

Historie und Spektrum von 3D-Techniken

Prof. Dr. Jochen Koubek

Angewandte Medienwissenschaft: Digitale Medien

Universität Bayreuth

95440 Bayreuth

jochen.koubek@uni-bayreuth.de

1 Einführung

3D ist wieder einmal im Kommen und wird derzeit in einer Flut von Artikeln, Reportagen und Berichten beschrieben. In dem vorliegenden Aufsatz wird der Versuch unternommen, die Informationsfülle in ein einfaches und bewährtes Raster zu sortieren, das geeignet ist, vorhandene und kommende Beiträge sinnvoll aufzubewahren. Getestet wird dies an zentralen Stichworten, die aktuell den Diskurs um 3D-Techniken bestimmen.

Die Darstellung gliedert sich in vier Teile: Physiologie der Raumwahrnehmung, Eingabe, Speicherung und Ausgabe räumlicher Daten. Aus Platzgründen beschränke ich mich dabei auf visuelle räumliche Informationen; ebenso ließe sich das räumliche Hören sowie das Fühlen und Tasten an dem vorgestellten Schema durchdeklinieren. Darauf kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Auch muss auf die Beschreibung der Anwendungsmöglichkeiten der aufgenommenen und gespeicherten Informationen verzichtet werden.

2 Physiologie des räumlichen Sehens

Der Mensch wird in den Raum geboren, er bewegt und orientiert sich im Raum. Für den Menschen entsteht Raum aus der Möglichkeit der Ortsveränderung, aus phänomenologischer Sicht ist Raum Bewegung (Bollnow 1963; Benedikt 1991, S. 126 f.). Was wir von der Welt wissen, erfahren wir durch die Sinnesorgane, deren Verarbeitung wiederum den größten Anteil an der kognitiven Leistung des menschlichen Gehirns hat. Raum erfahren wir durch räumliches Sehen, Hören und Fühlen.

2.1 Räumliches Sehen

Verschiedene Verarbeitungsmechanismen erlauben es, aus visuellen Reizen ein kognitives Modell des umgebenden Raums zu erzeugen.

2.1.1 Stereoskopisches Sehen

Der Abstand der Augen zueinander (ca. 65 mm) bedingt, dass ein fixiertes Objekt aus leicht unterschiedlichen Winkeln wahrgenommen wird (Querdisparation). Aus dem Übereinanderlegen und Verrechnen der Bilder des rechten und des linken Auges entsteht der Eindruck von räumlicher Tiefe. Unterstützt wird dieser Vorgang durch weitere visuelle Informationen. (für diese und die folgenden Punkte vgl. Dück, S. 110 ff.)

2.1.2 Partielle Verdeckungen

Wird ein Gegenstand von einem anderen teilweise verdeckt, so wird das verdeckende Objekt vom Betrachter als näher interpretiert.

2.1.3 Perspektive

Aufgrund des veränderten Gesichtsfeldwinkels erscheinen zwei objektiv gleichgroße Gegenstände in Abhängigkeit der Entfernung zum Betrachter unterschiedlich groß. Die Größe der Projektion eines Objekts auf die Netzhaut nimmt mit der Entfernung zum Objekt ab. Erfahrungswerte über die normale Größe sowie direkte Vergleiche ermöglichen somit ein Abschätzen der Entfernung des Objekts zu Betrachter.

2.1.4 Texturdichte

Jede Oberfläche hat eine sichtbare Textur. Deren Wahrnehmung unterliegt ebenso der Perspektive wie die des gesamten Objekts. Der Texturdichtegradient bezeichnet die Größenunterschiede der Textur Elemente auf der Netzhaut. Insbesondere beim Boden und Hintergrundflächen kann somit eine präzise Bestimmung von Größen- und Entfernungsverhältnissen vorgenommen werden.

2.1.5 Atmosphärische Perspektive

Dunst und Partikel in der Luft sorgen dafür, dass entfernte Objekte unschärfer und von farblich geringerer Sättigung wahrgenommen werden. Umgekehrt kann aus dem Grad der Detailschärfe auf die Entfernung eines Gegenstands geschlossen werden.

Gekoppelt mit der Erfahrung wird somit jedem visuell erfassten Raumpunkt eine (richtige oder falsche) Tiefeninformation zugeordnet.

3 Eingabe

Die Eingabe von 3D-Informationen in den Computer ist darauf ausgelegt, diejenigen Daten der Welt zu erfassen bzw. solche einer virtuellen Welt zu erzeugen, die für eine spätere Kopplung der Ausgabe mit dem menschlichen Wahrnehmungsapparat den Eindruck von Räumlichkeit suggerieren.

3.1 3D-Kamera

Die vermutlich erste Zweiobjektiv-Kamera wurde 1849 von Sir David Brewster erfunden. Dabei wird ein Motiv mit zwei (oder mehr) Objektiven aufgenommen, welche die Parallaxe des menschlichen Augenpaares nachbilden. Die so entstandenen Halbbilder werden auf einer gemeinsamen Fotoplatte ausbelichtet und können mit oder ohne Geräte betrachtet werden (s. Abschnitt 5). Die Geschichte der Fototechnik verzeichnet bis zum heutigen Tag eine Vielzahl von 3D-Fotoapparaten und Filmkameras (Schulte 2010).

3.2 Konvertierung

Ein gänzlich anderes Verfahren ist die Konvertierung bestehender 2D Aufnahmen in ein 3D-Modell. Programme wie Photo Tourism, Photosynth oder Automatic Photos Pop-Up berechnen aus verschiedenen Ansichten eines Motivs bzw. aus den Perspektivinformationen einer einzelnen Aufnahme ein dreidimensionales Modell, das jedem Bildpunkt eine Tiefeninformation zuweist. Settop-Boxen wie der Virtual FX Converter werden damit beworben, jede Filmaufnahme live in 3D zu konvertieren, was mit wechselndem Erfolg gelingt. Exakter aber ungleich aufwändiger ist die Konvertierung per Hand, ein Verfahren, das z.B. bei der nachträglichen Verräumlichung von Kinofilmen für IMAX-Filmtheater angewandt wird (Wallace 2009).

3.3 Matchmoving

Im Gegensatz zum Errechnen der Tiefeninformation des Motivs wird beim Matchmoving aus dem Bildmaterial die räumliche Position der Kamera berechnet. Unter Einbeziehung der technischen Daten der Kamera kann durch Auswertung der Parallaxen und perspektischen Verschiebungen ihre exakte Position selbst bei Kamerafahrten oder Schwenks ermittelt werden. Diese Daten werden anschließend benutzt, um ein 3D-Objekt mit einer virtuellen Kamera in genau derselben Weise

abzufilmen, um ein passgenaues Einfügen von 3D-Computergrafik in eine bestehende Aufnahme zu ermöglichen. Matchmoving steht somit bei der Erzeugung von Visual Effects (VFX) im Mittelpunkt (Dobbert 2005).

3.4 Motion Capture

Während beim Matchmoving alle bewegten Motive maskiert werden müssen, welche die Perspektivinformationen durch Eigenbewegung verfälschen würden, versucht Motion Capture eben diese Bewegung aufzuzeichnen. Dabei werden Markierungspunkte (tracker marks) gesetzt und unter Annahme einer stetigen Bewegung ohne Sprünge ihre Veränderung im Raum verfolgt. Die so gewonnenen Raumkoordinaten werden anschließend zur Animation von Computergrafiken verwendet (Kitagawa; Windsor 2008).

3.5 3D-Scanner

Die räumliche Ausdehnung, d.h. die genaue Form eines Objekts kann mit Hilfe eines 3D-Scanners erfasst werden. Hierbei wird unterschieden zwischen Kontaktscannern und kontaktlosen Scannern. Bei Kontaktscannern wird die Oberfläche des Objekts manuell abgetastet, wobei der Scanner seine eigene Position und dementsprechend die der Kontaktpunkte kennt und alle übrigen Punkte interpoliert. Kontaktlose Scanner arbeiten akustisch, magnetisch oder optisch und bestimmen die Raumkoordinaten aus Reflexionseigenschaften des Objekts, die mittels Sensoren erfasst werden (Guo Jun 2008).

3.6 3D-Sensoren

Zu Raumsensoren gehören sowohl Entfernungsmesser wie IR- oder Ultraschallsensoren als auch Beschleunigungs- und Rotationssensoren. Die Bewegung eines Körpers im Raum lässt sich durch 6 Parameter vollständig beschreiben: 3 translatorische und 3 rotatorische Freiheitsgrade. Eingabegeräte wie die Wiimote bzw. der in ihre verbaute Beschleunigungssensor ADXL 330 erfassen die Beschleunigung in 3 Achsen mit ± 3 g. Der in der Wii-Plus zusätzlich verbaute Vibrationskreisel (Gyroskop) ermöglicht zusätzlich die Messung der 3 Rotationsachsen, womit eine hinreichend präzise Erfassung der Bewegungskordinaten möglich wird (WiiBrew 2010).

3.7 3D-Modellierung

Die Modellierung von Modellen in 3D-Software wie Maya, 3D-Studio Max oder Blender erfolgt über einen geteilten Bildschirm, auf dem jeder Raumpunkt in mehreren Projektionen angesehen und gesetzt werden kann. Durch akribische Handarbeit bzw. mit Hilfe von Algorithmen wie Sub-

division Surfaces, bei der nach durch rekursive Verfeinerung weitere Punkte und Flächen berechnet werden, ist eine erstaunlich realistische und detaillierte Konstruktion räumlicher Körper möglich (Flückiger 2008). Neben Tastatur und 2D-Maus kommen hierbei auch 3D-Mäuse zum Einsatz, mit denen die Eingabe in 6 Freiheitsgraden möglich ist.

4 Speicherung

Die Wahl des Speicherformats von 3D-Bildern hängt ab von zwei Faktoren: Die Menge und Ab-rufgeschwindigkeit des zur Verfügung stehenden Speichers und die gewählte Wiedergabetechnik. Damit ein Bild vom menschlichen Sehapparat als 3-dimensional wahrgenommen wird, muss für jedes Auge ein individuelles Bild aufgenommen bzw. erzeugt und gespeichert werden. Im Vergleich zu 2D-Bildern verdoppelt dies den Speicherbedarf. Verschiedene Verfahren ermöglichen es, diese Speichermenge zu reduzieren.

4.1 Doppelbilder

Die beste aber gleichzeitig auch ressourcenhungrigste Methode ist es, beide Bilder in voller Auflö-sung zu speichern. Dies führt nicht nur zu einer Verdopplung des Speicherbedarfs, sondern auch dazu, die Zugriffszeit zu halbieren, weil im Vergleich zu 2D-Bildern in gleicher Zeit zwei statt nur ein Bild gezeigt werden muss. Dies ist unabhängig davon, ob Speicherung und Wiedergabe analog oder digital erfolgen, ob die doppelte Menge Filmmaterial oder Festplattenspeicher benötigt wird, ob der Projektormotor doppelt so schnell laufen muss oder gar ein zweiter Projektor benötigt wird oder ob die Grafikkarte zweimal so viele Bilder ausgeben muss: ein 3D-Bild bedeutet zwei 2D-Bilder. Digitale Doppelbilder können im Stereo Image image format .jps, einem Ableger der JPEG-Formats gespeichert werden.

4.2 Side-by-Side

Beim Side-by-Side-Verfahren werden zwei Bilder nebeneinander gespeichert. Bei der stereoskopi-schen Fotografie führt dies zu Doppelbildern, deren beide Halbbilder die Parallaxe des menschl-ichen Augenpaares aufweisen. Das belichtete Fotopapier wird dabei nur zur Hälfte ausgenutzt, um die stereoskopisch notwendige Verdopplung zu erreichen. Üblich sind hier Breitformate, die mehr Fotopapier beanspruchen. Problematischer wird es beim 3D-Film, der auf ein Standardformat auf-gezeichnet wird. Wenn die Breite nicht verändert werden kann, geht dies zu Lasten der speicherba-

ren horizontalen Informationsmenge. Ähnliches gilt für digitale Aufnahmen auf Standard-CCD-Chips. Auch hier kann bei dem Side-by-Side-Verfahren das Bild nur die Hälfte der möglichen Breite einnehmen. Partiiell ausgeglichen werden kann dies durch anamorphotische Linsen, die bereits bei der Aufnahme das Bild auf die Hälfte zusammen stauchen. Bei der Wiedergabe werden beide Halbbilder entsprechend gedehnt. Dadurch bleibt die Aufnahmebreite war erhalten, die horizontale Bildauflösung halbiert sich aber, weil bei der Aufnahme jeder zweite Pixel ignoriert, bei der Wiedergabe aber jeder Pixel horizontal verdoppelt werden muss.

Alternativ kann auch eine Reduzierung der Vertikalauflösung im Line-by-Line-Verfahren bzw. eine Durchmischung beider Halbbilder im Checkerboard-Verfahren durchgeführt werden. Alle diese Verschachtelungsmethoden führen jedoch zu einer geringeren Auflösung des Bildes.

4.3 Anaglyphenverfahren

Beim (Farb-)Anaglyphenverfahren werden beide Teilbilder in Komplementärfarben eingefärbt, z.B. Rot/Grün oder Gelb/Blau und übereinander gelegt. Die Wiedergabe erfolgt über speziell gefärbte Brillengläser (s. u.). Die Einsparung des Speicherplatzes bei Bewahrung der Raumauflösung – ein 3D Bild in voller Auflösung benötigt nicht mehr Ressourcen als ein 2D-Bild – wird bei diesem Verfahren erkauft mit dem Verlust von Frequenzauflösung – der codierbare Farb- und Kontrastumfang nimmt durch das Einfärben deutlich ab.

4.4 Interferenzbilder

Bei diesem speziellen Anaglyphenverfahren wird das Frequenzspektrum von jeder der additiven Grundfarben Rot, Grün und Blau auf beide Halbbilder aufgeteilt:

Linkes Auge: Rot 629nm, Grün 532nm, Blau 446nm

Rechtes Auge: Rot 615nm, Grün 518nm, Blau 432nm

Dadurch und mit Hilfe präziser Interferenzfilter kann der Verlust an Farbauflösung besser kompensiert werden als mit dem zweifarbigen Anaglyphenverfahren (Klein 2006).

4.5 Stereogramm

Dieses eher im Bereich der optischen Spielerei angesiedelte Verfahren ermöglicht die Speicherung räumlicher Informationen in einem Bild, das wahlweise aus einem Zufallsmuster (Single Image Random Dot Stereogram: SIRDS) oder Bildmustern (single image stereogram: SIS) besteht. Da weder Raum- noch Farbauflösung von nennenswerter Qualität sind, wird dieses Verfahren über den

Überraschungseffekt nicht hinaus kommen, ein verstecktes räumliches Bild ohne Hilfsmittel in einem anderen Bild entdecken zu können (Baccei 1994).

4.6 Multi View Coding

Der Videocodec MPEG4-MVC beschreibt ein Kompressionsverfahren, bei dem verschiedene Kamerasichten in einen Videodatenstrom codiert werden können. Durch Differenzcodierung kann der Speicherbedarf für das zweite 3D-Halbbild auf die Hälfte reduziert werden (Jurran 2010).

4.7 Dateiformate von 3D-Software

Anders als bei der Codierung von 3D-Aufnahmen erfordern künstlich erstellte 3D-Szenarien keine Speicherung der vollständigen Bildinformationen. Diese lassen sich vielmehr aus dem 3D-Modell errechnen, das in der Regel deutlich weniger Speicherplatz erfordert. Erkauft wird dabei Speicher mit Rechenzeit, die für das Rendern der Szenerie erforderlich ist (Kohlmann 2007).

5 Ausgabe

Bei der Ausgabe zeigt sich im Wortsinn die Qualität der erfassten und verarbeiteten Daten. Verschiedene Techniken stehen hier ergänzend oder in Konkurrenz nebeneinander:

5.1 Stereoskop

Das 1838 von Sir Charels Wheatstone vorgestellte Stereoskop präsentiert den Augen die beiden Halbbilder durch rechtwinklig angeordnete Spiegel. Weiterentwicklungen arbeiteten mit Linsen und Prismen. Später im 19. Jahrhundert stellte sich heraus, dass eine einfache Trennwand zwischen den Halbbildern den gewünschten Effekt erzielte, jedem Auge nur das ihm zugeordnete Bild zu präsentieren. Das Stereoskop von Oliver Wendell Holmes war nur noch eine einfache Holzbrille mit einem Stativ in dem die Doppelbilder in einer festen Entfernung zum Auge gehalten werden konnten (Holmes 1859).

Die modernste Form ist das Head Mounted Display, eine stereoskopische Brille mit zwei Displays, auf die vor jedem Auge das entsprechende Bild projiziert wird, womit 3D-Filme oder -Spiele zum individuellen Seherlebnis werden.

5.2 Anaglyphische Brille

Das anaglyphische Speicherformat benötigt spezielle Brillen, um die übereinander gelegten voneinander zu trennen. Ein rotes Brillenglas lässt lediglich die roten Farbanteile durch und blockiert die grünen bzw. cyanfarbigen und umgekehrt.

5.3 Dolby 3D

Die feinere Frequenzeinteilung der Interferenzbilder wird durch entsprechende Interferenzbilder in der Brille auf die Augen verteilt. Die durch Frequenzlücken entstehenden Farbverschiebungen werden durch Korrekturen bei der Projektion weitgehend ausgeglichen (Klein 2006).

5.4 Shutterbrillen

Beim Shutterverfahren werden die Bilder für das linke und das rechte Augen nacheinander als Vollbilder projiziert. Eine mit dem Projektor synchronisierte LCD-Brille verdunkelt abwechselnd das linke und das rechte Brillenglas, sodass jedes Auge nur das für ihn bestimmte Teilbild zu sehen bekommt. Die Synchronisation erfolgt entweder über einen Infrarot-Emitter (IR-Link) oder über ein Weißbild zwischen den Bildern (DLP-Link). Das zweite Verfahren hat den Vorteil, mit dem projizierten Bild synchron zu sein und ohne weitere Emittertechnik auszukommen. Die für einen flüssigen Bewegungseindruck notwendige Bildfrequenz von 25 Bildern pro Sekunde wird bei diesem Verfahren durch Verdopplung der Projektionsfrequenz auf mindestens 50 Vollbilder pro Sekunde erreicht. Die Shuttertechnik benötigen keine besondere Darstellungstechnik und eignet sich für den Einsatz am Monitor z.B. für Spiele oder Filme.

5.5 Polarisierung

Bei der Polarisierungstechnik werden beide Vollbilder mit zwei Projektoren in unterschiedlich polarisiertem Licht auf eine Leinwand projiziert. Eine Silberbeschichtung sorgt dafür, dass die Polarisierung des Lichts bei der Reflektion an der Leinwand erhalten bleibt. Die beiden Brillengläser des Zuschauers filtern die Lichtwellen mit der für sie geeigneten Polarität und blockieren die übrigen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, mit im Vergleich zur Shuttertechnik relativ günstigen Brillen auszukommen, dafür verdoppelt sich der Aufwand für die Projektionstechnik. Dennoch ist die Polarisierungstechnik in Kinos derzeit am weitesten verbreitet.

5.6 Linsenraster

Das Lentikular- oder Linsenrasterverfahren war lange Zeit nur von Ansichtskarten bekannt. Seit einigen Jahren wird es auch für autostereoskopische Fernseher angeboten.

Die stereoskopischen Halbbilder werden in schmalen vertikalen Streifen auf den Bildträger (z.B. Papier oder LCD-Bildschirm) gebracht. Ein Raster von Linsen in der gleichen Breite wie die Bildstreifen sorgt dafür, dass beide Augen lediglich die für sie bestimmten Bildstreifen zu sehen bekommen. Der 3D-Effekt hängt aber davon ab, dass der Betrachter einen bestimmten Abstand zum Bild einhält. Fortgeschrittene Verfahren verfolgen den Kopf des Benutzers per Head-Tracking und stellen das Linsenraster darauf ein. Dies bedeutet aber, dass lediglich ein Zuschauer ein optimales Bild sehen kann, weswegen das Verfahren für den Einsatz im Museum, bei der wissenschaftlichen Visualisierung oder bei Computerspielen ausgerichtet wird.

5.7 Parallax-Barrier

Die Parallax-Barriere ist eine LCD-Schicht, die vor einen normalen LCD-Bildschirm angebracht ist, und für jedes Auge eine unterschiedliche Auswahl der Bildschirmpixel durchscheinen lässt. Ähnlich wie beim Lentikularverfahren kann der räumliche Eindruck nur gewährleistet werden, solange der Betrachter sich in einer bestimmten Position zum Bildschirm befindet. Dieses von der Fa. Sharp entwickelte Verfahren wird bei u.a. der Modellierung von Molekülen und in der Flughafensicherheit eingesetzt (Twist 2004).

5.8 Head Tracking

Head-Tracking kommt auch bei diesem Verfahren zum Einsatz, das ausschließlich für berechnete 3D-Bilder geeignet ist. Die aus der Kopfbewegung des Betrachters entstehende Parallaxe wird dabei in die Bildberechnung mit einbezogen – eine Änderung der Kopfposition führt zu einer veränderten perspektivischen Darstellung. Im Gegensatz zur Pseudo-3D der vorangegangenen Darstellungsformen lassen sich mit diesem Verfahren durch Bewegung tatsächlich Neuinformationen im Bild gewinnen. Im Spiel 3D Hidden Picture für Nintendo DS geht es darum, durch Bewegung des Handhelds Objekte in einer Szene zu finden, die durch andere Gegenstände verdeckt sind. Das Verfahren funktioniert in dieser Form allerdings nur für einen Betrachter (Kotaku 2010).

6 Ausblick

Angesichts der technischen Entwicklung kann ungefähr abgeschätzt werden, welche Entwicklungen noch ausstehenden und in naher Zukunft auf uns zu kommen werden:

6.1 Eingabe

Angesichts der Bedeutung von Matchmoving und Motion Capturing für die Film- und seit einigen Jahren auch für die Spielindustrie werden verbesserte 3D-Tracking-Interfaces wie z.B. Microsofts Project Natal auf den Markt kommen, das Computerspiele ohne Controller verspricht.

Microsofts Project Natal verspricht eine für die Xbox verwendbare Anwendung von 3D-Scannern in Echtzeit, um Computerspiele ohne technisches Interface zu ermöglichen

Auch die verbesserte Konvertierung von 2D- zu 3D-Bildern ist angesichts der großen Popularität von 3D-Filmen eine ästhetische Mode-Erscheinung und daher eine ökonomische Notwendigkeit, da sie die Möglichkeit eröffnet, alte Filme mit – im Verhältnis zu Neuproduktionen – geringem Aufwand erneut in die Kinos zu bringen..

Beide Techniken werden sicherlich Einzug halten bei der Überwachung öffentlicher und privater Räume durch CCTV-Anlagen wie sie beispielsweise von der Fa. Horatio vertrieben werden. Aus dieser Richtung kommen neue Herausforderung in Bezug auf Datenschutz und informationelle Selbstbestimmung auf die Gesellschaft zu.

6.2 Speicherung

Angesichts der Tatsache, dass in der Codec-Geschichte die Differenzcodierung immer am Anfang steht, gibt es bei der 3D-Kompression noch Möglichkeiten für Entwicklungen. Denkbar wäre ein Verfahren, das pro Bild ein rudimentäres 3D-Modell berechnet und auf dieser Grundlage die beiden Halbbildinformationen lediglich als Deviation der Textur dieses Ausgangsbilds bestimmt. Der immense Rechenaufwand dieses Verfahrens erfordert schnellere und leistungsfähigere Rechner, aber auch dieser Umstand ist in der Geschichte der Bildkompression kein Novum.

6.3 Ausgabe

3D-Fernseher sind die Vaporware der Saison. Die ersten Modelle sollen die Fußballweltmeisterschaft flankieren. Die sich ergebenden technischen Anfangsschwierigkeiten werden in Zukunft durch immer bessere und immer leistungsfähigere Modelle gelöst werden. Entwicklungsziel ist der

3D-Genuss für mehrere Personen ohne zusätzliche Brille. Ob dies allerdings für die Zuschauer ohne Adaptionsprobleme zu bewältigen ist, darf angesichts der berichteten Probleme bei der Physiologie der Raumwahrnehmung (s. Abschnitt 2) bezweifelt werden (Patalong 2010).

Literaturverzeichnis

Webseiten werden statt mit langen URLs mit unterstrichenem Titel angegeben, worunter sie im Mai 2010 mit Hilfe von Google problemlos aufzufinden waren.

Bei Büchern wird zusätzlich die ISBN-13-Nummer angegeben, was die Suche z.B. bei Amazon deutlich erleichtert.

Baccei, Tom: *Das magische Auge*. Ars Edition 1994. ISBN: 978-3760782973

Bollnow, Otto F.: *Mensch und Raum*. Kohlhammer, Stuttgart 1963. ISBN: 978-3170164741

Benedikt, Michael: *Cyberspace. First Steps*. MIT-Press 1991. ISBN: 978-0262521772

Dobbert, Tim: *Matchmoving. The Invisible Art of Camera Tracking*. John Wiley & Sons 2004. ISBN: 978-0782144031

Dück, Michael: *Der Raum und seine Wahrnehmung*. Königshausen & Neumann 2001. ISBN: 978-3826016554

Flückiger, Barbara: *Visual Effects. Filmbilder aus dem Computer*. Schüren 2008.

Holmes, Oliver W. (1859): *The Stereoscope and The Stereograph*.

Jun, Guo: *Using 3D Scanning in 3D Character Modeling and Game Figure Production*.

Jurran, Nico: *3D an der Quelle*. In: Heise: c't 7/2010, S. 100-101.

Kitagawa, Midora; Windsor, Brian: *MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture*. Butterworth Heinemann 2008. ISBN: 978-0240810003.

Klein, Alexander (2006): *Interference Filters (Wavelength multiplex visualisation) / Infitec*.

Kohlmann, Klaus (2007): *Der computeranimierte Spielfilm*. Transcript. ISBN: 978-3899426359

Kotaku (2010): *Is This How 3D Will Work On The Nintendo 3DS?*

Patalong, Frank (2010): *Nicht schlecht – nur wird mir schlecht*.

Schulte, Dieter (2010): *http://www.stereoskopie.com/*

Twist, Jo (2004): *Easy 3D X-rays for air security.*

Wallace, Lewis (2009): *Video: How IMAX Wizards Convert Harry Potter to 3-D.*

WiiBrew: *WiiBrew – Wiimote.*