

SEMINARARBEIT

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Grundlagen der Fotografie

Leitfach: Physik

Thema der Arbeit:

***Faszination räumliches Sehen - Grundlagen und Methoden der
Stereoskopie***

Verfasserin:

Sonja Cebulj

Kursleiter:

Herr Meidert

Abgabetermin:

04.11.14

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe:					
Gesamtleistung nach § 61 (7) GSO = Summe:2 (gerundet)					

Datum und Unterschrift der Kursleiterin bzw. des Kursleiters

Gliederung

1 Streben nach realitätsnaher Darstellung der Wirklichkeit und Räumlichkeit

2 Hauptteil

2.1 Funktionsweise der natürlichen räumlichen Wahrnehmung

- 2.1.1 Monokulare Tiefenhinweise
 - 2.1.1.a) Monokulare Bildindikatoren
 - 2.1.1.b) Monokulare Bewegungsindikatoren
- 2.1.2 Binokulare Tiefenhinweise
 - 2.1.2.a) Okulomotorische Indikatoren
 - 2.1.2.b) Binokulare Disparität
- 2.1.3 Auflösung als weitere Kenngröße für die Stereoskopie

2.2 Aufnahmemethoden

- 2.2.1 Side-by-Side
- 2.2.2 Spiegel
- 2.2.3 Tiefenscankameras

2.3 Wiedergabemethoden

- 2.3.1 Stereoblick
- 2.3.2 Örtliche Bildtrennung
- 2.3.3 Farbmultiplex, Anaglyphen
- 2.3.4 Polarisationsmultiplex
- 2.3.5 Wellenlängenmultiplex, Interferenzfiltertechnik
- 2.3.6 Zeitmultiplex, Shutterverfahren
- 2.3.7 Orts- oder Richtungsmultiplex, Autostereoskopie

2.4 Eigenschaften des Stereobildes

- 2.4.1 Distanzen und Tiefenspielraum
- 2.4.2 Disparitäten
- 2.4.3 Stereofenster
- 2.4.4 Binokulare Rivalität

2.5 Aufnahmeparameter und Kameraeinstellungen

- 2.5.1 Konvergenz
- 2.5.2 Stereobasis
- 2.5.3 Brennweite
- 2.5.4 Stereofaktor
- 2.5.5 Justierung
- 2.5.6 Faustregeln

2.6 Wiedergabegeometrie

2.7 Eigene Aufnahmen

3 Stereoskopie – Kunst für Jeden

1. Streben nach realitätsnaher Darstellung der Wirklichkeit und Räumlichkeit

Das Streben des Menschen, seine Umwelt möglichst realitätsnah abzubilden, führte zu Beginn des 19. Jahrhunderts zur Erfindung der Fotografie. Kurz nach der Errungenschaft der ersten lichtbeständigen Fotografie entwickelte der englische Physiker Sir Charles Wheatstone 1832 das von ihm benannte „Stereoskop“ (siehe Abschnitt 2.3.2 Örtliche Bildtrennung). Mit dieser Erfindung konnten erstmals Bilder mit Raumeindruck wiedergegeben werden und waren somit der natürlichen Wahrnehmung ähnlicher. Im Zusammenhang mit dieser Erfindung fand der Begriff „Stereo“ das erstmalige Verwendung. Er stammt aus dem Griechischen und steht für „räumlich“ oder „körperlich“. Um die Schwierigkeit, die beiden benötigten Perspektiven zu zeichnen, zu umgehen, ließ er 1841 die ersten fotografischen stereoskopischen Aufnahmen anfertigen. Hiermit war der Grundstein für die Entwicklung der Stereoskopie gesetzt, deren Begriff die Aufnahme und Wiedergabe dreidimensionaler Bilder umfasst. Die Faszination im Allgemeinen für die Fähigkeit des Menschen, räumlich zu sehen, und der resultierende Wunsch, diese Räumlichkeit auch auf Darstellungen zu übertragen und diese somit so realitätsnah wie möglich zu gestalten, stellen die Motivation für diese Arbeit dar.

Da es, um das Prinzip der Stereoskopie zu verstehen, nötig ist zu wissen wie die natürliche räumliche Wahrnehmung funktioniert, stellt dies das erste Kapitel dieser Arbeit dar. Anschließend werden die verschiedenen technischen Möglichkeiten bei Aufnahme und Wiedergabe ausgeführt. Hierbei werden Methoden beschrieben, die sich nicht nur auf die Fotografie beschränken, sondern auch für bewegte Bilder anwendbar sind. Wie aus den beiden Teilbildern eine stereoskopische Darstellung mit Tiefeneindruck wird und die Eigenschaften dieser Darstellung sind Gegenstand des Kapitels 2.4. Schließlich werden die bei der Aufnahme für die stereoskopische Bildgestaltung relevanten Parameter im Kapitel 2.5 erläutert.^{1,2,3}

1 Steffen Gautzsch, 3D-Kino im Wohnzimmer, S. 17-19

2 Butt, S.: Geschichte der Fotografie, Internetseite http://www.planet-wissen.de/kultur_medien/fotografie/geschichte_der_fotografie/, vom 05.09. 2014, aufgerufen am 06.10.2014

3 Kohler, M.: Historische Entwicklung der Stereophotographie, Internetseite http://www.3d-historisch.de/Geschichte_Stereoskopie/Geschichte_Stereoskopie.htm von 2004, aufgerufen am 06.10.2014

2. Hauptteil

2.1 Funktionsweise der natürlichen räumlichen Wahrnehmung

2.1.1 Monokulare Tiefenhinweise

Die Faktoren, die eine Tiefenbestimmung mit einem Auge oder bei der Betrachtung gewöhnlicher 2D Bildern möglich machen, nennt man monokulare Tiefenhinweise. Ihre Auswertung ist keine angeborene Fähigkeit sondern muss erlernt werden und beruht somit auf Erfahrungswerten.⁴

2.1.1.a) Monokulare Bildindikatoren

Das Gehirn hat im Beispiel der „Linearperspektive“ gelernt, dass parallele Linien in einem Bild auf einen Fluchtpunkt zulaufen. Durch Verdeckungen und Überlappungen kann ein grobes „Davor“ oder „Dahinter“ erkannt werden. Informationen über die Oberflächenstruktur und Form gewinnt das Gehirn aus den Eigenschatten auf dem Gegenstand selbst. Aus den sogenannten Schlagschatten, die das Objekt auf seine Umgebung wirft, werden Informationen über die Lage im Raum gewonnen. „Relative Höhe“ bedeutet die Auswertung der Nähe zur Horizontlinie. Je näher ein Gegenstand dieser Linie ist, desto weiter entfernt ist er. Die „Relative Größe“ beschäftigt sich mit dem Größenvergleich gleicher Objekte mit unterschiedlicher Lage im Raum. Sie ist oft gekoppelt mit der „Gewohnten Größe“, die das Verhältnis der erlernten Größe bestimmter Dinge zur Größe im Bild verwendet, um Tiefe zu bestimmen. Die Erkenntnis, dass auch Kontraste, Farben, Schärfe, und Helligkeit, bedingt durch den Aufbau unserer Atmosphäre, vom Abstand zum Betrachter abhängig sind, fällt unter den Begriff der „Atmosphärischen Perspektive“. Die „Farbperspektive“ beschränkt sich auf die scheinbar größere Nähe warmer Farben verglichen mit kalten. Ein letzter monokularer Bildindikator sind mit zunehmender Entfernung kleiner werdende, eigentlich gleichförmige Strukturen, sogenannte „Texturgradienten“.⁵

4 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 44f.

5 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 45-50

2.1.1.b) Monokulare Bewegungsindikatoren

Bei der Tiefenwahrnehmung durch monokulare Bewegungsindikatoren hat die Bewegungsparallaxe die größte Bedeutung. Das heißt Gegenstände bewegen sich scheinbar abhängig vom jeweiligen Abstand zum Betrachter unterschiedlich schnell. Die gleiche tatsächliche Geschwindigkeit scheint bei größer werdender Entfernung langsamer. Dieses Phänomen lässt sich bei der Bewegung sowohl der Objekte selbst als auch des Betrachters beobachten und liefert vor allem in Verbindung mit Verdeckungen gute Tiefeninformationen. Die bei schnellen Geradeausbewegungen entstehende Unschärfe, das optische Fließen, ist ein weiterer Tiefenhinweis. Das Ziel, in dessen Richtung die Bewegung stattfindet wird scharf gesehen. Je näher das optische Fließen, die Unschärfe, an dieses Ziel heranreicht, desto schneller ist die Bewegung.⁶

2.1.2 Binokulare Tiefenhinweise

Im Gegensatz zu den monokularen Tiefenhinweisen, mit deren Hilfe man bereits anhand des von einem einzelnen Auge gelieferten Einfachbildes Entfernungen bestimmen kann und die somit Anwendung bei zweidimensionalen Bildern finden, beruhen binokulare Tiefenhinweise auf der Tatsache, dass der Mensch zwei Augen besitzt. Wenn man die unterschiedlichen Perspektiven, die durch die seitlich versetzte Lage der Augen entsteht, bei der Erzeugung eines Bildes mit Tiefeneindruck berücksichtigt, nennt man das entstandene Bild dreidimensional und die Tiefenhinweise binokular.^{7,8}

2.1.2.a) Okulomotorische Indikatoren

Der Begriff der Okulomotorik beschreibt das Zusammenwirken von Akkomodation und Konvergenz.

Die Anpassung der Linse an die Entfernung des fokussierten Objektes um dieses scharf

6 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 50-52

7 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 45

8 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 5

auf der Netzhaut abzubilden wird als Akkomodation bezeichnet. Ab ungefähr 7 Meter Entfernung ist die Linse so flach wie möglich, das heißt alle weiter entfernten Objekte werden mit der gleichen Linseneinstellung gesehen, die Linse ist auf Unendlich eingestellt. Gesteuert wird diese Anpassung durch die Mikrosakkaden, extrem kleine und schnelle Augenbewegungen mit wechselnder Fixation, und daraus folgenden Fehlfokussierungen. Aus diesen Fehlfokussierungen gewinnt das Gehirn die Information über die nötige Linsenkrümmung. Weitere Hinweise für den Grad der Akkomodation gewinnt das Gehirn aus Erfahrungswerten. Zum einen wird die Größe der im Sehfeld befindlichen Objekte mit der erlernten Größe dieser Objekte verglichen, zum anderen kennt das Gehirn das Verhältnis von Akkomodation und Konvergenz und steuert diese gekoppelt.

Konvergenz findet statt, wenn die Augen einen bestimmten Punkt anvisieren. Dabei bewegen sie sich aufeinander zu, sodass sich die beiden Sehachsen im Fixationspunkt kreuzen und einen Winkel bilden, den Parallaxenwinkel. Das Gegenteil ist die Divergenz, bei der sich die Sehachsen voneinander wegbewegen, und die Augen nach außen schielen.

Ebenfalls zusammen mit Konvergenz und Akkomodation wird der Pupillenreflex, die Größe der Pupillenöffnung, gesteuert. Diese Verkoppelung wird als Naheinstellungstrias bezeichnet.

Aus der Auswertung der Okulomotorik gewinnt das Gehirn Informationen über den Abstand des fokussierten Objektes. Diese Art der Tiefenbestimmung ist für den Nahbereich relevant. Zum einen, da wie oben erwähnt die Linseneinstellung für Entfernungen über 7 Meter konstant ist. Zum anderen, da der Parallaxenwinkel bereits ab 2 Meter sehr klein ist und sich somit für weiter entfernte Fixationspunkte nur noch äußerst geringfügig ändert. Um aus diesen okulomotorischen Indikatoren einen präzisen Tiefeneindruck zu gewinnen ist es aber wichtig, dass sie deutliche Änderungen für unterschiedliche Entfernungen aufweisen.

Im Gegensatz zum reellen stereoskopischen Sehen, muss bei stereoskopischen Darstellungen die Verbindung von Akkomodation und Konvergenz aufgehoben werden, da die Augen auf das Wiedergabemedium, beispielsweise den Bildschirm akkomodierten, die Konvergenz aber von der Darstellung gesteuert und abhängig ist.⁹

9 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 21, 28-32, 52f.

2.1.2.b) Binokulare Disparität

Wenn beide Augen einen Punkt anvisieren (vgl. Abb. 1: A), wird dieser Punkt auf der rechten und linken Netzhaut an entsprechenden, korrespondierenden Stellen, und zwar in der Sehgrube (vgl. Abb. 1: A'), abgebildet. Punkte die vor oder hinter dem anvisierten Punkt liegen, werden auf unterschiedliche Netzhautstellen projiziert. Dieser Unterschied, diese horizontal versetzte Projektion eines Punktes auf rechter und linker Netzhaut, ist die (Quer-)Disparität. Punkte die vor dem Fixationspunkt (vgl. Abb. 1: B) liegen, erscheinen gekreuzt disparat (vgl. Abb. 1: B'), Punkte dahinter (vgl. Abb. 1: C) ungekreuzt disparat (vgl. Abb. 1: C').

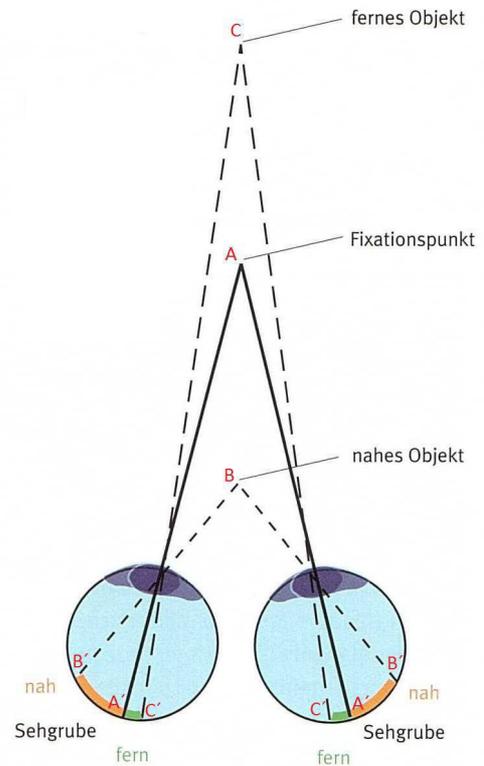


Abb. 1: Disparitäten

Die folgende Darstellung (Abb. 2) macht deutlich, wie die oben beschriebenen positiven und negativen Disparitäten im wahrgenommenen Bild erscheinen. Im ersten Bild ist nochmals, wie in der Abbildung 1, die Parallaxe, das heißt die unterschiedlichen Sehachsen, zu sehen. Das zweite und dritte Bild stellen die beiden Perspektiven dar. Das letzte Bild zeigt die aus den verschiedenen Perspektiven resultierenden Disparitäten.

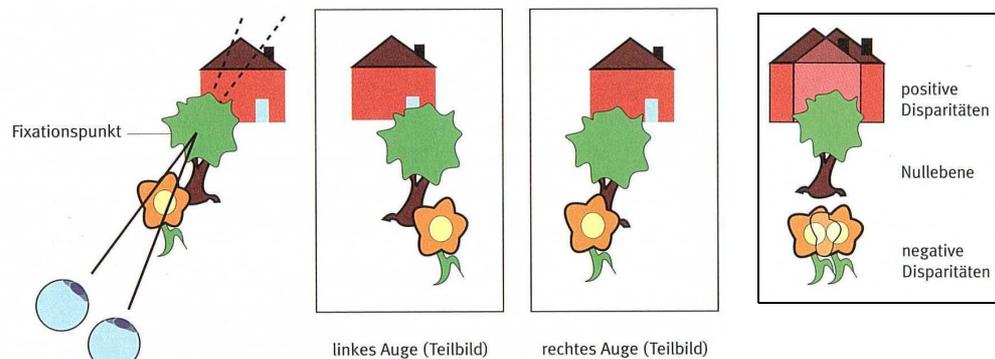


Abb. 2: Parallaxe und Teilbildversatz

Bei der Stereopsis werten die Stereoneurone im Sehzentrum diese Disparitäten aus. Stereoneurone haben Rezeptoren in beiden Augen. Jedes einzelne von ihnen ist genau für eine bestimmte Disparität empfindlich. So werden bei der Wahrnehmung eines Bildes nur jeweils die Stereoneurone erregt, die für die in dem aktuellen Fall vorliegenden Disparitäten spezialisiert sind. Auf diese Weise kann die Auswertung sehr schnell erfolgen.

Da dieser Mechanismus auf der seitlich versetzten Lage unserer Augen beruht und die Disparität sowie die Stereopsis vom Augenabstand, der durchschnittlich 6,3 cm beträgt, aber von Mensch zu Mensch stark variieren kann, abhängig sind, ist die Tiefenbestimmung auf diesem Weg ein individueller Prozess.

Außer dem Fixationspunkt gibt es noch weitere Punkte, die an korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet werden. Sie bilden den sogenannten Horopter. Theoretisch verbindet dieser horizontal die anvisierte Stelle kreisförmig mit den beiden Augenlinsen (vgl. Abb. 3: „theoretischer Horopter“). Tatsächlich ist er aber wesentlich flacher (vgl. Abb. 3: „empirischer Horopter“).

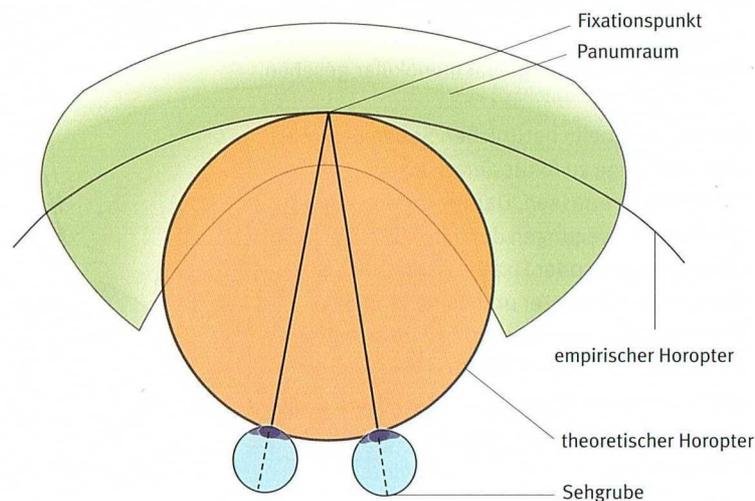


Abb. 3: Horopter und Panumraum

Zudem gibt es einen Longitudinalhoropter, der vertikal durch den Fixationspunkt verläuft. Für Bildpunkte auf dem Horopter gibt es Stereoneurone, die auf Disparitäten gleich Null reagieren.

Die Tiefenbestimmung im Fall der Stereopsis erfolgt nur relativ zum Horopterkreis. Außerdem erlaubt sie die Ermittlung der räumlichen Ausdehnung einzelner Objekte.

Eine Bestimmung der Entfernung des Betrachters zum Objekt ist nicht möglich.

Um ein für das Bewusstsein brauchbares Bild ohne Disparitäten zu erzeugen, werden beide Teilbilder zu einem Gesamtbild fusioniert, das heißt verschmolzen. Dieses zyklische Bild liegt zwischen den beiden Teilbildern. Die Fusion ist nur in einem bestimmten Bereich um den Horopter, in dem die Disparitäten einen bestimmten Wert nicht überschreiten, möglich. Dieser Bereich heißt Panumraum und ist in der Abbildung 3 grün gekennzeichnet. Die außerhalb des Panumraums entstehenden Doppelbilder werden beim natürlichen menschlichen Sehvorgang unterdrückt.

Die binokulare Verdeckung ist ein weiterer Tiefenindikator, der durch zweiäugiges Sehen möglich, aber ein autonomer Vorgang ist. Die beiden Teilbilder enthalten unterschiedliche Verdeckungen und machen so ein Herumsehen um Objekte beschränkt möglich. Dadurch wird vorrangig die Gestalt von Gegenständen bestimmt.^{10,11,12}

2.1.3 Auflösung als weitere Kenngröße für die Stereoskopie

Die temporale Auflösung bestimmt den zeitlichen Grenzwert, ab dem zwei aufeinander folgende Bilder nicht mehr getrennt wahrgenommen werden können. Dieser Grenzwert heißt Flimmerfusionsfrequenz und ist umso größer, je besser die Sehbedingungen sind. Die Wiedergabefrequenz hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Tiefeneindrucks, wenn dieser durch die abwechselnde Präsentation der beiden Teilbilder hergestellt werden soll. Das bedeutet, je größer die Frequenz ist, umso kleiner ist der Mindestabstand zweier alternierender Punkte, die noch vom Gehirn verwertbare, stereoskopische Information liefern können. Daher sollte bei der alternierenden Wiedergabe von Stereobildern eine hohe Frequenz, die bei ungefähr 70 Hertz liegt, verwendet werden.

Die saptiale Auflösung beschreibt die Fähigkeit des Auges, zwei benachbarte Punkte zu unterscheiden. Der Kehrwert des Mindestabstandes in Winkelminuten, bei dem zwei Punkte noch getrennt gesehen werden, heißt Sehschärfe. Die Sehschärfe ist aber nicht vom Abstand der Zapfen, sondern von den rezeptiven Feldern und der Verarbeitung im

10 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 20-25, S. 53-63, S. 66, S. 509, S. 525

11 Steffen Gautzsch, 3D-Kino im Wohnzimmer, S. 12-15

12 Pdf quelle beleg walther sebastian

Gehirn abhängig, und daher höher als eigentlich anzunehmen wäre. Tatsächlich liegt der gemessene Mindestabstand etwa bei fünf Winkelsekunden.¹³

2.2 Aufnahmemethoden

Die Aufnahme stereoskopischer Bilder verfolgt allgemein das Ziel, durch eine seitlich versetzte Aufnahme zweier Bilder die natürliche menschliche Tiefenwahrnehmung nachzubilden. Im Folgenden werden nur die wichtigsten und gängigsten Aufnahmeverfahren, auch im filmischen Bereich, dargestellt. Darüber hinaus gibt es unzählige weitere Möglichkeiten, stereoskopische Bilder aufzunehmen, die aber entweder nicht dem technischen Stand entsprechen oder nur für bestimmte Einsatzzwecke geeignet sind und daher in dieser Arbeit nicht aufgeführt werden.¹⁴

2.2.1 Side-by-Side

Die gleichzeitige Aufnahme mit zwei nebeneinander positionierten Kameras ist das Prinzip der Side-by-Side-Anordnung. Sie ist die einfachste, älteste und wohl am häufigsten verwendete Methode zur Aufnahme von Stereobildern. Ein einheitliches Gestell in dem beide Kameras zur Stereoaufnahme montiert sind, heißt Side-by-Side-Rig. Viele solcher Rigs sind selbst gebaut und an den individuellen Anwendungsbereich angepasst. Mittlerweile gibt es aber auch einige Serienanfertigungen. Je nach erwarteter stereoskopischer Qualität bieten diese Gestelle Möglichkeiten zur Justierung. Die Kameras können zueinander verschoben oder konvergent ausgerichtet werden.

Ein Problem stellt die Kameragröße dar. Sie beschränkt die sogenannte Stereobasis, das heißt den Abstand zwischen den optischen Achsen der beiden Perspektiven¹⁵, nach unten. Der Durchmesser hochwertiger Objektive ist meist zu groß, um die dem durchschnittlichen Augenabstand entsprechende Normalbasis von 6.5 cm umzusetzen.

13 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 32-37

14 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 403

15 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 524

Folglich finden Side-by-Side-Rigs hauptsächlich bei Landschaftsbildern, Weitwinkelaufnahmen, Übersichtstotalen, Bildern mit Nahpunkt in großer Entfernung, und Großbasisaufnahmen Verwendung, da hier mit größeren Basisweiten gearbeitet wird. Um auch mit Normalbasis aufzunehmen, werden kleine Kameramodule, Miniaturkameras, Consumerkameras, das heißt Amateurkameras, oder Modulkameras verwendet. Letztere sind technisch so gut ausgereift, dass sie trotz ihrer geringen Größe qualitativ hochwertige stereoskopische Bilder liefern. Der Vorteil gegenüber Spiegel-Rigs ist die Flexibilität und Einfachheit.

Kompaktkameras stellen eine besondere Form der Side-by-Side-Anordnung dar. Entweder entstehen sie durch die Verbauung zweier Kameras in einem Gehäuse, oder sie wurden schon ursprünglich als Kompaktkamera entworfen. Bei dieser Technik ist jedoch die Stereobasis und die Konvergenz gar nicht, beziehungsweise sehr beschränkt verstellbar, was wie bei der natürlichen Wahrnehmung zu einer Beschränkung des stereoskopischen Bereichs auf etwa 20 Meter führt. Allerdings sind sie in der Anwendung schnell, flexibel und wegen des reduzierten Justierungsaufwands einfach.¹⁶ Nach demselben Prinzip, nach dem Side-by-Side-Rigs arbeiten, funktioniert auch die einfachste Art Stereofotos zu machen, die Verschiebetechnik. Bei dieser ursprünglichen Methode wird nur eine Kamera verwendet, die, parallel um die Basis verschoben, die beiden Teilbilder aufnimmt. Der dadurch entstehende zeitliche Versatz beschränkt den Anwendungsbereich der Verschiebetechnik auf statische Motive. Die dieser Arbeit beigelegten Stereoaufnahmen wurden auf diese Weise aufgenommen.¹⁷

2.2.2 Spiegel

Spiegel-Rigs versuchen das Problem der nach unten begrenzten Stereobasis der Side-by-Side-Rigs durch Spiegel zu lösen. Diese lenken die beiden Teilbilder zum jeweiligen Aufnahmegesetz. Für die Anordnung der Spiegel und der Kamera gibt es verschiedene Varianten. Die Standardvariante verwendet einen halbdurchlässigen Spiegel, welcher ein Teilbild zur ersten Kamera durchlässt und das andere Teilbild zu der rechtwinklig zur ersten angeordneten zweiten Kamera umlenkt.

¹⁶ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 383-390

¹⁷ Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 12

In einer solchen Konstruktion, in der eine oder sogar beide Kameras und optional der Spiegel verstellbar sind, ist die Basisweite beliebig klein einstellbar. Zusätzlich kann eine Konvergenzwinkeländerung erreicht werden.

Alternativ zur Verwendung zweier Kameras gibt es die Methode, beide Teilbilder auf eine Kamera zu lenken und nebeneinander, übereinander oder zeitsequentiell aufzunehmen.

Der Vorteil von Spiegel-Rigs gegenüber Side-by-side-Rigs ist in erster Linie die beliebig kleine Stereobasis. Allerdings sind sie aufgrund der rechtwinkligen Anordnung und der empfindlichen Spiegel wesentlich größer, schwerer und in ihrer Konstruktion komplexer, unstabiler und anfälliger als ihre Konkurrenten mit zwei parallel ausgerichteten Kameras. Das spiegelverkehrte Bild und die durch den Spiegel bedingten Farbabweichungen und Lichtverluste stellen weitere Probleme dar. Außerdem ist beim Spiegel-Rig eine präzise Justierung notwendig und die Objektivwahl durch die Nähe und Größe des Spiegels in der jeweiligen Anordnung beschränkt. Am besten eignen sie sich aufgrund dieser Eigenschaften für große Filmproduktionen, Naturdokumentationen, und den Einsatz in der Industrie und Werbung.¹⁸

2.2.3 Tiefenscankameras

Tiefenscankameras nehmen, wie normale 2D-Kameras, ein monoskopisches Bild auf. Sie messen und speichern aber zusätzlich die Tiefe der einzelnen Pixel mit Hilfe von Infrarotlicht, Laser oder Ultraschall. Somit können keine geometrischen Verschiebungen, Helligkeits- oder Farbabweichung entstehen. Die Tiefeninformationen können zudem leichter nachbearbeitet werden, da sie von vornherein vom Bildmaterial getrennt sind. Gerade hierdurch wird aber die Erstellung eines brauchbaren stereoskopischen Bildpaares erschwert. Es ist zwar möglich, die Tiefeninformationen aufwendig zu verrechnen und in das Bild zu integrieren, die Verdeckungsinformationen fehlen aber aufgrund der monoskopischen Aufnahme und müssen geschätzt werden. Daher wird das Tiefenscanverfahren eher im Bereich der Wissenschaft und der Robotik als im Film- und Fernsbereich angewendet. Im Unterhaltungsbereich findet dennoch eine Weiterentwicklung statt.¹⁹

¹⁸ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 390-399

¹⁹ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 399-401

2.3 Wiedergabemethoden

Die Wiedergabe stereoskopischer Bilder verfolgt, entsprechend der Aufnahme, das Ziel, die bei der natürlichen Wahrnehmung auftretenden Disparitäten nachzubilden. Die Schwierigkeit liegt darin, beide Augen gleichzeitig ausschließlich mit dem Bild der jeweiligen Perspektive zu versorgen.

Hierfür wurden viele verschiedene Techniken entwickelt, welche sich je nach Anwendungsbereich unterschiedlich gut eignen. Grundsätzlich gibt es zwei Herangehensweisen. Einerseits gibt es die Methode der getrennten Wiedergabe der beiden Teilbilder. Techniken die auf diesem Prinzip beruhen werden in den ersten beiden Abschnitten beschrieben. Der Begriff des Multiplex stammt aus der Nachrichtentechnik und bezeichnet die Verfahren, bei denen beide Teilbilder über denselben Kanal übertragen werden.²⁰

2.3.1 Stereoblick

Der Stereoblick ist die einzige Methode, ohne Hilfsmittel Bilder mit Tiefeneindruck wahrzunehmen. Hierbei werden beide Bilder nebeneinander angeordnet und mit einem Parallel- oder Kreuzblick betrachtet. Beim Parallelblick wird versucht, eine Konvergenzstellung wie beim Blick ins Unendliche zu erreichen, damit die Augenachsen parallel sind und durch den Mittelpunkt des jeweiligen Teilbildes verlaufen (vgl. Abb. 4: Parallelblick). Die Bildbreite darf hierbei den Augenabstand nicht überschreiten. Um breitere Bilder betrachten zu können, verwendet man den Kreuzblick. Hierbei konvergieren die Augen auf einen Punkt in der Mitte zwischen Bildern und Augen, das heißt die Augenachsen kreuzen sich und die Teilbilder müssen vertauscht angeordnet werden (vgl. Abb. 5: Kreuzblick). Beide Methoden sorgen dafür, dass in die Sehgrube beider Augen das passende Teilbild projiziert wird. Die beiden Teilbilder liegen an korrespondierenden Stellen (vgl. Unterabschnitt 2.1.2.b)

²⁰ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 144-146

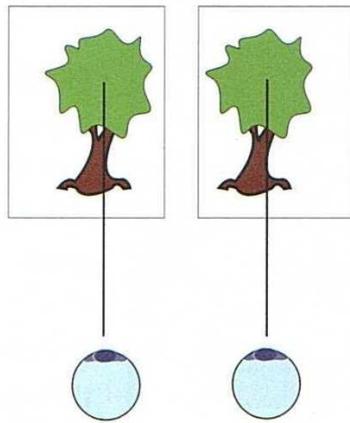


Abb. 4: Parallelblick

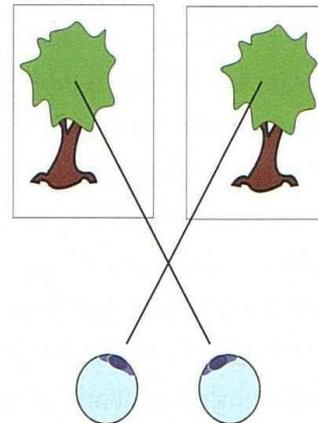


Abb. 5: Kreuzblick

Bei dieser Betrachtungsmethode ist eine Aufhebung der Verkopplung von Akkomodation und Konvergenz, wie sie im Unterabschnitt 2.1.2.a) „Okulomotorische Indikatoren“ beschrieben wurde, nötig. Der Stereoblick muss daher geübt werden, strengt den Betrachter an und ist somit nicht für Darstellungen vor großem Publikum geeignet.^{21,22,23}

2.3.2 Örtliche Bildtrennung

Bei der örtlich getrennten Präsentation wird das Risiko der gegenseitigen Störeffekte zwischen den Teilbildern ausgeschlossen. Es gibt dabei mehrere Methoden, welche allerdings nur für einzelne Betrachter geeignet sind. Das in Abbildung 6 dargestellte erste Stereobetrachtungsgerät, das „Stereoskop nach Charles Wheatstone“ ist ein Beispiel für einfache Betrachtungsgeräte, in die die Teilbilder montiert sind und die mittels Linsen, Spiegeln oder Sichtschutz eine getrennte Betrachtung ermöglichen.

21 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 147

22 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 22

23 Gerhard Kuhn, Stereofotografie und Raumbildprojektion, S. 14-16

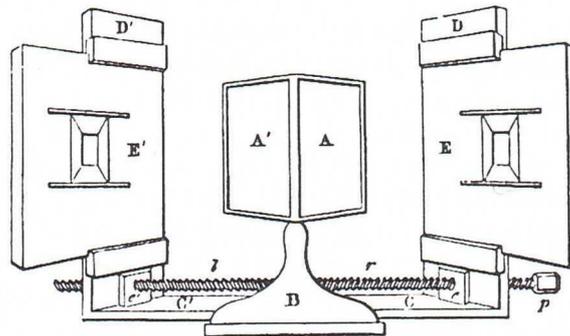


Abb. 6: Stereoskop nach Charles Wheatstone

Das KMQ-Verfahren verwendet spezielle Prismenbrillen, welche das Licht der über- oder nebeneinander angeordneten Teilbilder auf das jeweilige Auge lenkt. Dieses Verfahren erlaubt als einziges mit örtlicher Bildtrennung eine geringe Zahl an Zuschauern gleichzeitig. Die Betrachtung erfordert aber Übung und ist nur von einer bestimmten Position vor der Wiedergabeebene aus möglich.

Videobrillen oder sogenannte „Head Mounted Displays“ (HDMs) besitzen statt der Gläser zwei Displays, die jedem Auge das passende Teilbild zeigen. Nachteilig auf eine entspannte Betrachtung wirkt sich das Gewicht der Brillen, die niedrige Auflösung und möglicher Lichteinfall von außen aus.

Die Retinal-Display-Technologie arbeitet ohne Bildschirm. Durch die Projektion der Bilder mit Laser direkt auf die Netzhaut wird hier eine realitätsnahe Wahrnehmung unterstützt. Das Verfahren ist aber weniger für den Unterhaltungsbereich als für die Anwendung bei Steuerungsaufgaben, beispielsweise bei der Mikrochirurgie geeignet.^{24,25,26}

2.3.3 Farbmultiplex, Anaglyphen

Das Anaglyphen-Verfahren ist das älteste zur Trennung der beiden Teilbilder. Es nutzt die gegenseitige Blockade der Komplementärfarben des additiven Farbsystems. Die beiden Teilbilder werden gegensätzlich eingefärbt und übereinander gelagert dargestellt. Bei Druckerzeugnissen, also stereoskopischen Abbildungen auf Papier, wie sie auch in

24 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 148-150

25 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S.24f.

26 Steffen Gautzsch, 3D-Kino im Wohnzimmer, S. 26-28

dieser Arbeit zu finden sind, sind beide Teilbilder übereinander gedruckt. Alternativ kann auch für jedes Teilbild ein Projektor verwendet werden, vor dem dann der passende Farbfilter angebracht ist (vgl. Abb. 7). Eine Brille mit entsprechenden Farbfiltern (vgl. Abb. 7: „Farbfilterbrille“) lässt, wie in der untenstehenden Abbildung dargestellt, zu jedem Auge nur das passende Teilbild durch. Das mit der Komplementärfarbe belegte Bild wird vom Filter gesperrt.

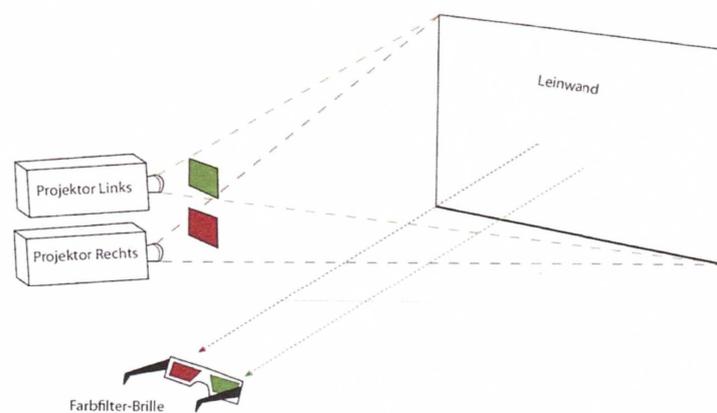


Abb. 7: Anaglyphenverfahren

Es gibt drei Komplementärfarbenpaare, die je nach Verwendungszweck unterschiedlich gut geeignet sind: Blau-Gelb, Grün-Magenta, und Rot-Cyan. Außerdem besteht die Möglichkeit, mit weiteren Farbenpaaren zu arbeiten, die nicht exakt komplementär sind. Der Vorteil der Anaglyphentechnik besteht in der einfachen Brillenherstellung, Bildkodierung und -übertragung. Zudem können auch Stereobilder auf Papier wiedergegeben werden. Einen Nachteil stellt der durch die Farbfilter entstehende Helligkeitsunterschied zwischen den Kanälen dar. Bei der Anwendung des Anaglyphenverfahrens auf Farbbilder besteht ein weiteres Problem, da die Filter nicht nur das Gegenbild, sondern fälschlicherweise auch komplementärfarbene Elemente des eigenen Teilbildes sperren. Solche Stellen werden nur von einem Auge wahrgenommen und es fehlen die Disparitäten. Mittlerweile gibt es allerdings die Möglichkeit, die Farben der Teilbilder mit mathematischen Algorithmen zu verändern, sodass dieses Phänomen nicht mehr auftritt.^{27,28}

27 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 150-154

28 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 23f.

2.3.4 Polarisationsmultiplex

Die Polarisierungstechnik verwendet Polfilter, die, wie in Abbildung 8 zu sehen ist, nur Licht, das in einer bestimmten Richtung schwingt, durchlassen. Das Licht vor dem Polfilter ist unpolarisiert, das bedeutet, die Schwingungen des Lichts haben keine bestimmte Auslenkungsrichtung, sondern verlaufen ungeordnet in alle Richtungen. Für jeden Kanal, also für rechtes und linkes Teilbild, gibt es je einen Projektor (vgl. Abb. 7). Vor den Projektoren, die beide Teilbilder übereinander projizieren, werden um 90° verdrehte Polfilter angebracht. Das bewirkt, dass beispielsweise das Licht des rechten Kanals horizontal und das Licht des linken Kanals vertikal schwingt (vgl. Abb. 8). Bei der Betrachtung filtert, analog zur Farbfilterbrille beim Anaglyphenverfahren, eine entsprechende Polfilterbrille für jedes Auge das passende Bild heraus (vgl. Abb. 7). Ein Problem entsteht bei dieser Technik, wenn der Betrachter den Kopf dreht, da dann die Ausrichtung der Brillenfilter nicht mehr zu der Ausrichtung der Polfilter vor den Projektoren und der Polarisation der Teilbilder passt.

Diese störende Tatsache wird durch die Verwendung zirkular polarisierten Lichts umgangen. Wie diese Polarisation erreicht wird, zeigt die Abbildung 9. Zunächst wird das Licht linear polarisiert und anschließend sorgt ein zirkular polarisierender Filter, hier die Lambda/4-Platte, für eine schraubenförmige Rechts- oder Linksdrehung. Die Filter werden dann so vor den Projektoren angebracht, dass sich das Licht der beiden Teilbilder entgegengesetzt dreht. Eine passende Brille bewirkt dann wieder, dass jedem Auge nur ein Teilbild zukommt.^{29,30}

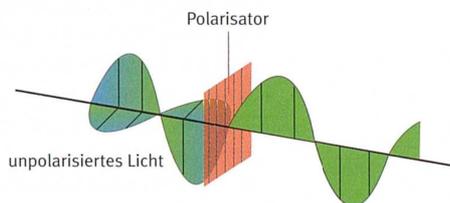


Abb. 8: Lineare Polarisation

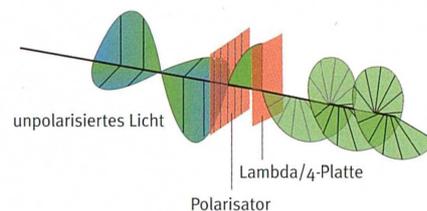


Abb. 9: Zirkulare Polarisation

29 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 157f.

30 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 25f.

2.3.5 Wellenlängenmultiplex, Interferenzfiltertechnik

Die menschliche Farbwahrnehmung beruht auf dem Dreizapfensystem, das jedem Zapfentyp eine der drei Grundfarben zuordnet, auf die dann die entsprechenden Zapfen empfindlich sind. Jede dieser Grundfarben wird in einem bestimmten Wellenlängenbereich wahrgenommen. Interferenzfilter filtern aus diesen Spektren schmale Frequenzbereiche heraus. Für jedes Auge gibt es bei der Wiedergabe mindestens ein solches Spektralband pro Farbe, das heißt, pro Kanal mindestens drei Spektralbänder, die zusammengenommen ein sogenanntes Wellenlängentriplet bilden. Das linke Teilbild verwendet zum Beispiel für Rot Wellenlängen im Bereich 630nm, während das rechte Teilbild für Rot mit Frequenzen von 646nm arbeitet. Eine Brille mit den passenden Interferenzfiltern trennt die beiden übereinanderprojizierten Teilbilder wieder und führt jedem Auge sein Teilbild zu. Mit immer kleiner werdenden Frequenzbereichen und vielen Wellenlängentriplets, also mehr als zwei Spektralbändern pro Farbe, könnten Effekte wie ein Herumsehen um Objekte erreicht werden.^{31,32}

2.3.6 Zeitmultiplex, Shutterverfahren

Beim Shutterverfahren werden die beiden Teilbilder abwechselnd präsentiert. Eine spezielle kabel-, funk- oder infrarotgesteuerte Brille schaltet synchron dazu das rechte oder linke Brillenglas dunkel. Das rechte Brillenglas ist also genau dann lichtdurchlässig wenn das rechte Teilbild präsentiert wird und lichtundurchlässig wenn das linke Teilbild präsentiert wird. Entsprechend arbeitet das linke Brillenglas. Die Brillen bestehen meist aus zwei mit Flüssigkeit gefüllten LCD-Gläsern, die lichtundurchlässig werden, sobald Strom angelegt wird.

Beim Shutterverfahren ist darauf zu achten, dass Wiedergabemedien mit hoher Bildwiederholfrequenz verwendet werden, da sich die Bildwiederholrate pro Auge halbiert. Um ein flimmerfreies Bild darzustellen sind 60 Bilder pro Sekunde für jedes Auge, das bedeutet insgesamt 120 Hertz empfehlenswert.^{33,34}

31 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 160f.

32 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 29

33 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 158f.

34 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 26f.

2.3.7 Orts- oder Richtungsmultiplex, Autostereoskopie

Im Bereich der Autostereoskopie wird schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts geforscht und entwickelt. Die Technologie arbeitet statt mit Brillen mit Linsen- oder Prismenrastern auf der Wiedergabeebene, welche die nebeneinander angeordneten Lichtpunkte der beiden Teilbilder ausschließlich zu dem für sie bestimmten Auge lenken. Das Pixel des linken Teilbildes liegt also direkt neben dem des rechten Teilbildes, aber beide Pixel werden so gelenkt, dass jedes Auge nur sein Pixel sieht. Alternativ werden Streifen-, Loch- oder schaltbare Masken so vor dem Bild positioniert, dass zu jedem Auge nur das Licht des entsprechenden Lichtpunktes gelangt. Diese Technologie ist sehr kompliziert und birgt noch viel Forschungspotenzial. Eine Weiterentwicklung wäre beispielsweise interessant, wenn sie die Zahl der möglichen Zuschauer erhöht oder eine Bewegung des Betrachters möglich macht.³⁵

2.4 Eigenschaften des Stereobildes

Damit aus den Teilbildern eine stereoskopische Darstellung wird, müssen sie richtig zueinander ausgerichtet oder „montiert“ werden. Die Nachbearbeitung ist bei der Stereofotografie ein sehr weitläufiges Gebiet. Neben der Teilbildausrichtung umfasst sie unter anderem auch künstlerische oder gestalterische Maßnahmen³⁶. In diesem Kapitel wird daher nur auf die auf der Teilbildausrichtung beruhenden Eigenschaften eines Stereobildes eingegangen, da deren Kenntnis für die Wahl der richtigen Kameraeinstellung Voraussetzung ist.

2.4.1 Distanzen und Tiefenspielraum

Die Kenntnis der im Folgenden erklärten Begriffe ist sowohl für die Aufnahme als auch die Wiedergabe wichtig.

³⁵ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 162-164

³⁶ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 285

Ein Stereobild ist aus verschiedenen Punkten und Bereichen aufgebaut. Der Kamerastandort bei der Aufnahme wird als Basis bezeichnet. Der Nahpunkt beschreibt den Punkt in der aufgenommenen Szene mit dem kleinsten Abstand zu der oder den Kamera(s). Die reale Entfernung in der Szene zwischen Kamera und Nahpunkt ist die Nahpunktweite. Entsprechend heißt der am weitesten von der oder den Kamera(s) entfernte und aufgenommene Punkt Fernpunkt und die Entfernung Fernpunktweite.^{37,38}

Der Tiefenumfang entspricht dem Raum zwischen Nah- und Fernpunkt. Sowohl die Szene als auch das Stereobild haben einen bestimmten Tiefenumfang, welcher die reale aufzunehmende oder die wiedergegebene Tiefe beschreibt.

Ein Stereo-3D-System besteht aus Kamera, Nachbearbeitungssystem und Wiedergabemedium. Die maximal in einem solchen System mögliche Tiefenausdehnung, wird als Tiefenspielraum bezeichnet. Der Tiefenspielraum jedes einzelnen Bestandteils des Stereo-3D-Systems beschränkt den Tiefenspielraum des ganzen Systems. Bei der Aufnahme bestimmen Faktoren die Stereobasis, Brennweite, Aufnahmeformat und Distanzen den Tiefenspielraum.

Eine Angabe von Tiefenausdehnungen, wie Tiefenumfang und -spielraum in Meter ist möglich, aber nicht sinnvoll, da sich die Disparitäten nicht linear zur Tiefe ändern. Eine Szene mit einem Tiefenumfang von 100 Metern, die sich ab einem fünf Meter entfernten Nahpunkt nach hinten erstreckt, ist beispielsweise nicht gleich zu behandeln wie eine Szene mit dem gleichen Tiefenumfang, die sich aber ab einem 50 Meter entfernten Nahpunkt nach hinten erstreckt. Daher werden Tiefenumfang und -spielraum eher in Pixeln oder manchmal auch in Prozent der Bildbreite angegeben und verglichen.³⁹

2.4.2 Disparitäten

Die Teilbildausrichtung oder Montage der beiden Teilbilder beschäftigt sich mit der richtigen horizontalen und vertikalen Ausrichtung der beiden Teilbilder zueinander. Sie fügt die beiden Teilbilder zu einem stereoskopischen Bild zusammen und ist maßgeblich

37 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 14

38 Gerhard Kuhn, Stereofotografie und Raumbildprojektion, S. 23

39 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 372-374

für einen guten Raumeindruck verantwortlich.⁴⁰

Werden beide Teilbilder übereinandergelagert dargestellt, weisen einander entsprechende Punkte einen horizontalen Versatz auf. Die einzige Ebene, in der die Teilbilder sich decken, in der es also keine Disparitäten gibt, ist die Nullebene oder der Fixationspunkt. Objekte vor der Nullebene weisen eine negative, Objekte hinter der Nullebene eine positive Disparität auf. Je größer die Verschiebung zwischen zwei entsprechenden Bildpunkten ist, desto weiter entfernt von der Nullebene, die für den Betrachter auf der Wiedergabeebene liegt, wird der fusionierte Punkt wahrgenommen. Durch eine Verschiebung der Nullebene nach vorn oder hinten kann somit bei der Teilbildausrichtung und Nachkonvergenz festgelegt werden, wieviel Raum des Stereobildes vor und wieviel hinter der Nullebene beziehungsweise Wiedergabeebene liegt. Im Bild 1 liegt die Nullebene im Vordergrund auf der Blüte mit dem kleinsten Abstand zur Kamera, dem Nahpunkt. Bei der Betrachtung dehnt sich die Tiefe von dieser Blüte, die auf der Wiedergabeebene zu liegen scheint, nach hinten aus. Der Hintergrund ist ungekreuzt disparat. Bildpunkte des linken Teilbilds (cyan eingefärbt) befinden sich links der entsprechenden Bildpunkte des rechten Teilbilds (rot eingefärbt).



Bild 1

40 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 17

Im Bild 2 weist der Baum im Hintergrund keine Disparitäten auf, stellt also die Nullebene dar. Das Stereobild erstreckt sich vom Hintergrund aus nach vorne und scheint aus der Wiedergabeebene heraus auf den Betrachter zuzukommen. Hierbei sind die Disparitäten des Vordergrunds gekreuzt disparat. Zusammengehörende Punkte befinden sich im linken Teilbild weiter rechts als im rechten Teilbild.



Bild 2

Bei Aufnahmen mit konvergenten Kameras ist die Nullebene weitgehend festgelegt. Sie liegt am Schnittpunkt der beiden optischen Achsen bei der Aufnahme. Bei Aufnahmen mit parallelen Kameras decken sich die Teilbilder bei der Aufnahme in der stereoskopischen Unendlichkeit. Hier wird durch die horizontale Verschiebung der Teilbilder bei der Montage eine Nachkonvergenz durchgeführt, mit der der Fixationspunkt und die Nullebene festgelegt werden. Das Stereobild wird hierbei meist so montiert, dass sich der Großteil des Tiefenraums hinter der Nullebene befindet.^{41,42}

In einem guten Stereobild sollten die Disparitäten unter dem Grenzwert von 90 Winkelminuten bleiben. Diese 90 Winkelminuten sind sowohl von der Aufnahme als auch von der Wiedergabegeometrie beeinflussbar und entsprechen der

41 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 369f., 144f., 365

42 Oliver Röder, Grundlagen der Stereoskopie, S. 17

Maximalausdehnung des Tiefenumfangs. Bei Bildern, deren Nahpunkt auf der Nullebene liegt, sollte der Versatz der Fernpunkte 90 Winkelminuten nicht überschreiten. Befinden sich dagegen Objekte vor der Leinwand, müssen auch deren Disparitäten berücksichtigt werden. Hat der Nahpunkt beispielsweise einen Versatz von 20 Winkelminuten, dürfen die Fernpunkte höchstens um 70 Winkelminuten verschoben sein.

Der Tiefenumfang kann also innerhalb des Tiefenspielraums verschoben werden. Die obere Grenze des Tiefenspielraums ist durch die maximale Fernpunktweite festgelegt. Zudem sollte die Disparität der Fernpunkte den Augenabstand nicht überschreiten, da dann die Augen divergieren müssten. Entspricht die Disparität der Fernpunkte dem Augenabstand, liegen sie für den Betrachter im Unendlichen. Dagegen stellt der halbe Betrachtungsabstand die untere Grenze des Tiefenspielraums dar. Die minimale Nahpunktweite bei der Wiedergabe ist durch die Wiedergabegeometrie beschränkt.⁴³

2.4.3 Stereofenster

Bei der Betrachtung stereoskopischer Bilder entsteht der Eindruck durch ein imaginäres Fenster auf die Szene zu blicken. Dieser Eindruck entsteht durch die deckungsgleichen Bildränder, die wie ein Rahmen wirken. In der Regel liegt dieses sogenannte Stereofenster oder Scheinfenster auf der Nullebene. Dennoch dürfen beide Begriffe nicht gleichgesetzt werden, da die Nullebene die Ebene, an der keine Disparitäten vorhanden sind, bezeichnet. Bei Objekten die nach vorne aus dem Scheinfenster herausragen, sollte darauf geachtet werden, dass sie nicht vom Bildrand beschnitten werden. Wie oben beschrieben wirkt eine stereoskopisch dargestellte Szene wie durch einen Rahmen betrachtet. Die Tatsache, dass Objekte, die vor dem Rahmen liegen, von diesem Rahmen abgeschnitten werden, irritiert die menschliche Wahrnehmung, da dies beim natürlichen Sehen nicht möglich ist. Wegen der Disparitäten an den Bildrändern werden vor und hinter der Nullebene schmale Streifen nur monokular abgebildet. Bei den nach vorne aus dem Scheinfenster herausragenden Objekten fehlt also an den Bildrändern zusätzlich die stereoskopische Information. Dies führt in Verbindung mit

43 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 191-193

der zuerst erklärten Irritation zu einer Überforderung des Wahrnehmungsapparates.^{44,45}

Die Nullebene im Bild 2 liegt im Hintergrund. Das bedeutet, dass der gesamte Tiefenumfang vor der Nullebene und in diesem Fall auch vor dem Stereofenster liegt. Die dadurch hervorgerufenen Rahmenverletzungen sind besonders deutlich am rechten Bildrand zu sehen. (vgl. auch Anhang: Bild 14, rechter Rand)

Um solche Rahmenverletzungen zu vertuschen, gibt es, natürlich nur in gewissen Grenzen, die Möglichkeit, das Stereofenster von der Nullebene zu lösen. Hierfür muss am seitlichen Bildrand eines Teilbildes ein schmaler Streifen abgeschnitten werden, damit sich die Bildseiten in einer anderen Ebene decken. Ein so teilweise verschobenes oder gewölbtes Stereofenster wird Schwebefenster genannt.⁴⁶

2.4.4 Binokulare Rivalität

Binokulare Rivalität entsteht, wenn die Unterschiede zwischen den Teilbildern so groß sind, dass sie nicht mehr fusioniert oder summiert, das heißt zu einem Mittelbild verschmolzen werden können. Ursächlich hierfür sind aber nicht nur zu große Disparitäten, sondern auch große Kontraste in der Farbe, Helligkeit, Größe oder Schärfe der beiden Teilbilder. Damit als Folge der fehlenden Fusion keine Doppelbilder entstehen, gewichtet die Wahrnehmung ein Teilbild mehr als das andere, welches oft sogar komplett ausgeblendet wird. Diese Gewichtung, beziehungsweise Ausblendung wechselt aber meist zwischen linkem und rechtem Auge, weshalb das wahrgenommene Bild an den Problemstellen zwischen den Teilbildern hin- und herspringt. Da binokulare Rivalität die Stereopsis nicht beeinträchtigt, kann an solchen Stellen dennoch stereoskopische Tiefe wahrgenommen werden. Binokulare Rivalität ist auf stereoskopische Darstellungen beschränkt. Beim natürlichen Sehen wird sie verhindert, da kritische Punkte meist in den Randbereichen der Netzhaut abgebildet werden, in denen nicht mehr scharf gesehen wird. Außerdem wirkt hier die sogenannte Suppression, die Unterdrückung solcher Bildstellen.⁴⁷

44 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 186, 370f., 520

45 Herbig, G. H.: Stereofotografie – Homepage Gerhard P. Herbig, Internetseite http://www.herbig-3d.de/german/stereofotografie_frame.htm?own vom 27.12.2011, aufgerufen am 2.10.2014

46 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 522

47 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 72f., 521

2.5 Aufnahmeparameter und Kameraeinstellungen

Die mathematischen Berechnungen bezüglich den Einstellungen für ein Stereobild beruhen im wesentlichen auf sieben wichtigen Parametern. Im Bereich der Aufnahme sind die Stereobasis, die Konvergenzweite, die Brennweite und die Sensorgröße zu nennen. Im Bereich der Wiedergabe spielen der Betrachtungsabstand, die Bildbreite und der Augenabstand eine wichtige Rolle.

Die bei der Kameraausrichtung relevanten Parameter der Stereobasis, Konvergenz und Brennweite sind voneinander und von der Aufnahmedistanz abhängig.⁴⁸

2.5.1 Konvergenz

Vergenzen sind wichtig für die menschliche Wahrnehmung und somit auch für stereoskopische Abbildungen. Divergenzen, Schielbewegungen nach außen, sollten bei Stereobildern vermieden werden, da sie nicht der natürlichen Augenstellung entsprechen und zu nicht fusionierbaren Bildern führen. Die Konvergenz im Stereobild dagegen, durch die Kamera- oder Teilbildausrichtung bestimmt, legt die Lage des Fixationspunktes beziehungsweise der Nullebene fest. Hier kreuzen sich Achsen der beiden Perspektiven des Stereobildes und die Teilbilder sind entsprechend der natürlichen Wahrnehmung deckungsgleich. Die bei der Aufnahme oder Nachbearbeitung erreichte Konvergenz im Stereobild muss unterschieden werden von der Konvergenz der Augen. Letztere wird beim Betrachten stereoskopischer Darstellungen durch die Montage, unter anderem durch die Lage der Nullebene, bestimmt, beim natürlichen Sehen durch die reelle Entfernung des Fixationspunktes.⁴⁹

Für die Ausrichtung der beiden Kameras zueinander gibt es grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten. Die Parallelausrichtung mit parallelen optischen Achsen, die Fernpunkt Konvergenz, bei der sich die optischen Achsen im Fernpunkt kreuzen und die Objektkonvergenz mit im Fixationspunkt gekreuzten optischen Achsen.⁵⁰

Bei einer Parallelausrichtung der Kameras liegt die Nullebene in der stereoskopischen

48 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 380

49 Holger Tauer, Stereo 3D, S.362f.

50 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 344

Unendlichkeit. Es muss also, wie im Abschnitt 2.4.2 Disparitäten beschrieben, eine nachträgliche Konvergenz durchgeführt und somit die Nullebene bestimmt werden.⁵¹

Bei konvergenten Kameras ist der Fixationspunkt schon bei der Aufnahme bestimmt. Je mehr die Kameras konvergieren, desto weiter vorne befindet er sich. Mit der Konvergenz ist auch die Nullebene bestimmt. Genau genommen ist sie gar keine Ebene mehr, da der Bereich an dem die Disparitäten gleich Null sind auf eine vertikale Linie beschränkt ist. Die Nullebene kann somit bei der Postproduktion, wenn überhaupt, nur noch sehr geringfügig verändert werden. Vor, hinter und seitlich dieser vertikalen Linie entstehen Fehldisparitäten und trapezförmige Verzerrungen. Für eine konvergente Kameraausrichtung spricht die Nachbildung des natürlichen Sehens, bei dem die Augen auch konvergieren. Allerdings wird bei der menschlichen Wahrnehmung nur ein sehr kleiner Bereich um den anvisierten Punkt scharf gesehen. Die konvergenzbedingten Bildverzerrungen fallen daher im Gegensatz zum Stereobild nicht auf, da sie nur in den Randbereichen der Netzhaut unscharf wahrgenommen oder unterdrückt werden.⁵²

Soweit das Rig Konvergenzen technisch zulässt, sind sie dennoch in bestimmten Situationen sinnvoll. Sie können statt sehr kleiner Basis- oder Brennweiten, zur räumlichen Abbildung sehr flacher Objekte oder, an die Schärfenebene gekoppelt, bei Lifeübertragungen, die keine nachträgliche Konvergenz erlauben, verwendet werden. Die technischen Anforderungen für eine exakte konvergente Kameraausrichtung sind hoch, weshalb in dieser Arbeit keine konvergent aufgenommenen Stereobilder vorhanden sind.⁵³

Eine Zwischenlösung bietet die Shiftsensortechnik. Shiftsensoren sind horizontal und parallel zur Objektivenebene verschiebbare Bildsensoren. Durch die Verschiebung, den Shift, gelangen die Bildwandler in den Rand des Bildkreises des Objektivs. Dadurch wird die Projektion der Bildpunkte auf dem Sensor verschoben. Mit zwei Shiftsensorkameras kann so eine Konvergenz erreicht werden, die keine verdrehten Ebenen und trapezförmigen Verzerrungen mit sich bringt. Das konvergenzbedingte Problem überdimensionaler Disparitäten im Vorder- und Hintergrund besteht jedoch weiterhin. Shiftsensoren sind technisch sehr aufwändig und die verwendeten Objektive sollten speziell berechnet sein und sich durch einen großen Bildkreis auszeichnen. Statt

51 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 346f.

52 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 363, 365

53 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 366

der Bildebene kann auch die Objektivenebene verschoben werden. Dazu sind sogenannte Shiftobjektive oder Balgenobjektive nötig.⁵⁴

2.5.2 Stereobasis

Der Abstand zwischen den optischen Achsen der beiden Perspektiven eines Stereo-3D-Systems, also meist der beiden Objektive, heißt Stereobasis. Sie ist das Hauptwerkzeug, um Tiefenspielraum und -umfang aneinander anzupassen. Mit anderen Worten bestimmt sie das Verhältnis von aufzunehmender und wiedergegebener Tiefe. Die Stereobasis charakterisiert das Stereobild wesentlich. Sie legt die beiden Perspektiven fest, welche sich auch bei der Nachbearbeitung und Teilbildausrichtung, beziehungsweise Nachkonvergenz, nicht mehr ändern lassen.

Um die passende Stereobasis zu ermitteln, ist es hilfreich sich zu überlegen, wie groß der Augenabstand eines Menschen sein müsste, um die vorliegende Szene räumlich wahrzunehmen. Die Grundlage dieser Überlegung ist der normale Augenabstand von 6,5 cm, der räumliches Sehen bis etwa 20 Meter Entfernung zulässt.⁵⁵

Ist die Stereobasis größer als der Augenabstand, wird sie als Großbasis bezeichnet. Zum Einsatz kommt sie beispielsweise bei der Aufnahme von Szenen mit großer Tiefenausdehnung, wie Landschaftsaufnahmen. Dabei wird die Originaltiefe komprimiert und an den geringen Tiefenspielraum des Bildes angepasst. Auch weit entfernte Objekte können so noch stereoskopisch dargestellt werden. Auf der anderen Seite jedoch weisen Objekte im Vordergrund oft zu starke Disparitäten auf oder werden sogar nur noch von einer Kamera erfasst. Im Bild 3 wird mit einer Stereobasis von 10cm ein sehr großer Tiefenumfang aufgenommen. Der Tiefeneindruck der Baumgruppe ist wegen der großen Basis gut. Der Nahpunkt, die Wiese, liegt unmittelbar vor der Kamera, weshalb sie einen zu großen Versatz aufweist und Probleme bei der Betrachtung hervorruft. (vgl. auch: Bild 14)

54 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 345f., 364, 368, 523

55 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 349f.

*Bild 3*

Um die Betrachtungsprobleme zu beseitigen, muss in solchen Situationen entweder die Stereobasis oder der Tiefenumfang verringert werden. In Bild 4 wurde die Stereobasis auf 1cm verringert, was eine Verschlechterung des Tiefeneindrucks und einen Räumlichkeitsverlust nach sich zieht. (vgl. auch Bild 13)

*Bild 4*

Ein verringerter Tiefenumfang kann beispielsweise durch Zoom am Vordergrund vorbei und die ausschließliche Aufnahme des Hintergrunds erreicht werden. Diese Maßnahme wurde im Bild 5 ergriffen. Die Kamerajustierung ist, abgesehen von der Brennweite, dieselbe wie im Bild 3, allerdings wurde im Bild 5 der Vordergrund verringert. (vgl. auch Bild 8)



Bild 5

Beide Maßnahmen verbessern die Tiefengestaltung des Stereobildes, beseitigen aber die Problemstellen nicht vollständig.

Große Basisweiten weisen also einen kleineren Tiefenspielraum der Kamera auf als kleine Basisweiten. Großbasisaufnahmen lassen sich am besten mit Side-by-Side-Rigs umsetzen.⁵⁶

Eine Stereobasis, die kleiner ist als der Augenabstand, wird als Kleinbasis bezeichnet. Ihr Hauptverwendungszweck liegt im Bereich der Makroaufnahmen mit sehr geringen Tiefenausdehnungen. Kleine Basisweiten expandieren den geringen Tiefenumfang einer Szene oder eines Objektes, passen ihn an den größeren Tiefenspielraum des Bildes an und ermöglichen so eine stereoskopische Darstellung. Eine Kleinbasis lässt sich am besten mit Spiegel-Rigs umsetzen. Das Bild 6 wurde mit einer Basisweite von 0,5cm

⁵⁶ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 349-352

aufgenommen. Das Stereobild ist plastisch und hat einen angenehmen Raumeindruck.

Bild 6

Das Bild 7 wurde mit einer Basisweite von 1,0cm aufgenommen. Dadurch wird die stereoskopische Tiefe stärker, strengt aber den Betrachter mehr an.

Bild 7

Neben der Stereopsis liefert auch die binokulare Verdeckung Tiefeninformationen. Bei großen Basisweiten ist es aber möglich, dass sie zu groß wird und zu binokularer Rivalität führt. Mit einer Verkleinerung der Stereobasis kann dies verhindert werden. Allerdings nimmt dann die plastische Darstellung einzelner Gegenstände ab. Wenn die Objekte selbst eher flach erscheinen und die Wahrnehmung der Tiefe zwischen ihnen durch die Verdeckungsinfomation verursacht wird, spricht man vom „Kulisseneffekt“. Der Kompromiss bei Szenen mit großem Tiefenumfang besteht also zwischen einem durchgehend guten räumlichen und plastischen Eindruck, aber zu großen Disparitäten im Vordergrund und einer abgeflachten Tiefendarstellung aber einem fusionierbaren Vordergrund. Die Lösung bietet die Multibasistechnik. Dafür werden mehrere Bilder mit verschiedenen Basisweiten gemacht. In der Postproduktion werden dann die jeweils passenden Bildbereiche zu einem Stereobild zusammengefügt.⁵⁷ Aufnahmen mit Groß- oder Kleinbasis entsprechen nicht der natürlichen menschlichen Wahrnehmung und machen Ansichten möglich, die mit dem natürlichen Augenabstand unmöglich wären. Durch den Vergleich mit der gewohnten Sichtweise können bestimmte Effekte entstehen. Großbasisaufnahmen lassen Objekte in der Szene verkleinert, wie durch die Augen eines Riesen betrachtet, wirken (Modelleffekt). Kleinbasisaufnahmen dagegen erzeugen einen Vergrößerungseffekt und eine Zwergperspektive (Gigantismus).⁵⁸

2.5.3 Brennweite

Die Wahl der Brennweite hat beim Stereobild, ebenso wie beim monoskopischen Bild, die Funktion des Zoomens. Mit der Brennweite wird also der aufzunehmende Bildausschnitt festgelegt. Zusammen mit der Perspektive stellt sie somit ein wichtiges gestalterisches Mittel dar. Zudem sind Nah- und Fernpunkte von der Brennweite und Perspektive abhängig und wirken sich, im Zusammenhang mit der Stereobasis, auf die Tiefe im Stereobild aus.

Weitwinkelobjektive zeichnen sich mit ihren kurzen Brennweiten allgemein durch eine große Schärfentiefe und einen großen Bildwinkel, das heißt eine Expansion des Raumes und mehr dargestellten Vordergrund aus. Letzteres bewirkt auch bei 2D-Bildern eine

⁵⁷ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 353-355, 367

⁵⁸ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 106f., 350, 514, 508

plastischere Darstellung der Objekte. Weitwinkelobjektive eignen sich daher gut für Stereoaufnahmen, vor allem, weil der aufgenommene Nahbereich auch beim natürlichen Sehen für die stereoskopische Tiefenwahrnehmung bedeutend ist. Wenn dieser Effekt bei weiter entfernten Objekten erzielt werden soll, muss die Stereobasis und entsprechend die Brennweite vergrößert werden.

Lange Brennweiten dagegen weisen eine geringe Schärfentiefe auf, komprimieren die Tiefe und bewirken oft einen Kulisseneffekt. Die Objekte selbst verlieren hierbei mit zunehmender Entfernung ihre Räumlichkeit, während die Tiefe zwischen ihnen weiterhin deutlich ist. Teleobjektive können somit auch gute räumliche Bilder liefern. Bei der Aufnahme sollte allerdings auf den Tiefenumfang der Szene und die Aufnahmedistanz geachtet werden. Zwischen Kamera und Nahpunkt sollte viel freier Platz sein, damit die Disparitäten am Nahpunkt nicht zu groß werden. Lange Brennweiten erfordern zudem eine exakte Kameraausrichtung, da kleine Fehler schnell auffallen. Das Bild 8 wurde mit einer Brennweite von 63mm und einer Basis von 10cm aufgenommen.



Bild 8

Es zeichnet sich durch einen starken Tiefeneindruck aus. Verglichen mit Aufnahmen mit kleinerer Brennweite (Bild 13, 14) scheint die Tiefe aber deutlich komprimiert. Dies

lässt sich vor allem am Verlauf des Weges beobachten. Die Betrachtung ist aufgrund der großen Disparitäten und der Rahmenverletzungen im Vordergrund, vor allem am rechten unteren Bildrand, anstrengender als beispielsweise die Betrachtung des Bildes 13 mit kleinerer Stereobasis und kleinerer Brennweite.

Für stereoskopische Aufnahmen sind Festbrennweiten am besten geeignet. Sie sind genau auf diese eine Brennweite hin optimiert und bestechen somit durch eine höhere Abbildungsqualität, weniger Abbildungsfehler und meist geradere optische Achsen als Zoomobjektive.⁵⁹

2.5.4 Stereofaktor

Der Stereofaktor beschreibt das Verhältnis der im Stereobild dargestellten Tiefe zur realen Tiefe der Szene. Er gibt die Tiefenausdehnung oder -kompression maßstäblich an, das bedeutet er bezieht eine Bildvergrößerung oder -verkleinerung mit ein. Der Stereofaktor kann entweder Realszene und Aufnahme, Aufnahme und Wiedergabe oder komplett Realszene und Wiedergabe vergleichen. Ist der Stereofaktor gleich 1, entspricht die Tiefe im Stereobild der Realität. Ein kleinerer Stereofaktor zeigt eine Kompression, ein größerer Stereofaktor eine Expansion der Tiefe an. Ist der Stereofaktor gleich 0, handelt es sich um ein monoskopisches Bild.

Beeinflusst wird der Stereofaktor maßgeblich von der Stereobasis, der Konvergenz, der Brennweite, der Aufnahmedistanz, der Teilbildausrichtung, der Projektionsgeometrie und dem Betrachtungsabstand.

Die Stauchung oder Streckung ist aber selten im gesamten Tiefenbereich eines Stereobildes linear. Um genau darzustellen an welcher Stelle des Bildes wie stark komprimiert oder expandiert wird, wäre eine Darstellung der Tiefe als Kurve nötig. Da der Stereofaktor aber einen linearen Tiefenverlauf angibt, dient er nur zur groben Orientierung bezüglich der Tiefendarstellung.⁶⁰

⁵⁹ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 355-359, 380

⁶⁰ Holger Tauer, Stereo 3D, S. 376-379

2.5.5 Justierung

Bei der Justierung der Kamera(s) ist zu allererst auf ein stabiles Rig zu achten. Die Kamera(s) sollte(n), einmal ausgerichtet, diese Ausrichtung beibehalten und nicht wackeln. Für die korrekte Justierung der Kameras zueinander empfiehlt sich die Verwendung einer parallel vor dem Rig aufgestellten Testtafel. Nun werden die Bilder, die die beiden Kameras von der Testtafel machen, verglichen. Durch angezeichnete Entfernungen, Farbverläufe, schwarz-weiß Muster und sonstige Testfelder auf der Testtafel werden Eigenschaften wie die Parallelausrichtung, die Stereobasis, Farb-, Helligkeits- und Kontrastwerte oder der Weißabgleich überprüft. Leider ist es schwer, vor allem im Consumerbereich zwei in ihren Abbildungseigenschaften identische Kameras zu finden. Mangelnde Qualität führt häufig zu unterschiedlichen optischen Achsen. Die optische Achse ist die „gerade Verbindungslinie der Krümmungsmittelpunkte“⁶¹ in diesem Fall der Objektive. Das bedeutet es besteht die Gefahr abweichender optischer Mittelpunkte in beiden Teilbildern.⁶²

2.5.6 Faustregeln

Um nun alle in diesem Kapitel beschriebenen Parameter in das richtige, zur Szene passende Verhältnis zu bringen existieren viele Formeln. Damit aber die Aufnahme durch das viele Rechnen nicht zu kompliziert wird, gibt es drei Faustregeln, welche sich auf die Arbeit mit dem Kleinbildformat beziehen. Beim 35mm-Filmformat sind sie immer noch anwendbar, bei Broadcast oder Consumerkameras muss jedoch wegen der kleinen Sensoren ein Puffer dazuaddiert werden.

Gemäß der ersten Faustregel darf die Stereobasis (in cm) nicht größer sein als der Quotientenwert aus Nahpunktweite (in cm) und Brennweite (in mm).

Die zweite Faustregel besagt, dass die Mindestnahpunktweite (in cm) gleich dem Produkt aus Stereobasis (in cm) und Brennweite (in mm) ist.

61 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Spektrum Akademischer Verlag: Lexikon der Physik, Achse, optische, Heidelberg, Internetseite <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/achse-optische/168> von 1998, aufgerufen am 09.10.2014

62 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 339-341

Entsprechend der ersten lautet die dritte Faustregel, dass die Brennweite (in mm) dem Quotientenwert aus Nahpunktastand (in cm) und Stereobasis (in cm) entsprechen sollte.^{63,64}

2.6 Wiedergabegeometrie

Neben der Aufnahme sind auch bei der Wiedergabe einige Parameter zu beachten, die einen Einfluss auf die Tiefendarstellung und Qualität des Stereobildes haben. Bei unbewegten Bildern spielt neben der Auflösung auch die Wiedergabegeometrie eine entscheidende Rolle. Bei der Darstellung mittels Bildschirmen oder Druckerzeugnissen ist auf die Größe der Disparitäten und den Betrachtungsabstand zu achten. Wesentlich mehr Parameter sind bei Verwendung von Projektoren zu berücksichtigen. Hier wirken sich Justierung der Projektoren zueinander, deren Brennweite, der Abstand zwischen Projektor und Leinwand, der Abstand zwischen Leinwand und Betrachter, die Vergrößerungsfaktoren und die dargestellten Disparitäten auf das wiedergegebene Tiefenbild aus. Es wurde auf eine genauere Ausführung all jener Einflussfaktoren verzichtet, da sie für diese Arbeit zu umfangreich wäre.⁶⁵

2.7 Eigene Aufnahmen

Die in der Arbeit enthaltenen Stereobilder wurden mit der Verschiebetechnik aufgenommen. Hierfür wurde eine Schiene angefertigt, in der ein Block nach rechts oder links verschoben werden kann. Auf diesem Block wurde mit einer Schraube die Kamera, eine „Casio Exilim ex-zr200“, fixiert. Auf diese Weise konnte die Kamera relativ exakt parallel verschoben werden. Um die Verschiebung möglichst horizontal auszurichten, kam eine Wasserwaage zum Einsatz. Mit dem kostenlosen

63 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 335-337

64 Herbig, G. H.: Stereofotografie – Homepage Gerhard P. Herbig, Internetseite http://www.herbig-3d.de/german/stereofotografie_frame.htm?own vom 27.12.2011, aufgerufen am 2.10.2014

65 Holger Tauer, Stereo 3D, S. 206

Downloadprogramm „StereoPhoto Maker Version 5.06“ wurden die Teilbilder manuell justiert, anschließend mit Farbfiltern belegt und zu einem rot-cyan Anaglyphenstereobild zusammengefügt.

Das Ergebnis übertraf die Erwartungen bei weitem. Trotz der sehr unprofessionellen und fehleranfälligen Aufnahmetechnik und der qualitativ nur auf den Consumerbereich ausgerichteten Kamera hatten die fertigen Stereobilder eine gute Tiefenwirkung. Wegen der zeitlich versetzten Aufnahme beschränkt sich die Motivwahl allerdings bei der Verschiebetechnik auf unbewegte Objekte.

Zu den Fotos im Anhang und im Text sind im Bilderverzeichnis die verwendete Stereobasis und Brennweite angegeben, sodass deren theoretisch beschriebener Einfluss auf die Tiefendarstellung am Praxisbeispiel nachvollzogen werden kann.

3 Stereoskopie – Kunst für Jeden

Die vorangegangenen Kapitel geben einen Einblick in die komplizierte, weitläufige und vielschichtige Welt der Stereoskopie.

Eine umfassende, präzise und ausführliche Auseinandersetzung mit allen Gebieten der Stereoskopie hätte, wie auch oft schon im Text erwähnt, den Rahmen einer Seminararbeit bei weitem überschritten. Die Kapitel enthalten jedoch die wichtigsten Informationen und auch Details, um das Prinzip der Stereoskopie zu verstehen. So wurde die natürliche räumliche Wahrnehmung erklärt und die Funktionsprinzipien und Methoden von Aufnahme und Wiedergabe dargestellt. Mit diesen technischen Grundlagen ist dieses Gebiet aber noch lange nicht erschöpft. Der künstlerische Aspekt wurde beispielsweise ausgespart und es gibt bei der Kameraeinstellung und Teilbildausrichtung noch weitaus mehr Details und Feinheiten als hier erläutert wurden. Bei einer eingängigen Beschäftigung mit diesem Thema können verblüffende Ergebnisse und Effekte erzielt werden.

Faszinierend ist es meiner Meinung nach, dass es, wie die Stereobilder dieser Arbeit zeigen, trotz der Komplexität möglich ist, auch mit einfachen Mitteln gute Stereobilder zu erzeugen. Jeder kann, auch ohne spezielle technische Mittel, seine Fotos um die dritte Dimension erweitern. Das dafür nötige Basiswissen ist in dieser Arbeit enthalten. Genau genommen reicht aber das Verständnis für die Funktionsweise der menschlichen Wahrnehmung, Experimentierfreude und vor allem Faszination für die räumliche Wahrnehmung und der Wunsch ihrer Nachbildung aus.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Name	Seite	Quelle
Abb. 1	Disparitäten	S. 7	Holger Tauer, Stereo 3D, S 57, bearbeitet
Abb. 2	Parallaxe und Teilbildversatz	S. 7	Holger Tauer, Stereo 3D, S.22f., bearbeitet
Abb. 3	Horopter und Panumraum	S. 8	Holger Tauer, Stereo 3D, S. 58
Abb. 4	Parallelblick	S. 14	Holger Tauer, Stereo 3D, S. 147, bearbeitet
Abb. 5	Kreuzblick	S. 14	Holger Tauer, Stereo 3D, S. 147, bearbeitet
Abb. 6	Stereoskop nach Charles Wheatstone	S. 15	Holger Tauer, Stereo 3D, S. 148
Abb. 7	Anaglyphenverfahren	S. 16	Primärquelle: Maier, F. (2008b): Stereoskopische Filmproduktion - Teil 2: Technologien für das 3D-Kino; in Professional Production (09/2008); http://www.professional-production.de/ ; http://www.professional-production.de/ ; Abruf vom 18.06.2011
Abb. 8	Lineare Polarisation	S. 17	Holger Tauer, Stereo 3D, S. 157, bearbeitet
Abb. 9	Zirkulare Polarisation	S. 17	Holger Tauer, Stereo 3D, S. 157, bearbeitet

Bilderverzeichnis

Bild, Nummer	Stereobasis, in cm	Brennweite, in mm
1	0,5	28
2	0,5	28
3	10	24
4	1	24
5	10	78
6	0,5	86
7	1	86
8	10	63
9	0,5	78
10	1	86
11	0,5	63
12	5	63
13	0,5	24
14	10	24

Quellenverzeichnis

Primärliteratur

- Kuhn, G.: Stereofotografie und Raumbildprojektion, vfv Verlag für Foto, Film und Video, 2. Auflage, Gilching, 1999
- Röder, O.: Grundlagen der Stereoskopie, Analyse der Aufnahme und Projektion von 3D-Bildern, AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, Saarbrücken, 2012
- Tauer, H.: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2010

Sekundärliteratur

- Gautzsch, S.: 3D-Kino im Wohnzimmer: Analyse einer Unterhaltungs-Revolution durch Stereoskopie, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, 2012

Internetquellen

- Butt, S.: Geschichte der Fotografie, Internetseite http://www.planet-wissen.de/kultur_medien/fotografie/geschichte_der_fotografie/, vom 05.09.2014, aufgerufen am 06.10.2014
- Herbig, G. H.: Stereofotografie – Homepage Gerhard P. Herbig, Internetseite http://www.herbig-3d.de/german/stereofotografie_frame.htm?own vom 27.12.2011, aufgerufen am 2.10.2014
- Kohler, M.: Historische Entwicklung der Stereophotographie, Internetseite http://www.3d-historisch.de/Geschichte_Stereoskopie/Geschichte_Stereoskopie.htm von 2004, aufgerufen am 06.10.2014

- Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Spektrum Akademischer Verlag: Lexikon der Physik, Achse, optische, Heidelberg, Internetseite <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/achse-optische/168> von 1998, aufgerufen am 09.10.2014

Sonstige Quellen

- Walther, S.: Kategorisierung tiefenwahrnehmungsförderlicher virtueller Hinweise, Belegarbeit eingereicht am 31.05.2011, Professur für Mediengestaltung TU-Dresden, Internetseite <https://mg.inf.tu-dresden.de/studentische-arbeiten/arbeiten/615>, aufgerufen am 09.10.2014
Genutzte PDF-Datei: https://mg.inf.tu-dresden.de/sites/mg.inf.tu-dresden.de/files/beleg_walther_sebastian.pdf

Die folgende Quelle wurde für die gesamte Arbeit als Zusatzquelle zu den direkten, in den Fußnoten genannten Quellen für vertiefende, weiterführende oder zusätzliche Information verwendet.

- Herbig, G. H.: Stereofotografie – Homepage Gerhard P. Herbig, Internetseite http://www.herbig-3d.de/german/stereofotografie_frame.htm?own vom 27.12.2011, aufgerufen am 2.10.2014

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Bad Wörishofen, den

Ort

Datum

Unterschrift des Schülers