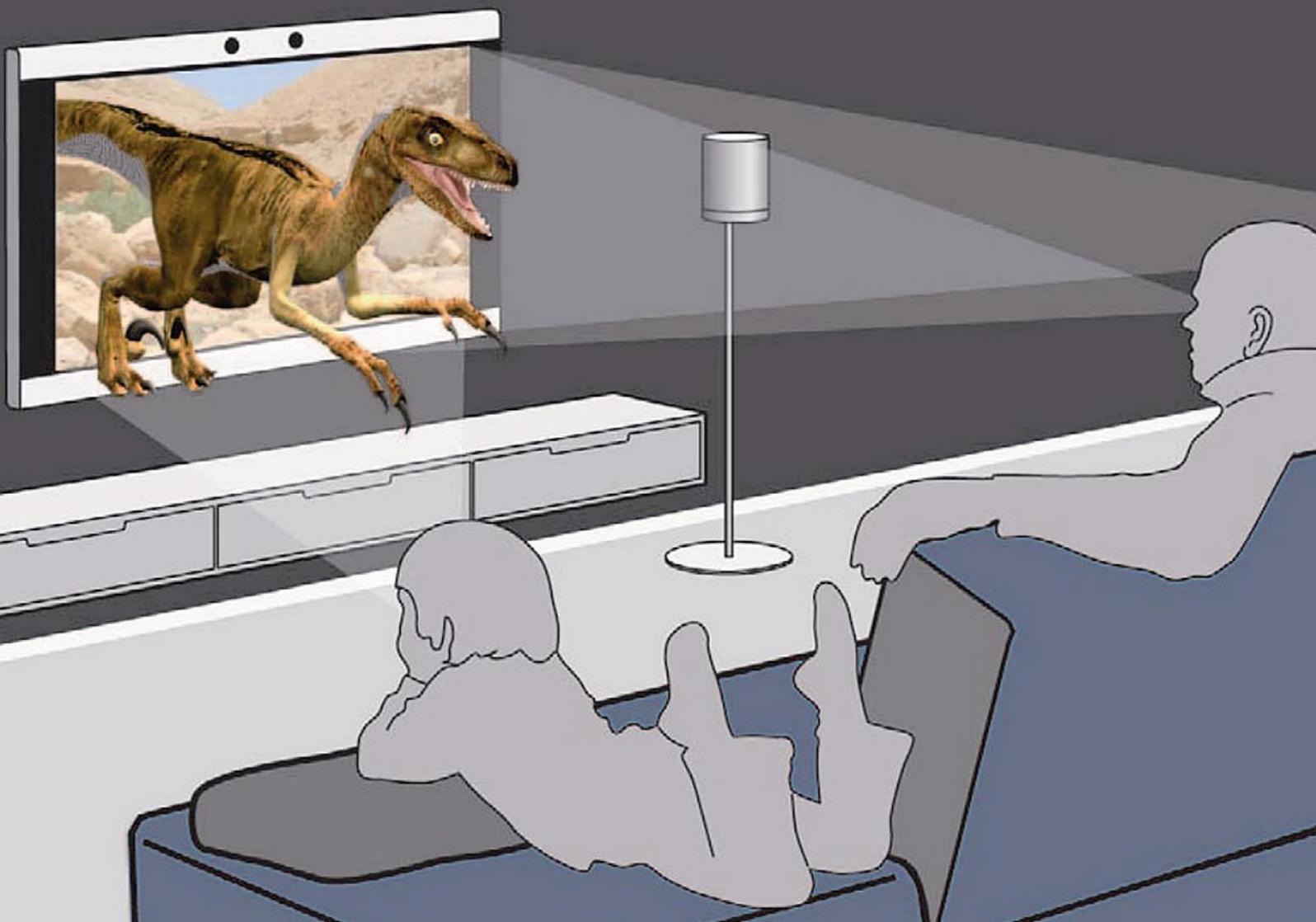


HD in 3D

Hochaufgelöste Bilder in 3 Dimensionen

Das räumliche Sehen (auch dreidimensionales oder stereoskopisches Sehen genannt) ist eine wichtige Fähigkeit unseres Gesichtssinns. Es gibt uns eine Tiefenempfindung, die z. B. für viele handwerkliche Tätigkeiten wie Ballspiel, Autofahren und zahlreiche andere Aktivitäten, bei denen es auf die Einschätzung von Entfernungen ankommt, unverzichtbar ist. Damit ein Mensch räumlich sehen kann, muss er über zwei funktionstüchtige Augen verfügen. Welche Einschränkungen sich beim Sehen mit einem Auge ergeben, kann man leicht in einem Selbstversuch testen, indem man ein Auge abdeckt und versucht, einen Faden durch ein Nadelöhr zu fädeln. Man wird anfangs den Faden immer vor oder hinter dem Nadelöhr vorbeiführen, weil das die Hände steuernde Gehirn über keine räumlichen Informationen verfügt.



Grundlegende Zusammenhänge

Bei einem normalen zweiäugigen Sehvorgang werden beide Augen auf das betrachtete Objekt gerichtet, scharf gestellt (fokussiert) und die Bilder auf den beiden Netzhäuten zum Sehzentrum des Gehirns geleitet, das sie zu einer räumlichen Wahrnehmung modelliert. Je näher das Objekt ist, desto stärker sind die Sehachsen der Augen gegeneinander geneigt, d. h. die Augen müssen „schielen“, um es zu erfassen. Ist das Objekt sehr weit entfernt, sind die Sehachsen praktisch parallel und jedes Auge sieht dasselbe. Deshalb nimmt mit zunehmender Entfernung der räumliche Seheindruck ab.

Bild 1 zeigt, wie sich die Augen auf ein betrachtetes Objekt ausrichten. Bedingt durch den Augenabstand von ca. 6,5 cm hat jedes Auge eine leicht unterschiedliche perspektivische Sicht vom Objekt. So kann das rechte Auge die rote Seite des Quaders noch sehen, das linke aber nicht mehr. Zudem verschiebt sich die Stellung des Quaders in Bezug auf seinen Hintergrund. Diese Tatsache macht man sich beim „Daumensprung“ zunutze, um z. B. den Blick eines Wanderkameraden zu einem fernen Detail der Landschaft zu lenken. Dazu wird der Daumen am ausgestreckten Arm hochgestellt und mit einem Auge ein markantes, gut erkennbares Ziel fixiert. Betrachtet man nun den Daumen mit dem anderen Auge, hat er seine Position vor dem Hintergrund sprunghaft verändert. Vielfache dieses „Daumensprungs“ lenken den Blick des Mitwanderers dann auf das weniger auffällige Detail in der Ferne.

Damit ist das Prinzip der Herstellung von 3D-Fotos oder -Filmen offensichtlich. Man muss die Szene mit zwei Kameras an den Positionen der Augen aufnehmen und die aufgezeichneten stereoskopischen Halbbilder den Augen zur Wiedergabe wieder seitenrichtig vorsetzen. Das Gehirn bildet daraus das vollständige Stereobild. Diese Technik hat man schon in den Anfangszeiten der Fotografie genutzt. Zu Beginn des letzten Jahrhunderts war beim Wiener Praterkino „Kaiserpanorama“ das Stereoskop ein Publikumsmagnet.

Am bequemsten lassen sich Dias, die aus den Po-

sitionen des linken und des rechten Auges aufgenommen wurden, mit einem Stereo-Diabetrachter (Stereo-„Gucki“) in ihrer Räumlichkeit betrachten. Hier sieht jedes Auge nur das ihm zugeordnete Bild und der Raumeindruck ergibt sich mühelos. Aber mit etwas Übung schafft es das Auge auch, aus nebeneinander liegenden stereoskopischen Fotos ein räumliches Bild zu generieren.

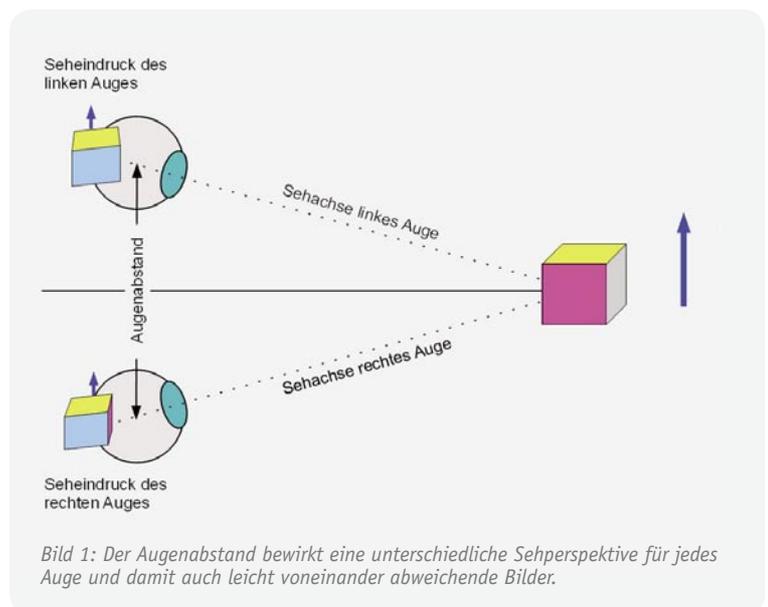


Bild 1: Der Augenabstand bewirkt eine unterschiedliche Sehperspektive für jedes Auge und damit auch leicht voneinander abweichende Bilder.

Wer Bild 2 aus der richtigen Entfernung mit dem sogenannten Kreuzblick (rechtes Auge blickt auf linkes Bild, linkes Auge auf rechtes Bild) betrachtet, wird ein räumliches Bild sehen, flankiert von den linken und rechten Teilbildern. Werden die Bilder vertauscht, ist der gleiche Effekt mit dem Parallelblick zu erzielen. Eine genauere Beschreibung dieser Blicktechniken findet man unter http://de.wikipedia.org/wiki/Stereoskopisches_Sehen.

Mit kleinen aufnahmetechnischen Tricks kann der stereoskopische Effekt gesteigert werden. Wichtig ist eine relativ kurze Brennweite der Aufnahmeobjektive (also in Richtung Weitwinkel), weil dann durch die höhere Schärfentiefe das Auge nicht verführt wird, instinktiv zu versuchen, unscharfe Bildschichten scharf zu stellen, was ja nicht gelingen kann und deshalb zu Irritationen führt. Auch der richtige Einsatz des Konvergenzpunkts (Punkt, in dem sich die Kameraachsen



Bild 2: Wer diese Bilder mit dem Kreuzblick betrachtet, wird mit etwas Übung ein räumliches Bild zwischen zwei flankierenden Teilbildern erkennen. (Quelle: Wikipedia)



Bild 3: Für die gesamte Prozesskette bei der Herstellung von hochauflösten 3D-Filmen sind alle Geräte verfügbar. Hier eine 3D-Kamera von Panasonic.

schneiden) beeinflusst 3D-Effekte. Liegt er im Szenenvordergrund, scheint das ganze Bild hinter dem Display zu liegen. Verschiebt man den Konvergenzpunkt in Richtung Szenenhintergrund, scheinen die Objekte vor dem Konvergenzpunkt nach vorne aus dem Display her auszutreten. Auf jeden Fall gelten spezielle Gesetze für den Kameramann, der einen guten 3D-Film drehen will. Für die Produktion von 3D-Filmen gibt es bereits zahlreiche industriell hergestellte Lösungen, von der Kamera bis zum Schnittpult (Bild 3).

3D-Filme haben bereits eine lange Geschichte, konnten sich aber wegen der fehlenden bequemen Wiedergabemöglichkeiten nicht auf breiter Basis durchsetzen. Durch die heute verfügbaren Technologien, die auch 3D-Kino-Blockbuster wie „Avatar“ auf den heimischen großformatigen und hochauflösenden Flachbildschirm bringen, kann sich das schnell ändern. Einen recht umfassenden Überblick über die im Lauf der vergangenen Jahrzehnte bereits gedrehten 3D-Filme vermittelt <http://de.wikipedia.org/wiki/3D-Film>. Für die Wiedergabe von 3D-Produktionen auf Flachbildschirmen gibt es eine Reihe von Techniken, die Bilder für das rechte und das linke Auge zu separieren.

Anaglyphenverfahren. Färbt man die Teilbilder in komplementären Farben ein und setzt sie übereinander, kann man mit einer Brille mit den entsprechenden Farbfiltern vor dem linken und dem rechten Auge (Anaglyphenbrille) die Bilder wieder trennen und seitenrichtig den Augen zuführen. Bild 4 zeigt ein Foto, das bei einer Demonstration im Institut für Rundfunktechnik (IRT) im Februar 2010 gemacht wurde. Der Vortragende ist der österreichische 3D-Experte Peter Wimmer, dessen hervorragendes Programm „Stereoscopic Viewer“ man sich von seiner Homepage www.3dTV.at als Evaluationsversion herunterladen kann. Die 3D-Kamera ist unten rechts im Bild vergrößert einmontiert. Man erkennt die beiden Objektive im Augenabstand. Zur Trennung der übereinander gelegten Teilbilder wird ein Rotfilter vor dem linken und ein Cyanfilter vor dem rechten Auge benötigt.



Bild 4: Peter Wimmer bei einem Vortrag über 3D-Techniken im IRT München. Mit einem Rotfilter vor dem linken und einem Cyanfilter vor dem rechten Auge ergibt sich der räumliche Seheindruck.

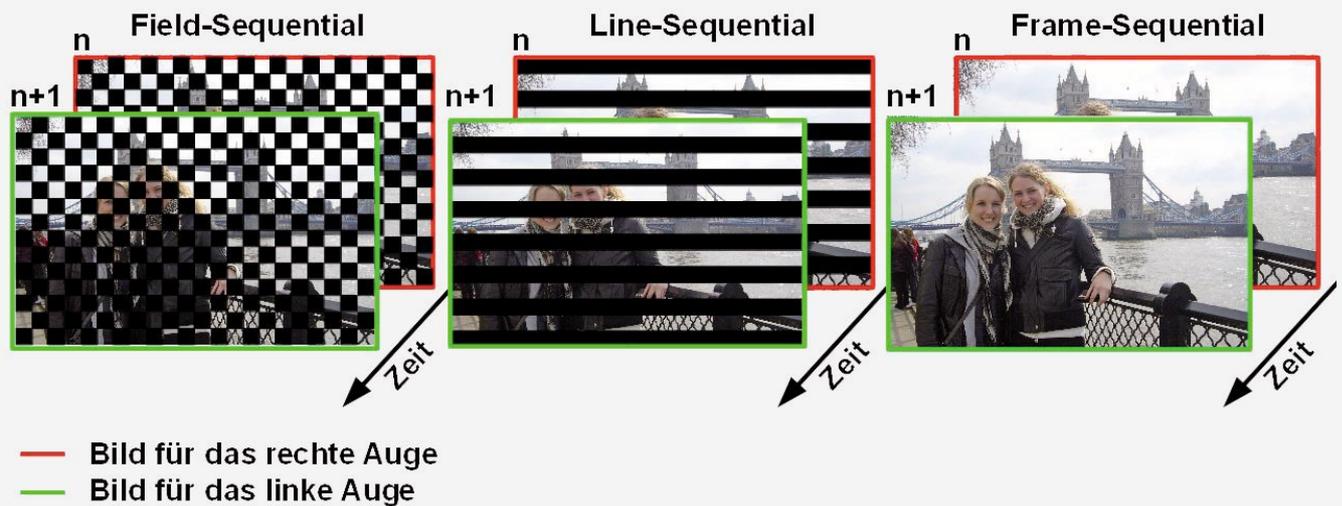


Bild 5: Die verschiedenen Verfahren zur sequenziellen Erzeugung stereoskopischer Bilder

Mit dem „Stereoscopic Viewer“ erhält man anhand eines HD-Film-Trailers „Ballooning“ von Stephan Stahl (www.wow3d.de/thread.php?postid=647) mit der Rot-Cyan-Anaglyphenbrille ein eindrucksvolles 3D-Erlebnis rund um das Fesselballonfahren. Die beiden Filmstreams aus der linken und der rechten Kamera rechnet der „Stereoscopic Viewer“ in einen Anaglyphenstream um, den die Filter wieder in die Bildfolge für das jeweilige Auge separieren. Es fällt auf, dass das 3D-Anaglyphenbild im Vergleich mit den Teilbilderstreams deutlich an Intensität und Reinheit der Farben verloren hat. Für hochwertiges 3D-TV ist diese simple Technik daher eher ungeeignet.

Sequenzielle Verfahren mit Shutterbrille. Die Verfahren zur Trennung der Bilder für das linke und rechte Auge mit Hilfe einer Shutterbrille (engl. shutter = Blende) lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen unterteilen: Field Sequential, Line Sequential und Frame Sequential (Bild 5).

- **Field-Sequential-Verfahren.** Bei diesem Verfahren wird das Bild schachbrettmusterartig in Pixelgruppen unterteilt. Von Bild zu Bild werden helle und dunkle Felder vertauscht. Nur in den hellen Schachbrettfeldern wird die jeweilige Ansicht für das rechte oder das linke Auge ausgegeben. Eine mit der Bildfolgefrequenz synchronisierte Shutterbrille lässt wechselweise nur das linke oder rechte Bild zum jeweiligen Auge durch. Im Ergebnis erhält jedes Auge die ihm zugeordnete Bildabfolge, aber nur in verringerter vertikaler und horizontaler Auflösung.
- **Line-Sequential-Verfahren.** Von Bild zu Bild abwechselnd wird in den geraden Zeilen das linke und in den ungeraden Zeilen das rechte Bild wiedergegeben. Die Zuteilung auf die Augen übernimmt wieder eine Shutterbrille. Hier ist nur die vertikale Auflösung halbiert. Weil jedes Auge bei Bildschirmen in 50-Hz-Technologie nur mit 25 Teilbildern|Sek. beleuchtet wird, ergibt sich ein flimmernder Bildeindruck. Bei 100- oder 120-Hz-Geräten ist dieser Effekt stark reduziert.

- **Frame-Sequential-Verfahren.** Bilder für das linke und das rechte Auge werden aufeinanderfolgend in voller Auflösung auf dem Bildschirm dargestellt und über eine Shutterbrille den Augen zugeordnet. Mit diesem Verfahren ist bei mindestens verdoppelter Bildfrequenz der qualitativ hochwertigste Bildeindruck erzielbar.

Polarisationsverfahren. Hier werden die Halbbilder

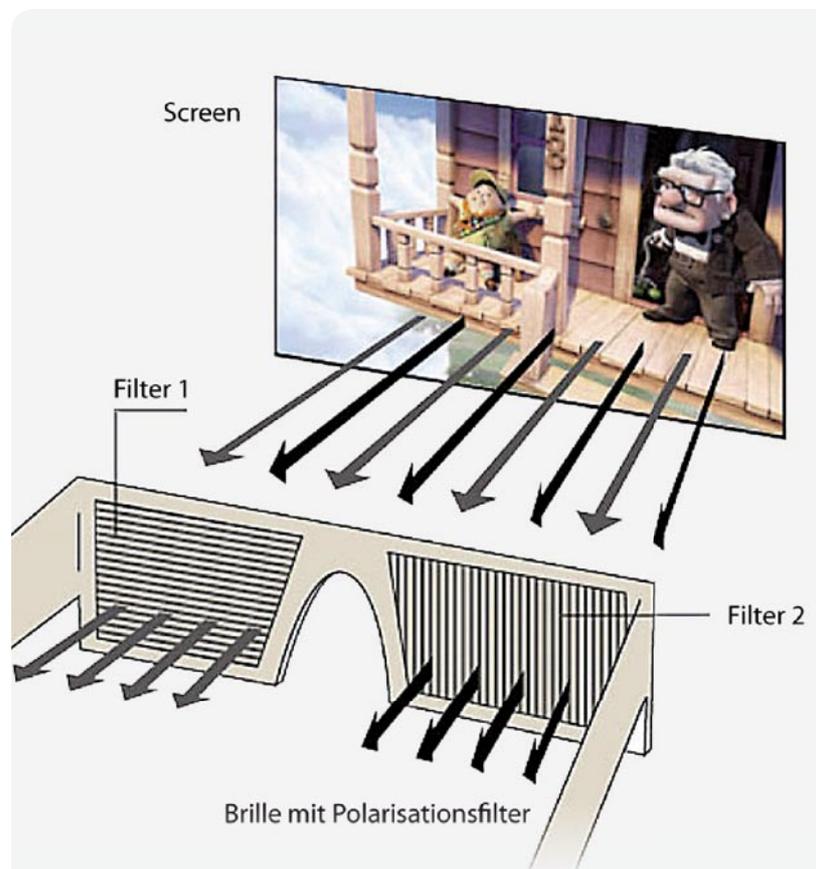


Bild 6: So trennen linear polarisierte Brillengläser die für das jeweilige Auge gedachten Bilder. (Quelle: BR online)

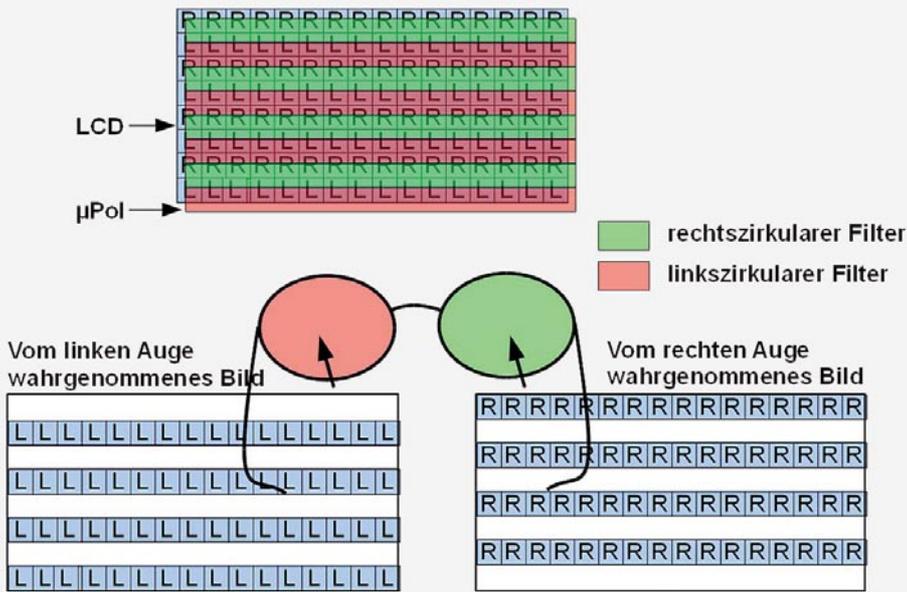


Bild 7: Ein Mikro-Polarisationsfilter polarisiert die Zeilen eines Bildes abwechselnd gegensätzlich. So können mit einer geeigneten Brille die geradzahligen Zeilen auf das eine und die ungeradzahligen Zeilen auf das andere Auge geleitet werden.

in jeweils gegensätzlicher Polarisation (vertikal|horizontal oder linkszirkular|rechtszirkular) vom Display abgestrahlt. Eine passive Brille mit entsprechenden Polfiltern (Bild 6) verteilt die Bilder auf die beiden Augen. Für eine hohe Bildqualität muss sich der Zuschauer in einem relativ kleinen Bereich vor dem Bildschirm positionieren, was als lästig empfunden wird. Besonders bei vertikaler|horizontaler Polarisation beschränken Polarisationsfilter samt Polarisationsbrille den Betrachtungswinkel. Sitzt der Betrachter höher oder niedriger als der Bildschirm oder hält er den Kopf geneigt, entstehen Doppelbilder. Deshalb wird heute gewöhnlich zirkuläre Polarisation eingesetzt.

• **Line-by-Line-Verfahren.** Hierbei werden die Bildschirmzeilen durch einen Polarisationsfilter in gerade und ungerade Linien unterteilt. Der Filter beruht

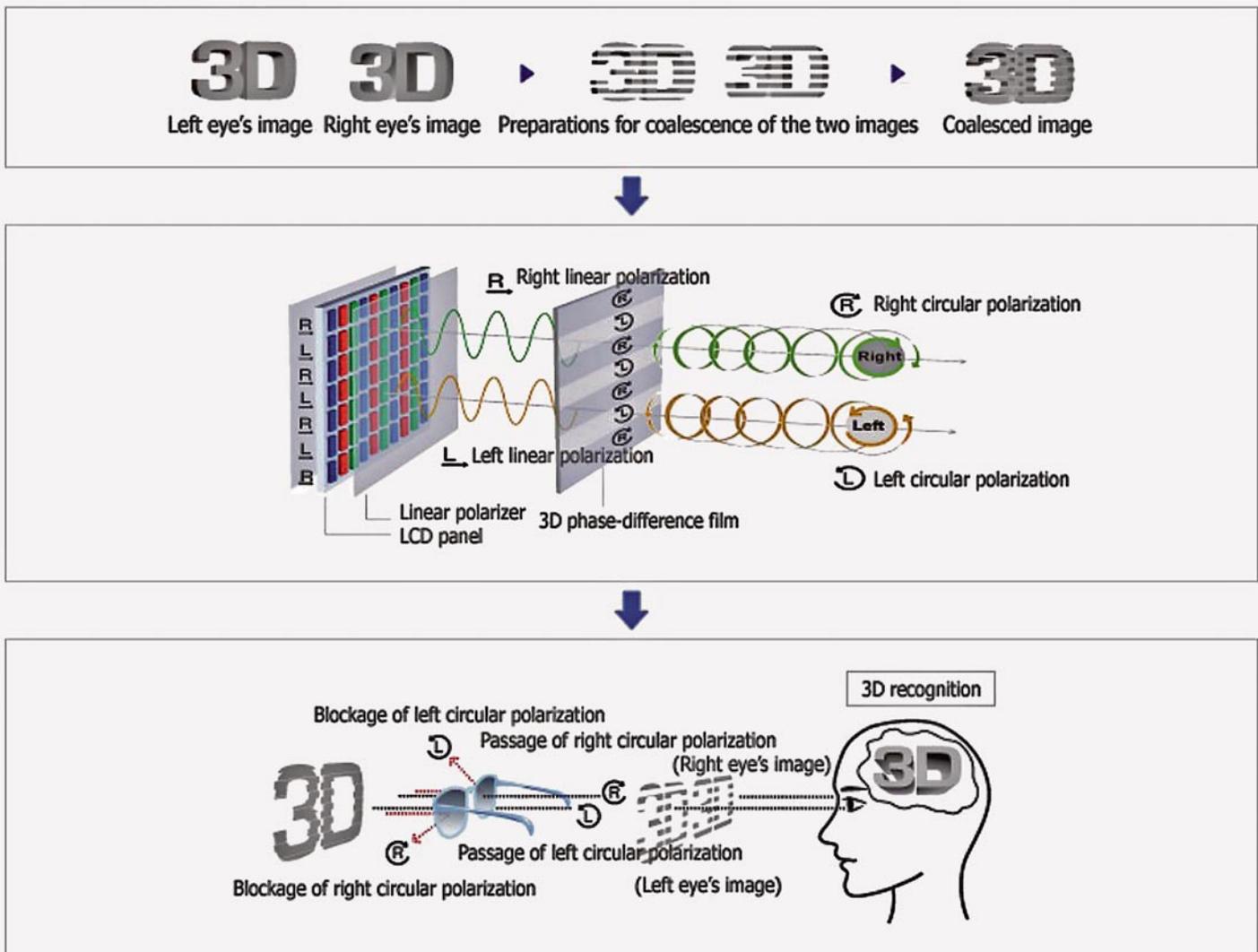


Bild 8: Die vollständige Bilderzeugung bei der Verwendung zirkularer Polarisation vom Bildschirm bis zur Netzhaut (Quelle: Zalman)

auf einer Entwicklung des libyschen Wissenschaftlers Sadeg Faris, dem es Anfang der 90er Jahre gelang, eine Filterfolie mit abschnittsweise wechselnder Polarisationsrichtung (vertikal|horizontal, linkszirkular|rechtszirkular) herzustellen (micro polarizer, μpol). Wird diese exakt vor den Zeilen eines Displays angebracht, werden die Zeilen alternierend polarisiert. Mit einer entsprechenden Polarisationsbrille nimmt das rechte Auge dann die ungeraden Linien und das linke Auge nur die geraden Zeilen wahr oder umgekehrt (Bild 7). Da die Informationen für beide Augen in einem Bild enthalten sind, beträgt die vertikale Auflösung nur die Hälfte wie bei der Frame-Sequential-Technologie.

Bild 8 zeigt den Gesamtprozess bei Verwendung zirkularer Polarisationsfilter etwas ausführlicher.

Videobrillen. Ähnlich einem stereoskopischen „Gucki“ für Dias erzeugt eine Videobrille (auch Head-mounted Display – HMD – genannt) auf je einem kleinen Display unmittelbar vor jedem Auge die zugehörigen Bildfolgen der rechten und linken Teilbilder. Das Ergebnis ist entspanntes Videoerlebnis, bei dem sich der Zuschauer frei bewegen kann und keine einschränkende Position vor einem 3D-Display einnehmen muss. Das Modell Cinemizerplus der Carl Zeiss AG (www.zeiss.de/cinemizer) löst mit 640×480 Pixel auf und bietet ein virtuelles Gesichtsfeld von 32° , entsprechend einem $42''$ -Display in 2 m Entfernung (Bild 9). Damit sind Cinemizerplus-Videobrillen mit Apples iPod und iPhone, Nokias N-Serie, Sonys PlayStation und vielen mehr auch mobil verwendbar. Die Stereofilme sind im Side-by-Side-Format gespeichert. Das bedeutet, dass der Videostream abwechselnd die linken und rechten Teilbilder, jeweils um 50 % gestaucht, nebeneinander liegend frameweise enthält. Cinemizerplus trennt die Teilbilder, entzerrt sie und erzeugt einen Videostream für das linke und einen zweiten für das rechte Auge (Bild 10).

Die Auflösung von bezahlbaren Videodisplays ist heute noch vergleichsweise gering. Bei Full HD fallen $1920 \times 1080 = 2,0736$ Megapixel an, die besten, für militärische Zwecke hergestellten Head-mounted-Displays (Bild 11) können bis zu $1600 \times 1200 = 1,92$ Megapixel wiedergeben, kosten aber auch stolze 100.000 US-\$ (SimEye von Kaiser Optical Systems Inc.). Eine ausführliche Übersicht gibt www.stereo3d.com/hmd.htm.

Autostereoskopische Verfahren. Unter Autostereoskopie versteht man alle Verfahren zur Darstellung dreidimensionaler Bilder mit echtem Tiefeneindruck, ohne dass der Zuschauer dafür ein Hilfsmittel (Anaglyphen-, Shutter- oder Polarisationsbrille, Videobrille) benötigt.

• **Rasterlinsenverfahren.** Ein stereoskopischer Bildeindruck lässt sich ohne Brille erzielen, wenn eine Linsenrasterfolie vor dem Bildschirm so angebracht wird, dass sie die rechten und linken Bilder blickwinkelabhängig auf die beiden Augen eines Betrachters (Single View) verteilt. In Bild 12 ist dies die mittlere Sichtposition mit dem besten Bildeindruck. Der Effekt wird auch bei sogenannten „Wackelbildern“ verwendet, die je nach Blickrichtung zwischen zwei Bildern hin und her schalten. Um Flimmern zu vermeiden, ist mindestens eine Halbbildfrequenz von

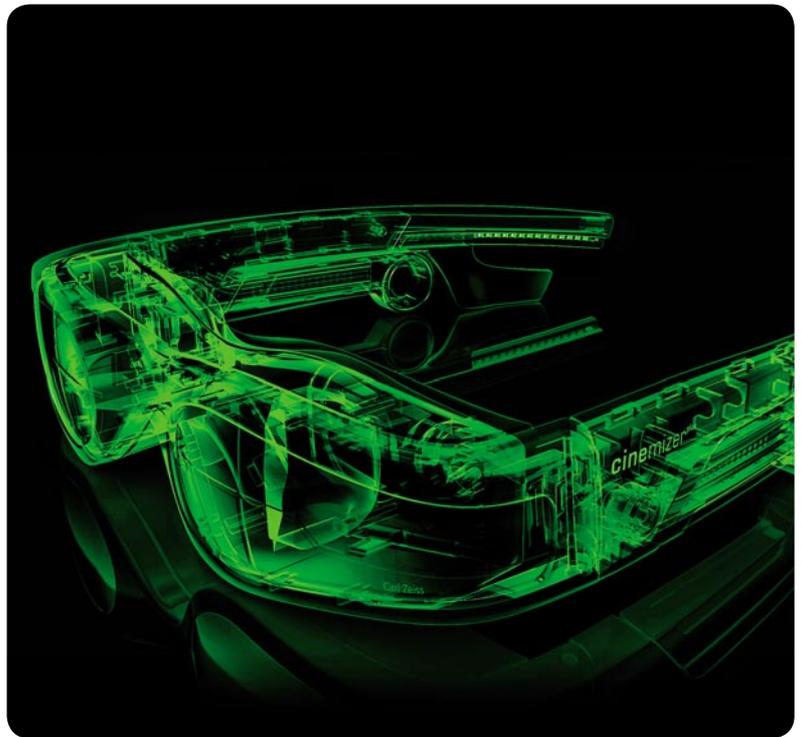


Bild 9: Das Röntgenbild einer Cinemizerplus-3D-Videobrille (Quelle: Zeiss)

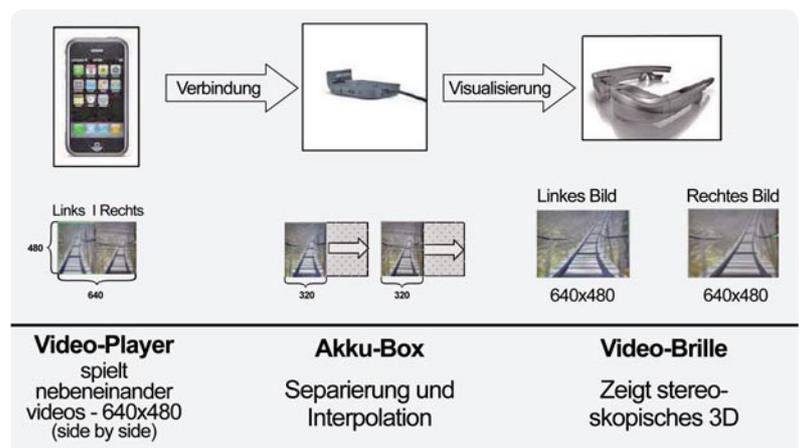


Bild 10: Die Cinemizerplus wird mit einem „Side-by-Side“-Videostream gespeist und erzeugt daraus Videostreams für das linke und das rechte Auge. (Quelle: Zeiss)



Bild 11: SimEye SX100 mit SXGA-Auflösung, 1280×1024 Pixel: vielleicht der Traum eines Power-Gamers, aber sicher der Albtraum eines durchschnittlichen 3D-TV-Zuschauers (Quelle: Rockwell Collins)

100 Hz erforderlich. Durch eine Erhöhung der Ansichten sind auch in einem größeren Betrachtungswinkelbereich, also für mehrere Zuschauer, räumliche Bilder möglich (Multi View).

• **Holografische Verfahren.** Bereits 1947 hatte der ungarische Physiker und spätere Nobelpreisträger Dennis Gábor bei seinen Forschungen am Elektronenmikroskop die Idee, wie man räumliche Bildinformationen in einer zweidimensionalen Bildplatte abspeichern kann. Die Holografie war geboren. Im Gegensatz zur Stereografie, welche räumliche Bilder nur in Form

von Amplitudeninformationen mit konventioneller Fotografie aufzeichnet, verwendet ein Hologramm kohärentes Laserlicht für die Erfassung der Amplituden- und Phaseninformationen, die ein Objekt im Gesichtsfeld eines Betrachters in Gestalt von Interferenzmustern erzeugt. Dabei ist für das räumliche Sehen einer Person freilich nur der Informationsanteil erforderlich, der zu deren aktuellem Gesichtsfeld führt (Bild 13). Es bleibt also eine riesige Menge an Informationen von diesem Zuschauer ungenutzt.

Das führte die Forscher der Dresdner SeeReal Technologies GmbH (www.seereal.com) zu der Idee, über die automatische Blickwinkelanalyse des Betrachters durch sogenanntes Eye-Tracking (Engl: Augenverfolgung) diesem nur die für sein Seherlebnis erforderlichen optischen Informationen über ein kleineres Sub-Hologramm bereitzustellen (Bild 14). So begrenzt man die riesigen Datenmengen eines herkömmlichen hochauflösenden 3D-Hologramms und kann die Berechnungen mit der heute verfügbaren Prozessor- und Speichertechnologie durchführen.

Wenn in naher Zukunft schnelle Displays kostengünstig verfügbar sind, werden jedem Auge abwechselnd 60 Bilder/Sek. zugeordnet. Für das Auge sind 3D-Hologramme wesentlich weniger anstrengend als gewöhnliche autostereoskopische Displays. Zudem können Menschen mit sogenannter Stereoblindheit (geschätzt ca. 6 % der Bevölkerung) oder eingeschränkter räumlicher Wahrnehmungsfähigkeit (ca. 20–30 %) die 3D-Grafiken ebenfalls im Raum schweben sehen. Einen weiterhin gewaltiger Anstieg der Rechen-, Speicher- und Übertragungskapazität vorausgesetzt, lässt sich prinzipiell das komplette Hologramm in HD und Echtzeit erzeugen. Damit wäre Eye-Tracking überflüssig. Aber bis dahin sind noch eine Reihe weiterer Probleme zu lösen, von einer überzeugenden Farbllichkeit der Hologramme über das Ausschalten des Speckle-Phänomens (durch die Kohärenz des Laserlichts hervorgerufenen feingranularen Glitzern) bis zu Farbverfälschungen durch Beugungserscheinungen höherer Ordnung am Diffraktionsgitter des Displays.

Dennoch: Der Weg zum Endziel eines dreidimensionalen Sehens ohne Sehhilfen mit einer vom Zuschauer wählbaren Perspektive ist nicht durch prinzipielle Hindernisse versperrt. Bis eine erschwingliche Technik für die Aufnahme, Übertragung und Wiedergabe holografischer 3D-Programminhalte zur Verfügung steht, werden aber sicher noch einige Jahre vergehen.

Fazit

Die Fernsehtechnik der Zukunft wird von hoher Auflösung (HD) und räumlichen Seheindrücken (3D) gekennzeichnet sein. Der neue Schnittstellenstandard für die Verbindung von Empfangsgeräten und Displays HDMI 1.4 berücksichtigt heute schon alle relevanten 3D-Technologien, die aktuellen Highend-TV-Displays sind meist in irgendeiner Form 3D-tauglich. Wenn nicht alles täuscht, wird die Zukunft den Übergang vom flächenhaften zum räumlichen Video mit einem Multimilliardenmarkt bringen. Dem HD-Boom wird der 3D-Boom folgen.

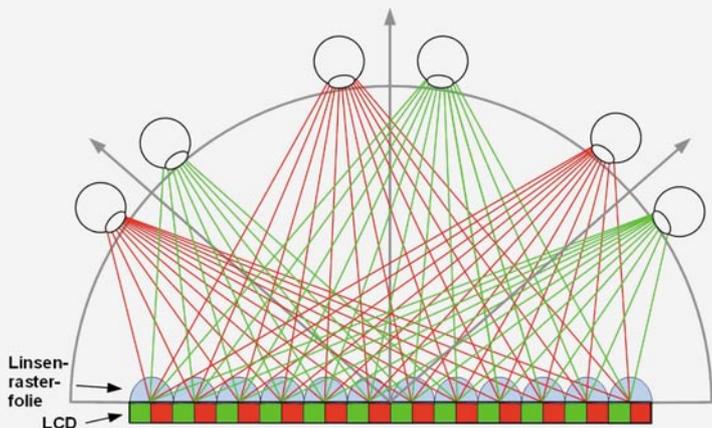
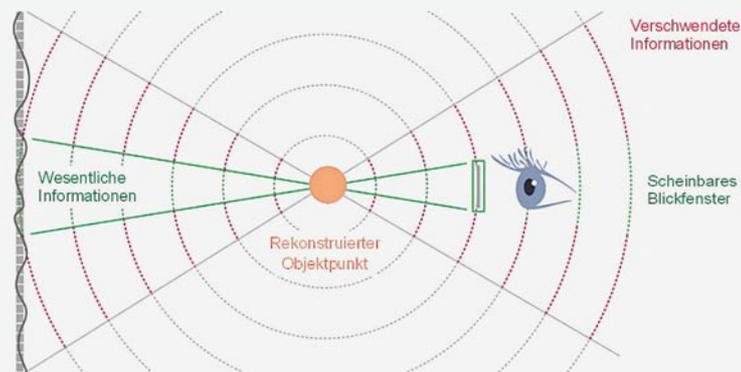


Bild 12: Nur aus bestimmten, halbkreisförmig um die Linse rasterfolie angeordneten Zonen ist das stereoskopische Bild klar sichtbar.



Hologramm Display

Bild 13: Ein klassisches 3D-Hologramm-Display erzeugt für die aktive Blickrichtung des Betrachters viel zu viele Informationen. (Quelle: SeeReal)

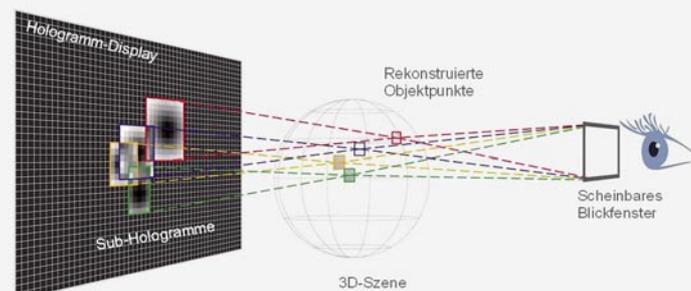


Bild 14: Durch Eye-Tracking kann das Display erkennen, welchen Objektbereich der Zuschauer betrachtet, und ihm nur die dafür notwendigen Informationen aus kleineren Sub-Hologrammen schicken. (Quelle: SeeReal)