitrate (Mbps) rendern Sie Ihre finalen Produkte aus?

Berechnung	Ergebnis
Anzahl	14
Summe	3671.000000
Standard Abweichung	366.29
Durchschnitt	262.21
Minimum	0.000000
1ter Viertelwert (Q1 unteres Quartil)	50
2ter Viertelwert (Mittleres Quartil)	75
3ter Viertelwert (Q3 Oberes Quartil)	400
Maximum	1200.000000

***Null-Werte werden in Berechnungen ausgelassen**

Q1 und Q3 werden berechnet durch die minitab-Methode

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Nachdreh

Wie oft müssen Sie aufgrund von falsch gesetztem Fokus Szenen nachdrehen? (Angabe in Prozent)

Berechnung	Ergebnis
Anzahl	30
Summe	96.000000
Standard Abweichung	4.65
Durchschnitt	3.2
Minimum	0.000000
1ter Viertelwert (Q1 unteres Quartil)	0
2ter Viertelwert (Mittleres Quartil)	1
3ter Viertelwert (Q3 Oberes Quartil)	5
Maximum	20.000000

Null-Werte werden in Berechnungen ausgelassen*Q1 und Q3 werden berechnet durch die minitab-Methode**

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Film3D

Welche Rolle spielt der 3D-Film in ihren Filmproduktionen? (1 = nicht relevant; 5 = sehr relevant)

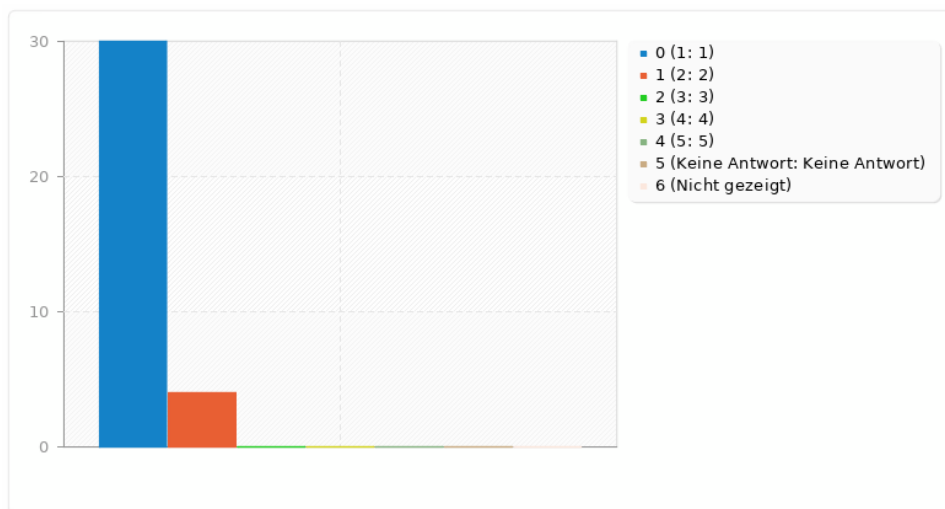
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	30	88.24%	100.00%
2 (2)	4	11.76%	
3 (3)	0	0.00%	0.00%
4 (4)	0	0.00%	
5 (5)	0	0.00%	0.00%
Keine Antwort	0	0.00%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	1.12		
Standard Abweichung	0.33		
Summe (Antworten)	34	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Film3D

Welche Rolle spielt der 3D-Film in ihren Filmproduktionen? (1 = nicht relevant; 5 = sehr relevant)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensoraufloesung

Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre aktuellen Ansprüche?

Antwort	Anzahl	Prozent
niedrigere Auflösung (A1)	0	0.00%
SD (720x480) (A2)	0	0.00%
HD (1280x720) (A3)	0	0.00%
Full HD (1920x1080) (A4)	6	17.65%
4K (3840x2160) (A5)	19	55.88%
6K (5760x3240) (A8)	4	11.76%
8K (7680x4320) (A6)	1	2.94%
höhere Auflösung (A7)	0	0.00%
Sonstiges	4	11.76%
Keine Antwort	0	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%

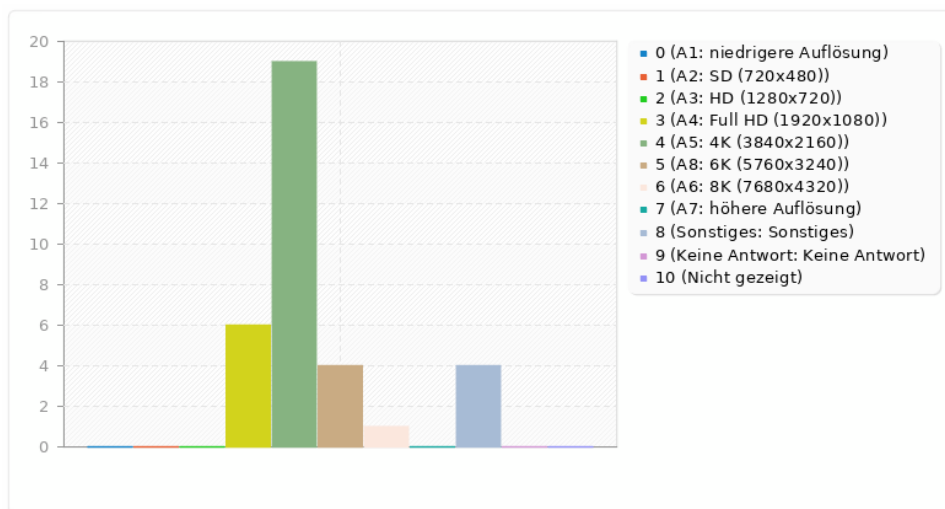
ID	Antwort
8	UHD
40	2k
54	2K
70	Full HD und 4K

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensoraufloesung

Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre aktuellen Ansprüche?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensorzukunft

Wird sich Ihre Anforderung an die Videoauflösung in den nächsten 5 Jahren verändern?

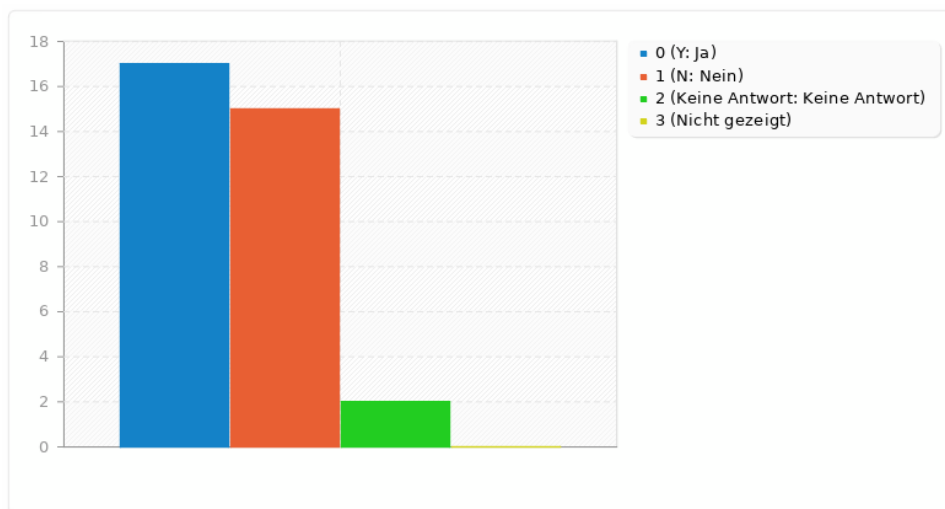
Antwort	Anzahl	Prozent
Ja (Y)	17	50.00%
Nein (N)	15	44.12%
Keine Antwort	2	5.88%
Nicht gezeigt	0	0.00%

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensorzukunft

Wird sich Ihre Anforderung an die Videoauflösung in den nächsten 5 Jahren verändern?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Zukunftaufloesung

Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre Ansprüche in 5 Jahren?

Antwort	Anzahl	Prozent
niedrigere Auflösung (A1)	0	0.00%
SD (720x480) (A2)	0	0.00%
HD (1280x720) (A3)	0	0.00%
Full HD (1920x1080) (A4)	0	0.00%
4K (3840x2160) (A5)	6	17.65%
6K (5760x3240) (A8)	4	11.76%
8K (7680x4320) (A6)	5	14.71%
höhere Auflösung (A7)	1	2.94%
Sonstiges	1	2.94%
Keine Antwort	0	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%

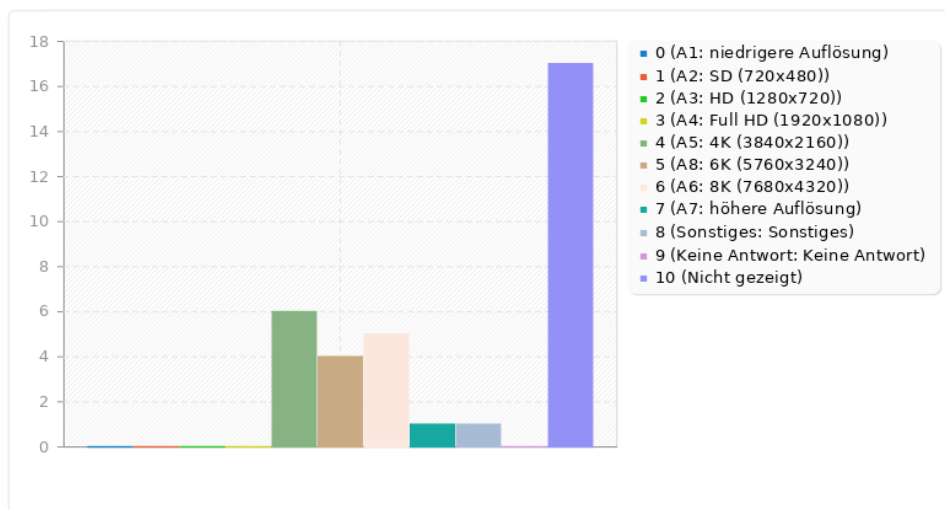
ID	Antwort
8	UHD

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Zukunftsaufloesung

Welche Videoauflösung ist ideal für Ihre Ansprüche in 5 Jahren?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensorgroesse

Welche Sensorgröße ist ideal für ihre aktuellen Ansprüche?

Antwort	Anzahl	Prozent
Micro Four Thirds (17,3mm x 13,0mm) (A1)	1	2.94%
APS-C (22,2mm x 14,8mm) (A2)	8	23.53%
Kleinbild, Vollformat (36,0mm x 24,0mm) (A3)	16	47.06%
Mittelformat (48,0mm x 36,0mm) (A4)	1	2.94%
Sonstiges	8	23.53%
Keine Antwort	0	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%

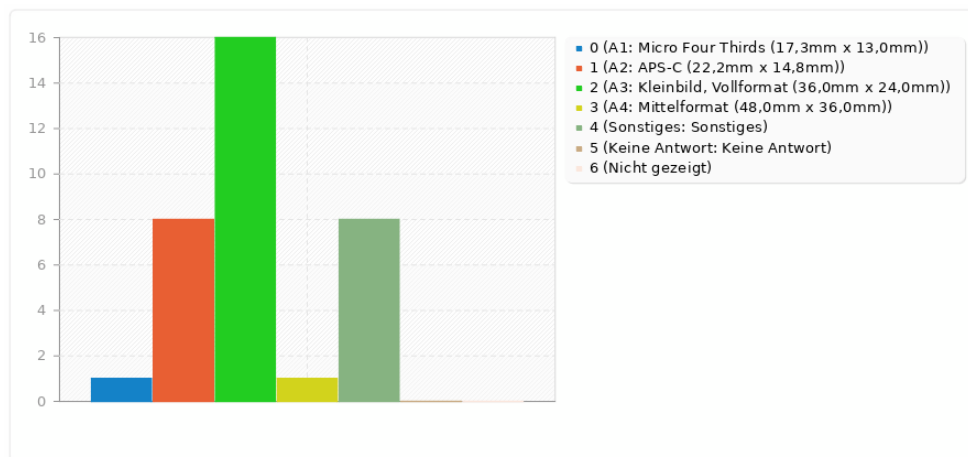
ID	Antwort
9	Zur Zeit 2/3 Zoll
19	Super 35
21	S35
39	Super35
57	2/3 Zoll
67	S35
68	Arri Mini Sensor Grosse
70	35mm

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensorgroesse

Welche Sensorgröße ist ideal für ihre aktuellen Ansprüche?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensorzukunft2

Wird sich Ihre Anforderung an die Sensorgröße in den nächsten 5 Jahren verändern?

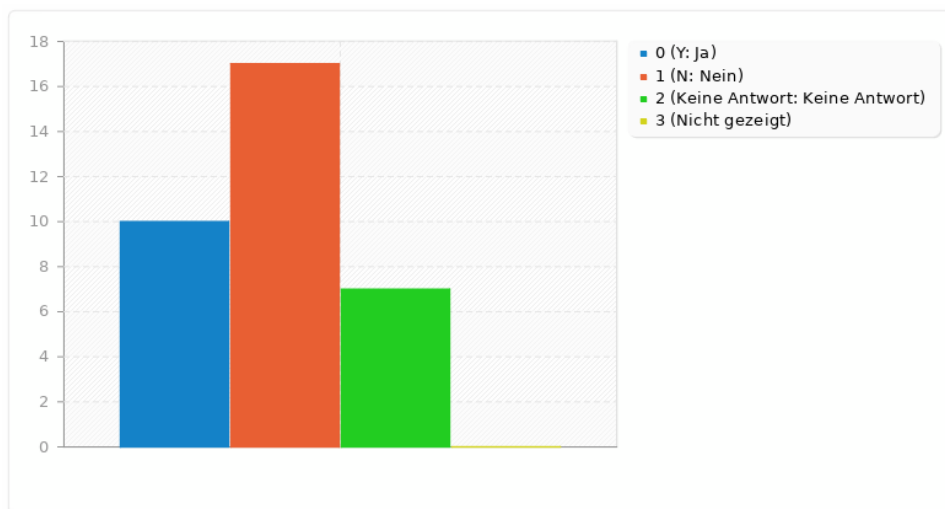
Antwort	Anzahl	Prozent
Ja (Y)	10	29.41%
Nein (N)	17	50.00%
Keine Antwort	7	20.59%
Nicht gezeigt	0	0.00%

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Sensorzukunft2

Wird sich Ihre Anforderung an die Sensorgröße in den nächsten 5 Jahren verändern?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Zukunftaufloesung2

Welche Sensorgröße ist ideal für ihre Ansprüche in 5 Jahren?

Antwort	Anzahl	Prozent
Micro Four Thirds (17,3mm x 13,0mm) (A1)	0	0.00%
APS-C (22,2mm x 14,8mm) (A2)	1	2.94%
Kleinbild, Vollformat (36,0mm x 24,0mm) (A3)	7	20.59%
Mittelformat (48,0mm x 36,0mm) (A4)	1	2.94%
Sonstiges	1	2.94%
Keine Antwort	0	0.00%
Nicht gezeigt	24	70.59%

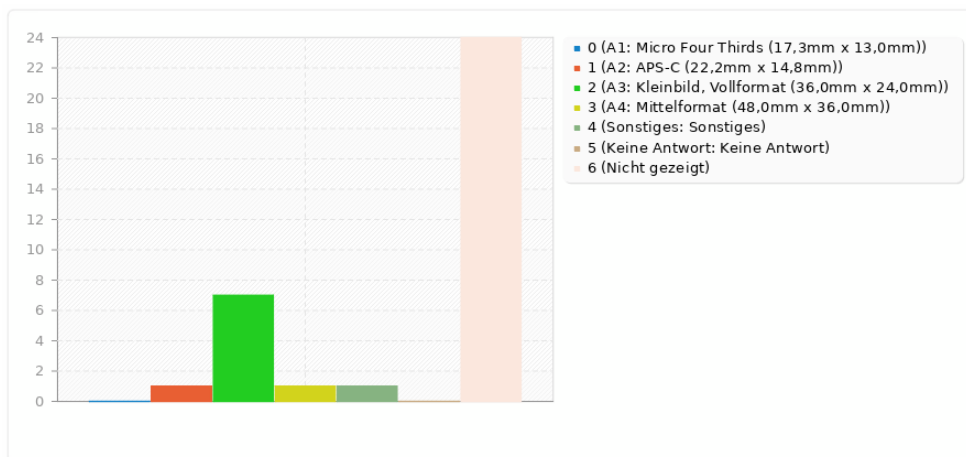
ID	Antwort
33	Large Format

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Zukunftsaufloesung2

Welche Sensorgröße ist ideal für ihre Ansprüche in 5 Jahren?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Bitrate2

Welche Bitrate (MBps) erachten Sie als ideal für Ihren Film?

Berechnung	Ergebnis
Anzahl	18
Summe	4334.000000
Standard Abweichung	242.81
Durchschnitt	240.78
Minimum	0.000000
1ter Viertelwert (Q1 unteres Quartil)	87.5
2ter Viertelwert (Mittleres Quartil)	200
3ter Viertelwert (Q3 Oberes Quartil)	410
Maximum	1000.000000

***Null-Werte werden in Berechnungen ausgelassen**

Q1 und Q3 werden berechnet durch die minitab-Methode

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Lichtfeldkameras

Verfügen Sie über ein Grundverständnis über Lichtfeldkameras?

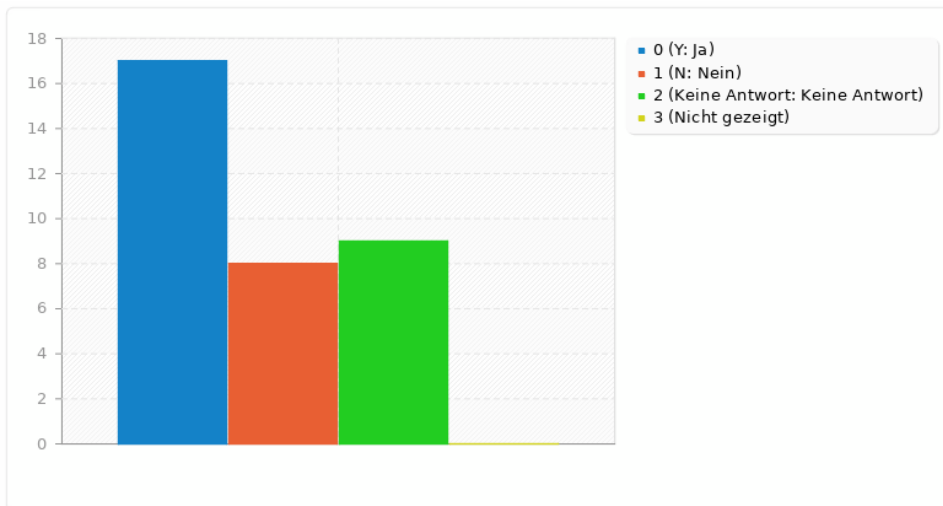
Antwort	Anzahl	Prozent
Ja (Y)	17	50.00%
Nein (N)	8	23.53%
Keine Antwort	9	26.47%
Nicht gezeigt	0	0.00%

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Lichtfeldkameras

Verfügen Sie über ein Grundverständnis über Lichtfeldkameras?



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ005)[Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung gewinnen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

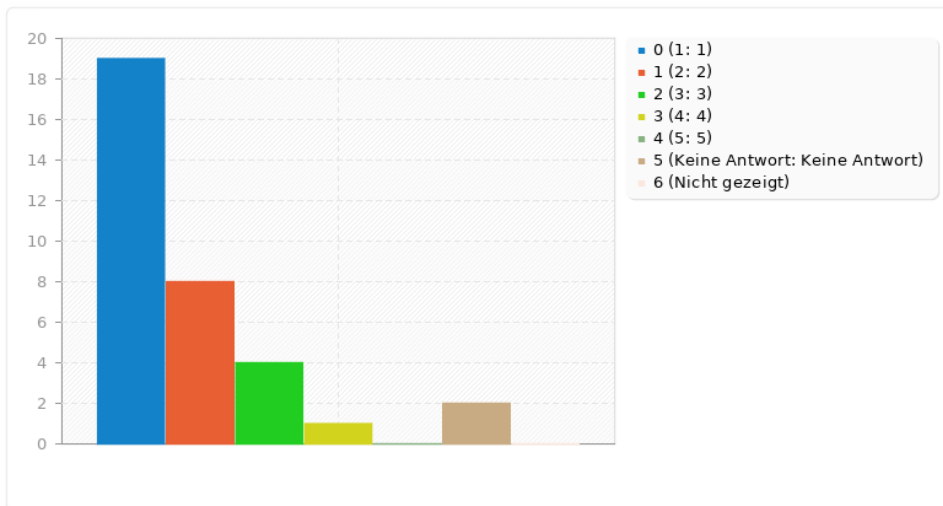
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	19	59.38%	84.38%
2 (2)	8	25.00%	
3 (3)	4	12.50%	12.50%
4 (4)	1	3.12%	
5 (5)	0	0.00%	3.12%
Keine Antwort	2	5.88%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	1.59		
Standard Abweichung	0.84		
Summe (Antworten)	32	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ005)[Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung gewinnen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ006)[Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung verlieren.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

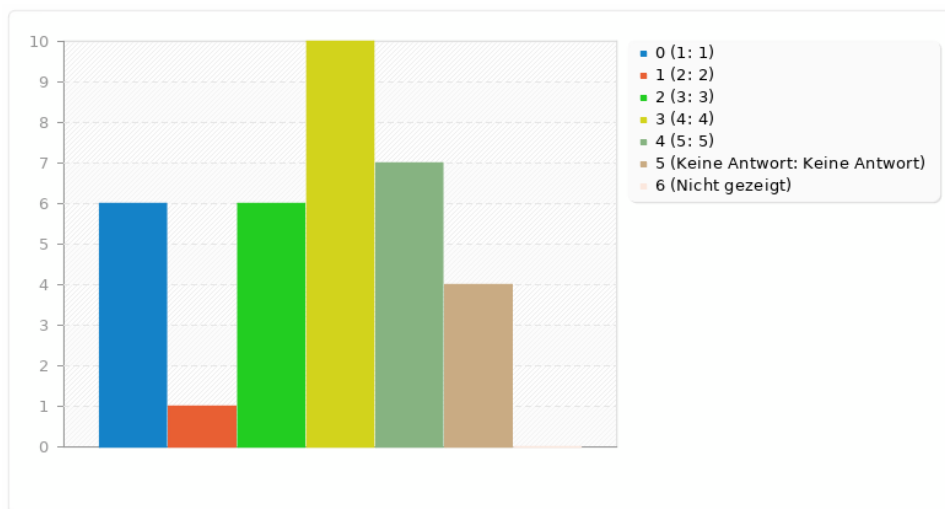
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	6	20.00%	23.33%
2 (2)	1	3.33%	
3 (3)	6	20.00%	20.00%
4 (4)	10	33.33%	
5 (5)	7	23.33%	56.67%
Keine Antwort	4	11.76%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	3.37		
Standard Abweichung	1.43		
Summe (Antworten)	30	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ006)[Der 3D-Film wird in den nächsten 10 Jahren an Bedeutung verlieren.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ007)[Die Videoauflösung weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

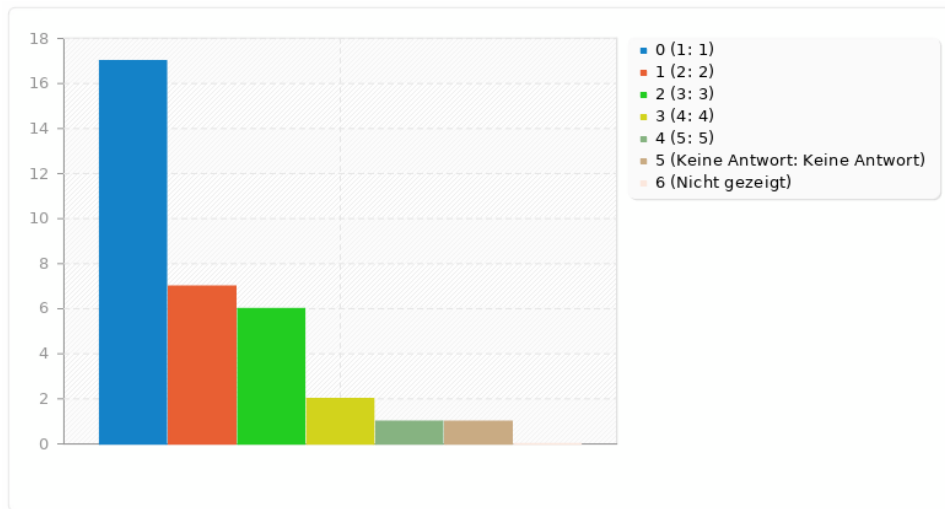
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	17	51.52%	72.73%
2 (2)	7	21.21%	
3 (3)	6	18.18%	18.18%
4 (4)	2	6.06%	
5 (5)	1	3.03%	9.09%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	1.88		
Standard Abweichung	1.11		
Summe (Antworten)	33	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ007)[Die Videoauflösung weiter zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ008)[Den Signal-Rauschabstand von Kameras zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

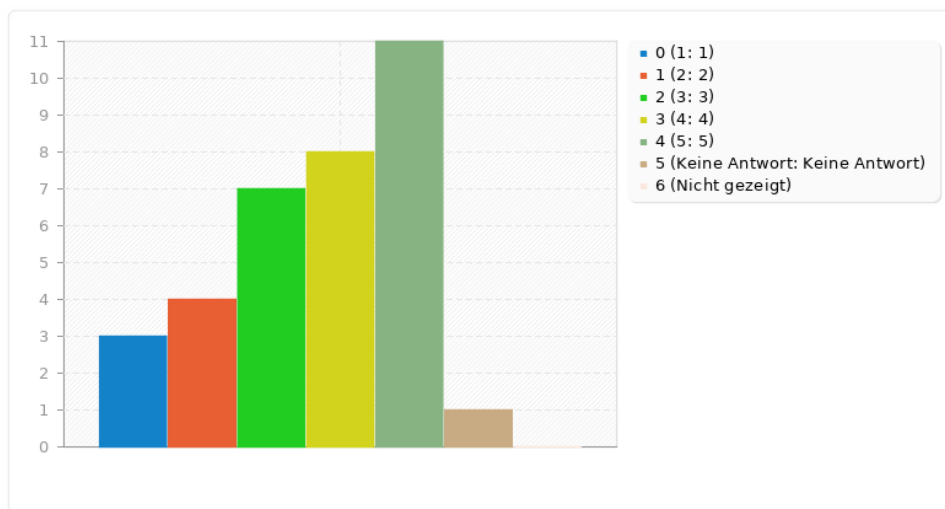
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	3	9.09%	21.21%
2 (2)	4	12.12%	
3 (3)	7	21.21%	21.21%
4 (4)	8	24.24%	
5 (5)	11	33.33%	57.58%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	3.61		
Standard Abweichung	1.32		
Summe (Antworten)	33	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ008)[Den Signal-Rauschabstand von Kameras zu erhöhen, steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ009)[Die Bitrate von Kameras weiter zu erhöhen,
steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

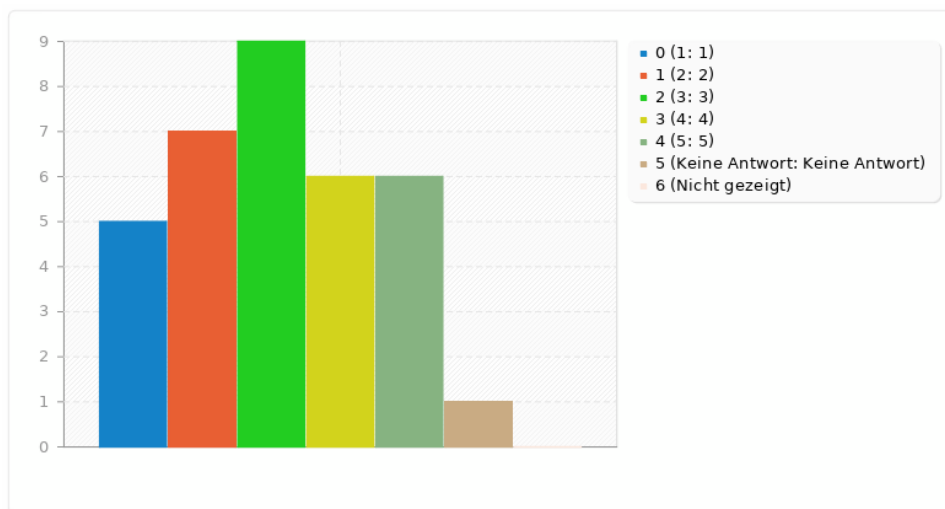
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	5	15.15%	36.36%
2 (2)	7	21.21%	
3 (3)	9	27.27%	27.27%
4 (4)	6	18.18%	
5 (5)	6	18.18%	36.36%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	3.03		
Standard Abweichung	1.33		
Summe (Antworten)	33	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ009)[Die Bitrate von Kameras weiter zu erhöhen,
steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ010)[Die Effizienz in der Filmproduktion zu steigern, steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

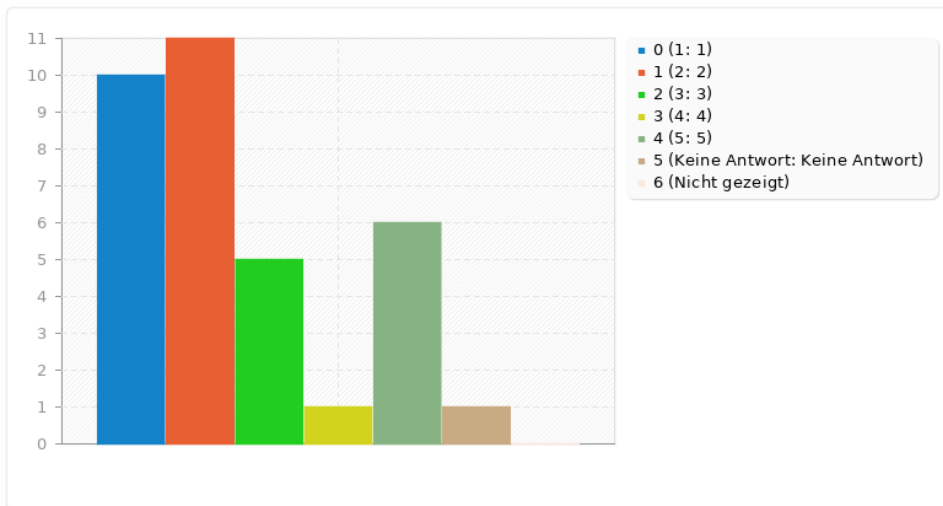
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	10	30.30%	63.64%
2 (2)	11	33.33%	
3 (3)	5	15.15%	15.15%
4 (4)	1	3.03%	
5 (5)	6	18.18%	21.21%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	0	0.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	2.45		
Standard Abweichung	1.44		
Summe (Antworten)	33	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen(SQ010)[Die Effizienz in der Filmproduktion zu steigern,
steigert die Qualität des Films.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ001)[Lichtfeldkameras steigert die Effizienz von Filmproduktionen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

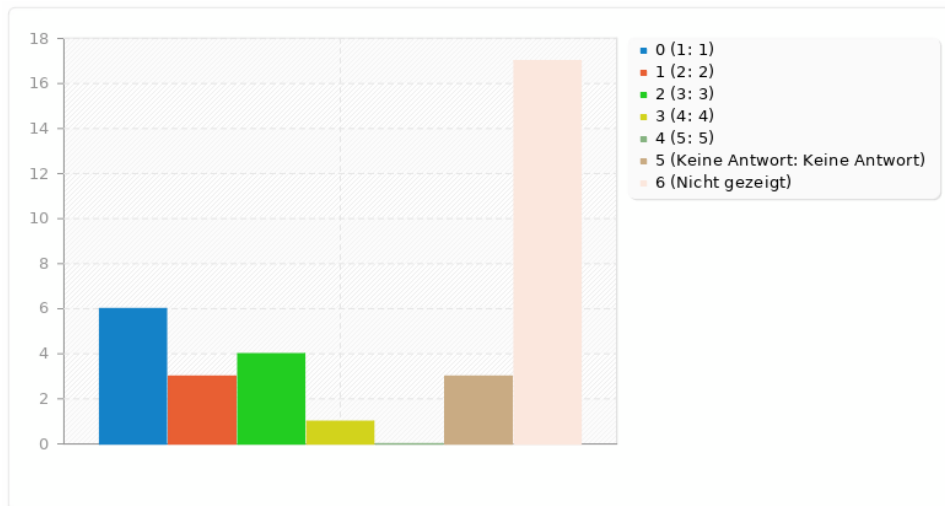
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	6	42.86%	64.29%
2 (2)	3	21.43%	
3 (3)	4	28.57%	28.57%
4 (4)	1	7.14%	
5 (5)	0	0.00%	7.14%
Keine Antwort	3	8.82%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	2		
Standard Abweichung	1.04		
Summe (Antworten)	14	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ001)[Lichtfeldkameras steigert die Effizienz von Filmproduktionen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ002)[Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras
nachträglich zu fokussieren, verbessert die Qualität von Filmen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

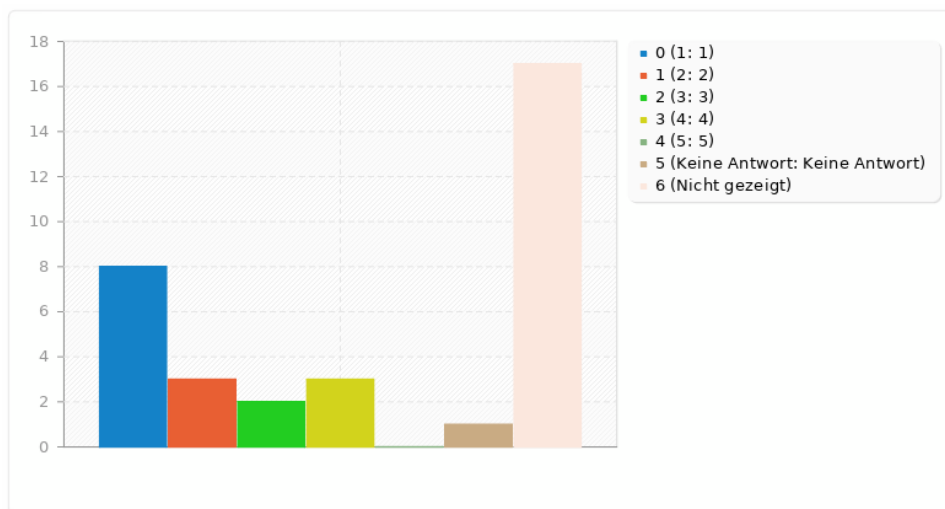
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	8	50.00%	68.75%
2 (2)	3	18.75%	
3 (3)	2	12.50%	12.50%
4 (4)	3	18.75%	
5 (5)	0	0.00%	18.75%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	2		
Standard Abweichung	1.21		
Summe (Antworten)	16	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ002)[Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, verbessert die Qualität von Filmen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ003)[Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, verbessert die Arbeitsabläufe bei einer Filmproduktion.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

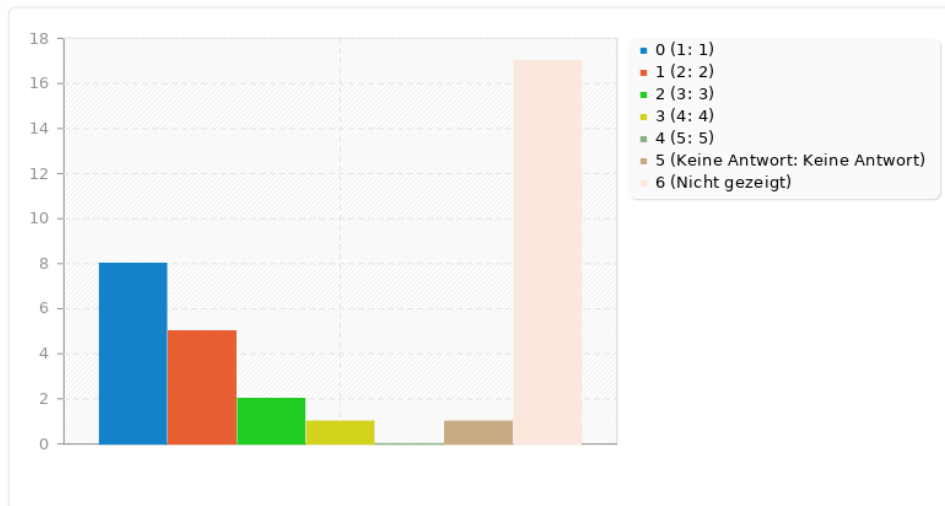
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	8	50.00%	81.25%
2 (2)	5	31.25%	
3 (3)	2	12.50%	12.50%
4 (4)	1	6.25%	
5 (5)	0	0.00%	6.25%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	1.75		
Standard Abweichung	0.93		
Summe (Antworten)	16	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ003)[Die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, verbessert die Arbeitsabläufe bei einer Filmproduktion.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ004)[Durch die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, ergeben sich neue künstlerische Möglichkeiten.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

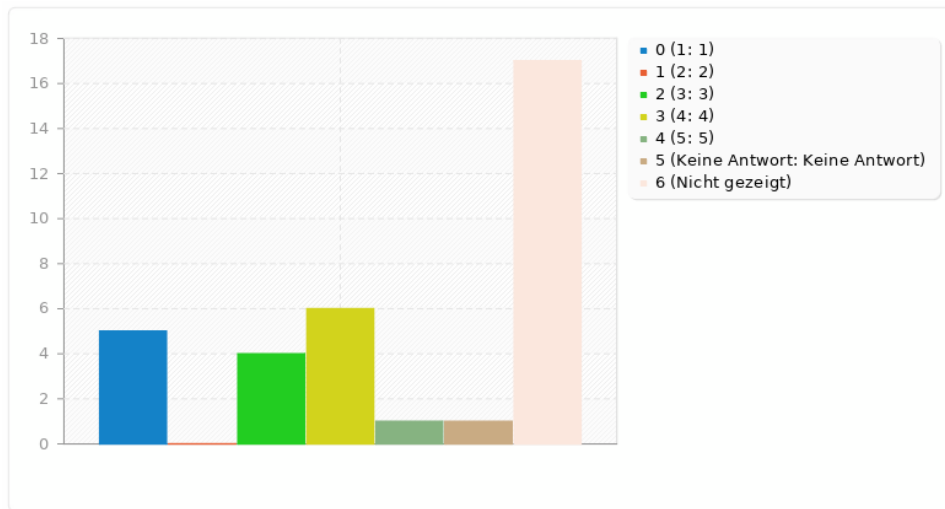
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	5	31.25%	31.25%
2 (2)	0	0.00%	
3 (3)	4	25.00%	25.00%
4 (4)	6	37.50%	
5 (5)	1	6.25%	43.75%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	
Arithmetisches Mittel	2.88		
Standard Abweichung	1.41		
Summe (Antworten)	16	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ004)[Durch die Möglichkeit mit Lichtfeldkameras nachträglich zu fokussieren, ergeben sich neue künstlerische Möglichkeiten.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ007)[Lichtfeldkameras vereinfachen die 3D-Cinematografie.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

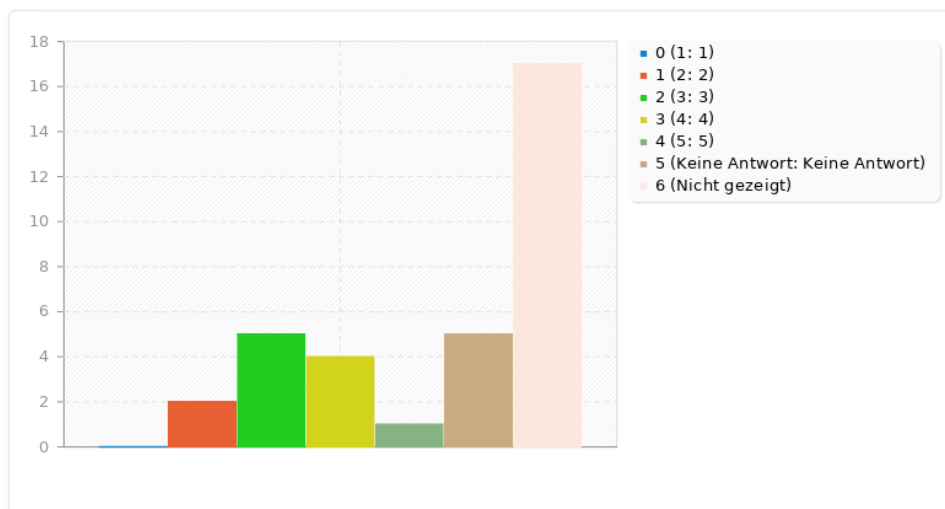
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	0	0.00%	16.67%
2 (2)	2	16.67%	
3 (3)	5	41.67%	41.67%
4 (4)	4	33.33%	
5 (5)	1	8.33%	41.67%
Keine Antwort	5	14.71%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	
Arithmetisches Mittel	3.33		
Standard Abweichung	0.89		
Summe (Antworten)	12	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ007)[Lichtfeldkameras vereinfachen die 3D-Cinematografie.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ008)[Lichtfeldkameras werden sich gegenüber der "Dual Camera" Lösung für 3D-Cinematografie durchsetzen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

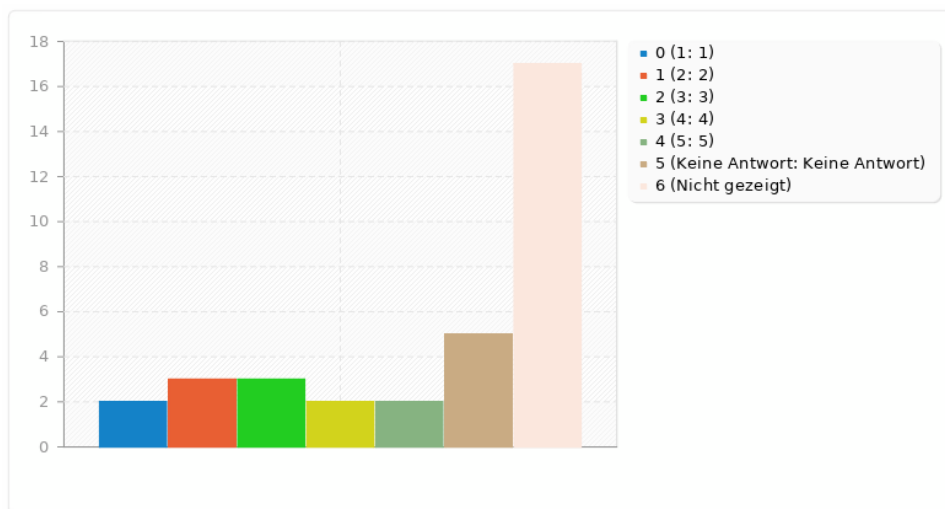
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	2	16.67%	41.67%
2 (2)	3	25.00%	
3 (3)	3	25.00%	25.00%
4 (4)	2	16.67%	
5 (5)	2	16.67%	33.33%
Keine Antwort	5	14.71%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	2.92		
Standard Abweichung	1.38		
Summe (Antworten)	12	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ008)[Lichtfeldkameras werden sich gegenüber der "Dual Camera" Lösung für 3D-Cinematografie durchsetzen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ009)[Zusätzliche Tiefeninformationen in
Videosequenzen erleichtern die Nachbearbeitung des Bildmaterials.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

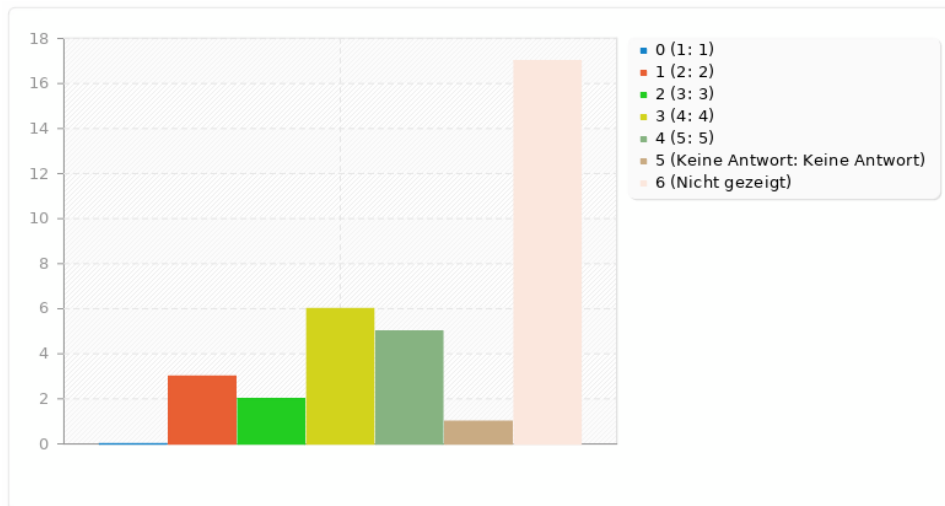
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	0	0.00%	18.75%
2 (2)	3	18.75%	
3 (3)	2	12.50%	12.50%
4 (4)	6	37.50%	
5 (5)	5	31.25%	68.75%
Keine Antwort	1	2.94%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	
Arithmetisches Mittel	3.81		
Standard Abweichung	1.11		
Summe (Antworten)	16	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ009)[Zusätzliche Tiefeninformationen in
Videosequenzen erleichtern die Nachbearbeitung des Bildmaterials.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ010)[Lichtfeldkameras werden sich in den
kommenden Jahren auf dem Kameramarkt durchsetzen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)

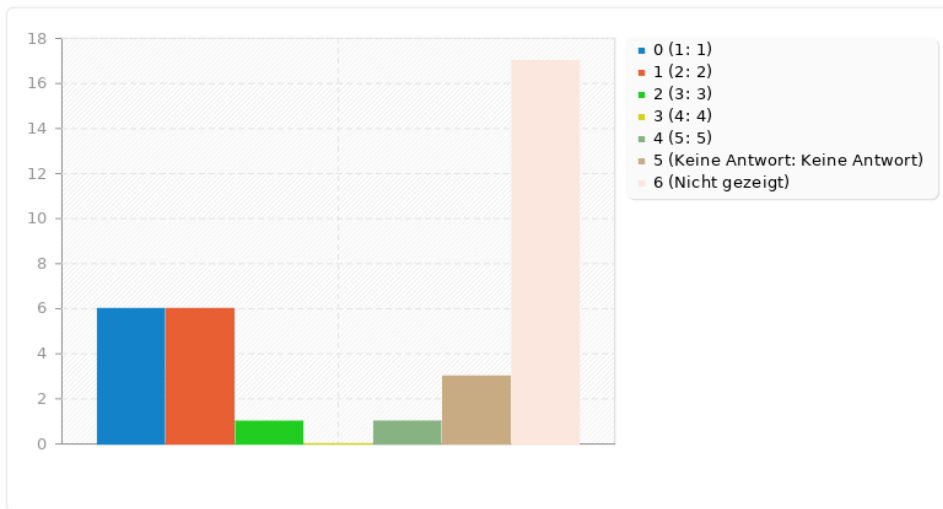
Antwort	Anzahl	Prozent	Summe
1 (1)	6	42.86%	85.71%
2 (2)	6	42.86%	
3 (3)	1	7.14%	7.14%
4 (4)	0	0.00%	
5 (5)	1	7.14%	7.14%
Keine Antwort	3	8.82%	0.00%
Nicht gezeigt	17	50.00%	0.00%
Arithmetisches Mittel	1.86		
Standard Abweichung	1.1		
Summe (Antworten)	14	100.00%	100.00%
Anzahl Fälle		0%	

Kurz-Statistiken

Umfrage 376924 'Umfrage zu meiner Bachelorarbeit: Der Einfluss von Lichtfeldkameras auf die heutige Filmproduktion'

Zusammenfassung für Aussagen2(SQ010)[Lichtfeldkameras werden sich in den kommenden Jahren auf dem Kameramarkt durchsetzen.]

Bewerten Sie die folgenden Aussagen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)



Abbildungen

2.1. Eine zweidimensionale Darstellung der perspektivischen Betrachtung, zur Darstellung des Fluchtpunktes [MZ92, S. 469]	3
2.2. Projektion einer räumlichen Szene auf eine zweidimensionale Bildebene. [Gru12, S. 5]	4
3.1. Der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums [BSS17, S. 45]	7
3.2. Winkel bei der Lichtreflexion [Löf12, S. 3]	8
3.3. Winkel bei der Lichtreflexion [Höf20]	9
3.4. Lineare Polarisierung einer Welle [Löf12, S. 57]	11
3.5. Brechung an der Grenzfläche zwischen zwei Medien. [Löf12, S. 6] . . .	12
3.6. Die Dispersion von Licht an einer Linse [Löf12, S. 66]	13
3.7. Schematische Darstellung der Fraunhofer-Beugung (links) und Fresnel-Beugung (rechts) [RS19, S. 303]	13
3.8. Das Huygen'sche Prinzip [RS19, S. 304]	14
4.1. Der prinzipielle Aufbau einer DSLM-Kamera [Sch05, S. 38]	15
4.2. Der Aufbau eines CMOS Sensors [Sch13, S. 369]	17
4.3. Der Aufbau einer MOS-Photodiode [EE13, S. 382]	18
4.4. Rauschquellen in einer Kamera [Sch13, S. 373]	20
4.5. Vergleich der erfassbaren Szenenkontraste [Sch13, S. 370]	21
4.6. Linsensystem zur Abbildung der Szene auf den Bildwandler [Sch13, S. 386]	22
4.7. Die Brennweiten von Objektiven mit ihren Bildwinkeln [BSS17, S. 36]	23
4.8. Die Schärfentiefe bei Kameraobjektiven [BSS17, S. 38]	24
4.9. Die sphärische und chromatische Aberration bei Kameraobjektiven [Sch13, S. 385]	26
4.10. Die Verzeichnung von Kameraobjektiven [Ped+05, S. 134]	26
4.11. Die Bildfeldwölbung bei Kameraobjektiven [BLF16, S. 165]	27
4.12. Die Stereoanordnung von Kameras auf einem Side-by-Side-Rig [HI16, S. 211]	29
4.13. Die Farbverschiebung am Spiegel eines Beamsplitter-Spiegel-Rigs [HI16, S. 214]	30

4.14. Das autostereoskopische Verfahren [Sch13, S. 492]	32
5.1. Das 4D-Lichtfeld [LH96, S. 2]	38
5.2. Die Parametrisierung eines Lichtstrahls in einer Kamera [Ng06, S. 12]	39
5.3. Die Parametrisierung aller Lichtstrahlen in einer Kamera (links) und die Parametrisierung aller Lichtstrahlen auf einem Punkt des Sensors (rechts) [Ng06, S. 15–16]	40
5.4. Die Funktionsweise einer Lichtfeldkamera [Ng06, S. 25]	41
5.5. Die Abbildung auf den Sensor der Lichtfeldkamera in Abhängigkeit von ihrer Blendenöffnung. [Ng06, S. 35]	41
5.6. Stereoskopie bei Lichtfeldkameras [Ng+05, S. 4]	44
6.1. Die Verteilung der Berufe der Umfrageteilnehmer	50
6.2. Die Anforderungen an die Auflösung in Filmproduktionen	52
6.3. Analyse, ob die Erhöhung der Videoauflösung eine Steigerung der Qualität des Films bedeutet.	53
6.4. Analyse, ob (links) und wie (rechts) sich die Anforderungen in den nächsten Jahren entwickeln werden.	54
6.5. Die aktuelle Anforderung an die Sensorgrößen	55
6.6. Die zukünftige Anforderung an die Sensorgrößen	56
6.7. Die Ergebnisse auf die Frage ob eine Steigerung des Signal-Rauschabstandes die Qualität des Films verbessern kann. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)	57
6.8. Antwortverteilung zu der Aussage, ob nachträgliches Fokussieren die Qualität des Films verbessert (links) und, ob nachträgliches Fokus- sieren die Arbeitsabläufe bei der Filmproduktion verbessert (rechts) (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)	58
6.9. Antwortverteilung zu der Aussage ob Lichtfeldkameras die 3D-Kinematografie vereinfachen. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)	59
6.10. Antwortverteilung zu der Aussage die Bedeutung des 3D-Films in den nächsten Jahren an Bedeutung verlieren (links) oder gewinnen (rechts) wird. (1 = stimme nicht zu, 5 = stimme voll zu)	60

Tabellen

6.1. Die Häufigkeitsverteilung auf die Frage nach der Anzahl der nachge-	
drehten Szenen	58

Abkürzungen

DSLM	Digital Single Lens Mirrorless
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor
CCD	charge-coupled device
APS	active pixel sensor
PPS	passive pixel sensor
TR	Thermisches Rauschen
SR	Schrotrauschen
FR	Funkelrauschen
SRV	Signal-Rausch-Verhältnis

Literatur

- [AB91] Edward H. Adelson und James R. Bergen. *The plenoptic function and the elements of early vision*. 1991 (zitiert auf S. 35–36).
- [BLF16] Jürgen Beyerer, Fernando Puente León und Christian Frese. *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Springer-Verlag, 2016 (zitiert auf S. 5, 16–17, 26–27).
- [Böh+00] Joachim Böhringer u. a. *Kompendium der Mediengestaltung*. Springer-Verlag, 2000 (zitiert auf S. 15).
- [BSS17] Peter Bühler, Patrick Schlaich und Dominik Sinner. *Digitale Fotografie: Fotografische Gestaltung - Optik -ameratechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2017 (zitiert auf S. 7–9, 11, 14, 22–24).
- [Cam06] Silvia Arroyo Camejo. *Scurrile Quantenwelt*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (zitiert auf S. 9).
- [EE13] Jürgen Eichler und Hans Joachim Eichler. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 978-3-540-30305-3. DOI: 10.1007/3-540-30305-7_210. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-30305-7_21 (zitiert auf S. 17–18).
- [Goc12] Tilo Gockel. *Kompendium digitale Fotografie*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2012 (zitiert auf S. 24).
- [Goo+12] Bart Goossens u. a. „Realistic camera noise modeling with application to improved HDR synthesis“. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* (2012) (zitiert auf S. 19–20).
- [Gor+96] Steven J Gortler u. a. „The lumigraph“. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1996, S. 43–54 (zitiert auf S. 37–38).
- [Gra16] Armin Grasnick. *3D ohne 3D-Brille - Handbuch der Autostereoskopie*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2016 (zitiert auf S. 28).

- [Gru12] Nico Grund. „Rekonstruktion und Verarbeitung von Objekten und Szenen aus Kamerabildern“. Diss. Philipps-Universität Marburg, 2012 (zitiert auf S. 4–5).
- [Har06] Ulrich Harten. *Physik für Mediziner*. Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2006 (zitiert auf S. 22).
- [HI16] Eberhard Hasche und Patrick Ingwer. *Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2016 (zitiert auf S. 25–27, 29–31, 33–34).
- [Höf20] Andreas Höfler. *Maschinenbau Physik*. 2020. URL: https://www.ahoefler.de/?option=com_content&view=article&id=92:atommodell-nach-bohr&catid=27:chemische-grundlagen&lang=de-DE&Itemid=198 (besucht am 10.02.2020) (zitiert auf S. 9).
- [Hup00] Jürgen Huppertz. „2-D CMOS Bildsensorik mit integrierter Signalverarbeitung“. Diss. Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg, 2000 (zitiert auf S. 19).
- [Ive03] Frederic E. Ives. „Parallax Stereogram and Process of Making Same“. 725,567. 1903 (zitiert auf S. 35).
- [Jäh12] Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2012 (zitiert auf S. 10).
- [JFS11] Frank Jürgens, Sören Froberg und Silvio Schlöfel. *Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses einer LDK 90 Studiokamera*. Techn. Ber. Technische Universität Ilmenau, 2011 (zitiert auf S. 20).
- [KW16] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2016 (zitiert auf S. 18–19).
- [LH96] Marc Levoy und Pat Hanrahan. „Light Field Rendering“. In: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '96. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1996, S. 31–42. ISBN: 0897917464. DOI: 10.1145/237170.237199. URL: <https://doi.org/10.1145/237170.237199> (zitiert auf S. 37–38).
- [Lim20] LimeSurvey Online Umfrage Software. 2020. URL: <https://www.limesurvey.org/de/> (besucht am 10.02.2020) (zitiert auf S. 49).
- [Lip08] Gabriel Lippmann. „Épreuves Réversibles donnant la Sensation Du Relief“. In: *J. Phys. Theor. Appl.* (1908), S. 821–825 (zitiert auf S. 35).

- [Löf12] Martin Löffler-Mang. *Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (zitiert auf S. 8, 10–13).
- [MZ92] Joseph L. Mundy und Andrew Zisserman. *Projective Geometry for Machine Vision*. 1992 (zitiert auf S. 3–4).
- [Ng+05] Ren Ng u. a. *Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera*. Techn. Ber. Stanford University, 2005 (zitiert auf S. 44).
- [Ng06] Ren Ng. „Digital light field photography“. Diss. Stanford university, 2006 (zitiert auf S. 35, 38–44).
- [Ped+05] Frank L. Pedrotti u. a. *Optik für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (zitiert auf S. 12–13, 23, 26).
- [RS19] Stefan Roth und Achim Stahl. *Optik: Experimentalphysik - anschaulich erklärt*. Springer Berlin Heidelberg, 2019 (zitiert auf S. 9–14).
- [Sch05] Oliver Schreer. *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer-Verlag, 2005 (zitiert auf S. 3–4, 15).
- [Sch13] Ulrich Schmidt. *Professionelle Videotechnik*. Springer, 2013 (zitiert auf S. 8, 14, 16–24, 26–27, 31–32).
- [SK15] Herbert A. Stuart und Gerhard Klages. *Kurzes Lehrbuch der Physik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2015 (zitiert auf S. 10).
- [Sta17] *Umsatz der Branche Herstellung von Filmen, Videofilmen und Fernsehprogrammen in Deutschland von 2009 bis 2014 und Prognose bis zum Jahr 2020*. 2017. URL: <https://de.statista.com/prognosen/400477/herstellung-von-filmen-videofilmen-und-fernsehprogrammen-in-deutschland---umsatzprognose> (besucht am 14.02.2020) (zitiert auf S. 1).
- [Sti15] Leonhard Stiny. *Aktive elektronische Bauelemente*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 (zitiert auf S. 19).
- [Tau10] Holger Tauer. *Stereo3D - Grundlagen, Technik und Bildgestaltung*. Fachverlag Schiele & Schön, 2010 (zitiert auf S. 27–28).
- [Tia00] Hui Tian. „Noise Analysis in CMOS Image Sensors“. Diss. Stanford University, 2000 (zitiert auf S. 20).
- [TMW15] Paul A. Tipler, Gene Mosca und Jenny Wagner. *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2015 (zitiert auf S. 8).
- [Wer19] Martin Werner. *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019 (zitiert auf S. 21).

- [ZQS14] Niclas Zeller, Franz Quint und Uwe Stilla. „Kalibrierung und Genauigkeitsuntersuchung einer fokussierten plenoptischen Kamera“. In: *DGPF Tagungsband 23/2014* (2014) (zitiert auf S. 35).

Eidesstattliche Versicherung

Ich, der Unterzeichnende, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Quellenangaben und Zitate sind richtig und vollständig wiedergegeben und in den jeweiligen Kapiteln und im Literaturverzeichnis wiedergegeben. Die vorliegende Arbeit wurde nicht in dieser oder einer ähnlichen Form ganz oder in Teilen zur Erlangung eines akademischen Abschlussgrades oder einer anderen Prüfungsleistung eingereicht. Mir ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Emden, 17. Februar 2020

Jonas Stolzmann