





Virtuelle Realität VR-Displays & Stereo-Rendering



G. Zachmann
Clausthal University, Germany
cg.in.tu-clausthal.de



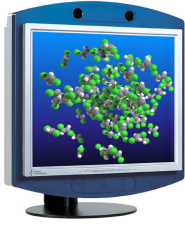
Visuelle Displays

- Monitor
- *Head-Mounted Displays (HMDs)*
- *Head-Coupled Displays (HCDs)*
- *Immersive projection displays (IPDs)*
 - *"Powerwall"*
 - *Workbench*
 - *Cave*
- Retinal displays

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 2

Monitor

- "Fishtank VR"
- Vorteile:
 - Schon vorhanden
 - Preiswert
 - Auflösung bis zu 1900 x 1600
 - Vertraut (Akzeptanz)
 - Keine speziellen Voraussetzungen an die Umgebung
 - Gewisse Stereo-Fähigkeit (sog. Auto-Stereo Displays)
- Nachteile:
 - Keine Immersion
 - Kleiner Bewegungsspielraum
 - "Stereo frame violation" häufig



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 3

Nachteil eines geringen FoV



- Keine Immersion!



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 4

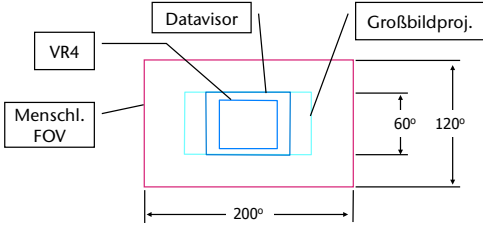
HMD

- Frühestes "echtes" VR-Display
- LCDs:
 - Leicht
 - Niedrigere Auflösung
- CRTs:
 - Hohe Auflösung
 - Schwer, hohe Spannung am Kopf
- Vorteile:
 - Großer *field-of-view*, Rundum-Display
 - Sehr gute Immersion
 - Keine "*stereo frame violation*"
 - Großer Bewegungsspielraum
 - *Low-end-Modelle* sind erschwinglich
 - Kaum spezielle Anforderungen an die Umgebung





G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 5

- Nachteile:
 - Auf Dauer unbequem ("*invasive interface*")
 - Verzerrungen
 - Reale Umgebung ist ausgeblendet (insbesondere User selbst)
 - Manipulation von realen Steuerelementen schwierig
 - Jeder braucht einen HMD (dafür hat jeder, potentiell, eine korrekte Darstellung)
- HMDs gibt es schon sehr lange:



The diagram shows a person's head with a VR4 headset. A pink box represents the 'Menschl. FOV' (human field of view) with a width of 200°. Inside it, a blue box represents the 'Datavisor' with a width of 60°. A larger white box represents the 'Großbildproj.' (large image projection) with a width of 120°. The diagram also shows a 'VR4' label and a 'Menschl. FOV' label.




Bell Helicopter, 1967

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 6

HCD

- HCD = HMD auf "Galgen" montiert ("Boom")
- Vorteile von HCDs gegenüber HMDs:
 - Größere Auflösung, da CRTs
 - "Mal schnell weglegen" oder "schnell mal durchschauen"
 - Geringe Last
 - Gutes *Tracking* ist eingebaut
- Nachteile gegenüber HMDs:
 - Geringer Bewegungsfreiraum
 - Nur eine Hand frei
 - Trägheit
 - Geringere Immersion

→ Haben sich nicht durchgesetzt




G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 7

Immersive Projection Displays / Technology (IPD / IPT)

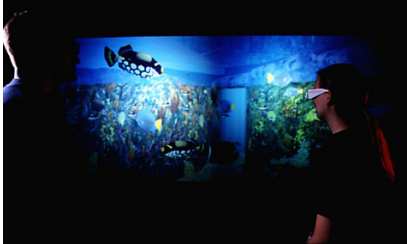
- Idee ähnlich wie im Kino
- 1 – 6 Leinwände
- *Powerwall*: 1 Wand (3x6 Meter z.B.)
- *Workbench*: 1 waagerechte Display-Fläche
- *Holobench*: 2 Flächen, 1 senkrecht, 1 waagerecht
- *Cave*: 3 – 6 Wände
- "*Desktop-Cave*": 2 waagerechte Wände

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 8

Powerwall



Powerwall mit Rückprojektion



*Powerwall mit Aufprojektion,
(Probleme hier: Edge-Blending, Hot Spots)*

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 9

"HeyeWall", Darmstadt:

- 24 Kacheln, 48 PCs
- Gesamtauflösung: 18 Mio Pixel (6144 x 3072) in Stereo




G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 10

Workbench

Workbench



Prinzip der Workbench



Kippbare Proj.fläche




Holobench



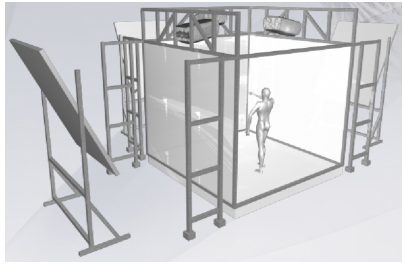
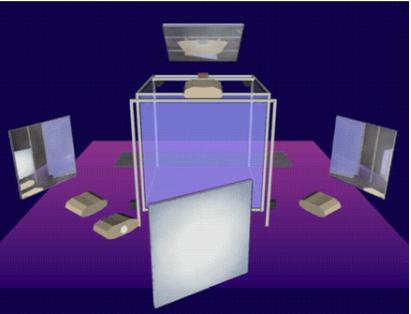
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 11

Cave


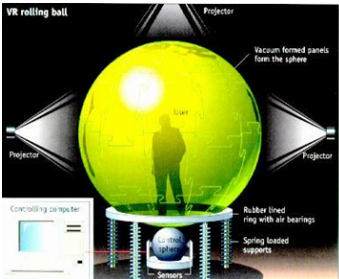
3-Seiten Cave



Spiegelanordnung



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 12

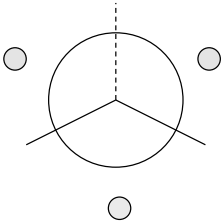
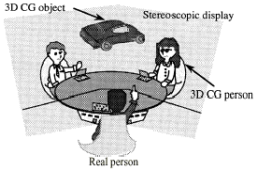
5-Seiten Cave, FHG-IGD, Darmstadt

6-Seiten Cave, Alborg, DK

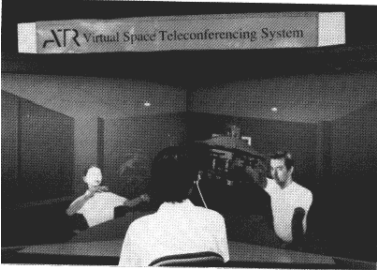
Studie

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10

VR-Displays & Stereo-Rendering 13


Shared workspace, hier mit logisch aneinandergefügten "Desktop-Caves"



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10

VR-Displays & Stereo-Rendering 14

Curved Screens



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10

VR-Displays & Stereo-Rendering 15

Vor- und Nachteile der IPDs

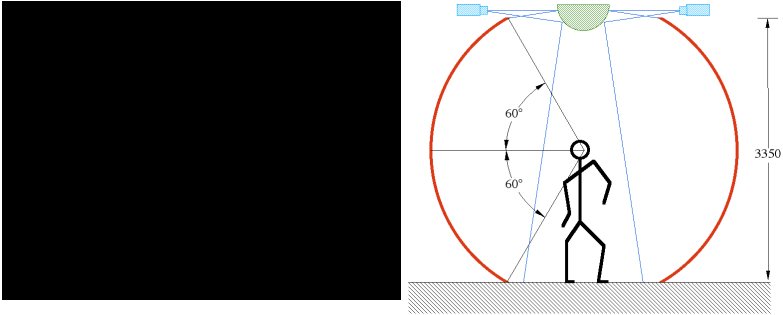
- Vorteile:
 - Hohe Auflösung (z.Z. bis zu ca. 1600 x 1280 pro Kachel)
 - Großer *field-of-view*
 - "*non-invasive*"
 - Keine Isolation von der realen Welt
 - (Mehrere User)
 - Cave: Kopfdrehung bewirkt nur kleine Änderungen im Bild
→ Latenz-Problem reduziert / nicht so auffällig
- Nachteile:
 - Platz
 - Preis (viele Projektoren, viele *Graphik-Pipes*)
 - Präzision, Justierung
 - Möglicherweise "*stereoscopic violation*"
 - (korrekte Ansicht nur für einen *Viewer*)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10

VR-Displays & Stereo-Rendering 16

Personal Domes

- Beispiel: Wii + Dome + MacBook Pro



Quelle: Paul Bourke, University of Western Australia, <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/>

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 17

- One-man curved screens (fast schon Dome):



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 18



■ Ein modernes "Sensorama":



Immersa-Dome von Aardvark Applications

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rending 20

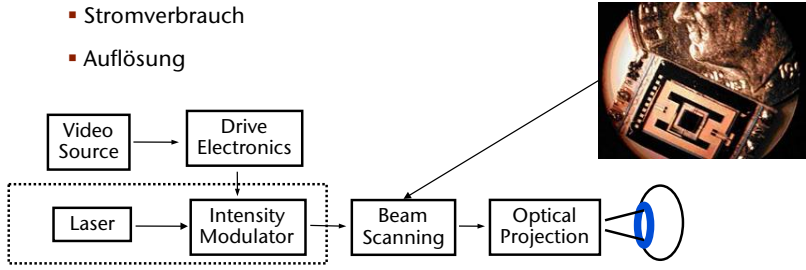
■ Die Reachin-Idee:




G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rending 21

Retina-Displays (retinal displays)


- Problem der HMDs: umständlich aufsetzen, festschrauben, ...
- Idee: mit Laser zeilenweise ins Auge scheinen (scanner)
- Vorteile:
 - Miniaturisierbar
 - Hohe Kontraste u. Helligkeit (gut für *see-through*)
 - Stromverbrauch
 - Auflösung



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 22



Retinal display



Studie

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 23



Holographische / volumetrische Displays

- Echtes dreidimensionales Display
- Vorteile:
 - Korrekte Ansicht aus *jedem* Blickwinkel!
 - Übereinstimmung zwischen Akkomodation und Konvergenz
 - Tiefen(un-)schärfe
- Holographische Displays: Computer berechnet Hologramm.
Probleme:
 - Berechnungsaufwand
 - Farben
- Volumetrische Displays: Voxel werden in ein Volumen projiziert (nicht auf eine Ebene).
Probleme:
 - Datenmenge (z.Z. 100 Mega-Voxel = 1000x1000x100)
 - Verdeckung?

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 24

Volumetrisches Display:


- 198 x 768 x 768 \approx 100 million voxels
- Frame rate: 20 Hz

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 25

Ungewöhnliche Display-Flächen

- Nebel ("fog screen")
 - Laminarer, nicht-turbulenter Luftstrom
 - Wassertröpfchen "sandwiched" im Luftstrom



FogScreen

Olwal et al.: Consigalo: Multi-user, Face-to-face Interaction on an Immaterial Display

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 26

"Everywhere displays":



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 27

Wie projiziert man Stereo mit *einer* Display-Fläche?

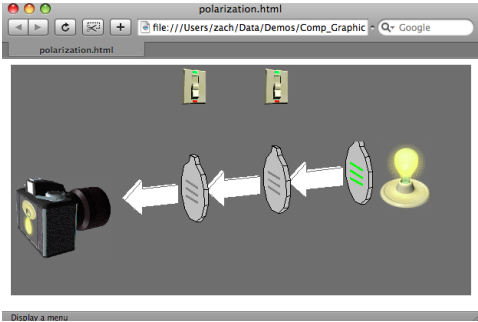
- Benötigt eine Art *Multiplexing*

- Zeitliches Multiplexing ("aktives Stereo"):**
 - Typ. 1 Projektor (z.B. Monitor)
 - Abwechselnd links/rechts projizieren/rendern
 - Synchron dazu linkes/rechtes Auge durchlassen (*shutter glasses*)
 - Shutter-Glasses laufen mit 120 Hz → 60 Hz Framerate
- Multiplexing per Polarisation ("passives Stereo"):**
 - 2 Projektoren auf dieselbe Fläche
 - Gleichzeitig projizieren mit unterschiedlicher Polarisation des Lichtes
 - Polarisationsbrille lässt richtiges Bild links/rechts durch




G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 30

Demo

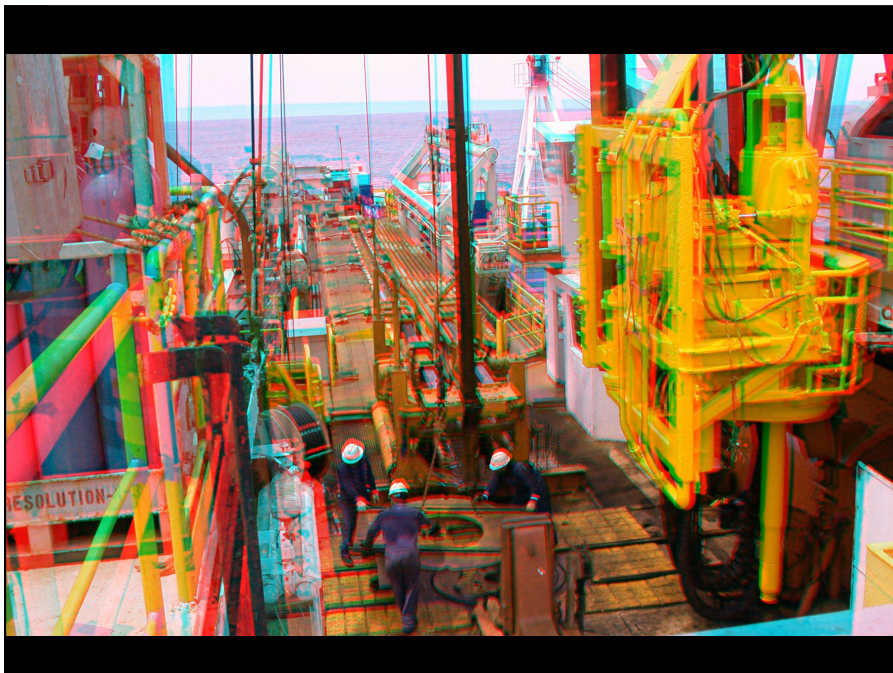
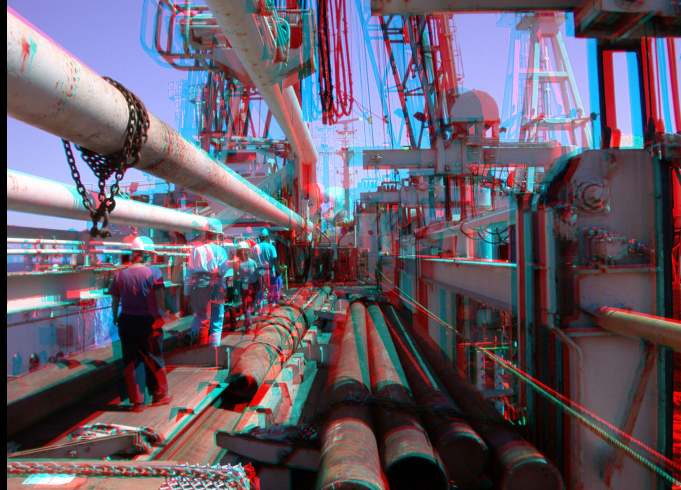


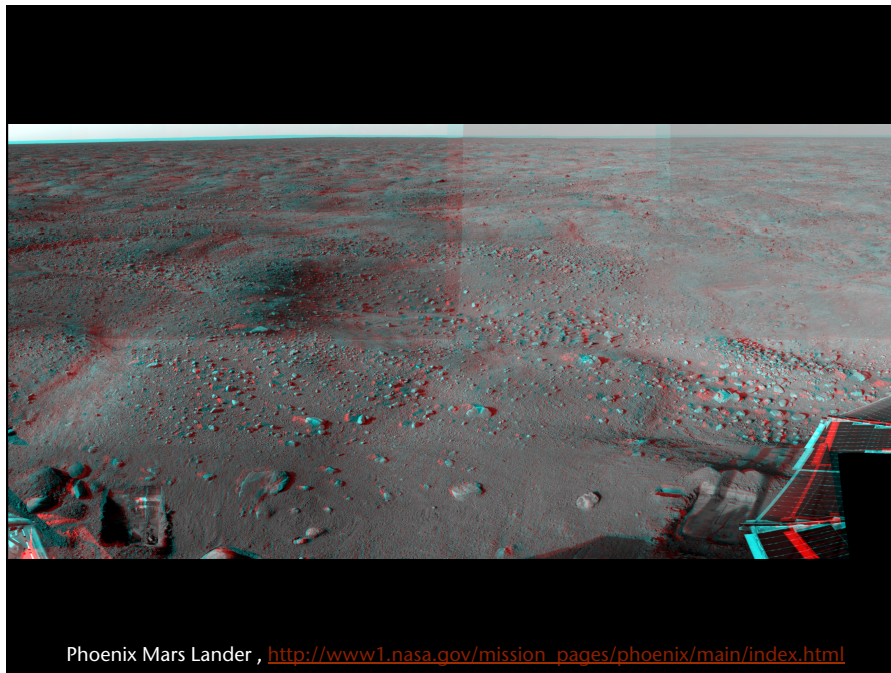
<http://www.colorado.edu/physics/2000/applets/polarization.html>

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 31

"Farb-Multiplexing"

- Einfache Version: *Anaglyphes Stereo* (Rot-Grün-Stereo)







■ Verallgemeinerung ("*Infitec*"):

- Jede Farbe durch einen engen Farbkanal (Bandpaß)
- Jeder User bekommt Brille mit verschobenen Filtern

■ Problem:



- Farbtreue

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 35



- Chromo-stereoscopy (color stereoscopy), siehe EG short paper im VR leitz
"Flexible Color-Mapping for Chroma-Stereo Rendering of Interactive 3D Virtual Environments"

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 36



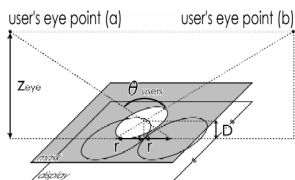
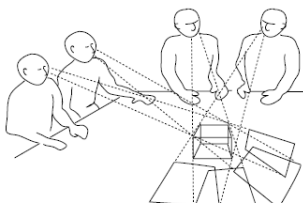
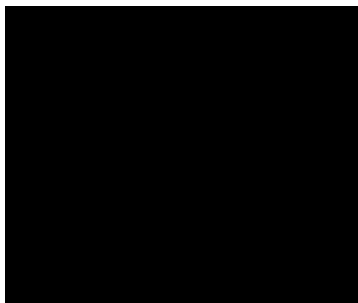
Stereo für mehrere Benutzer

- Bislam nicht zufriedenstellend gelöst!
- Zeit-multiplexed:
 - Frame-Rate für multi-user stereo = $\text{Frame-Rate für Mono} / 2 \cdot \#\text{User}$
- Infitec für mehrere User:
 - Jeder User bekommt Brille mit verschobenen Filtern
 - Bei n Usern braucht man also $2n$ verschiedene Filter
- Räumlich multiplexed

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 37

Räumliches Multiplexing

- Proj.fläche ist aufgeteilt unter Usern
- Kopplung zwischen
 - Größe des View-Frustums
 - Bewegungsspielraum des Users
 - D & Lochgröße
- Beispiele:
 - Illusion Hole

IllusionHole © Siggraph 2001

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 38

- Weitere Beispiele:
 - Fakespace's Pyramide
 - Fraunhofer's "virtual showcase"





Fakespace




Oliver Limber

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 39

Zeitliches Multiplexing

- Für 1 Person: Shutter-Glasses laufen mit 120 Hz
→ 60 Hz Framerate
- Für 2 Personen: Shutter-Glasses mit 180 Hz → 45 Hz Framerate

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 40

Stereo-Sehen

- Wichtiger "*depth cue*" (nicht der wichtigste)
- Nur bis einige Meter Entfernung
- Disparität im Auge = $\delta_2 - \delta_1 = \gamma - \alpha$
- Horopter = Punkte mit gleicher Tiefe wie fokussiertes Objekt = 0-Disparität
- Parallaxe auf dem Bildschirm:

Parallaxe

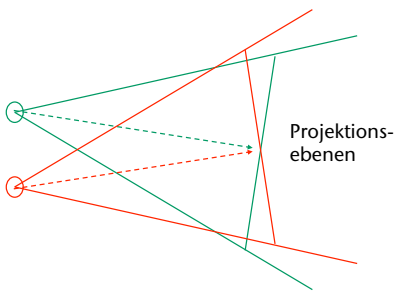
Disparität

Horopter

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 42

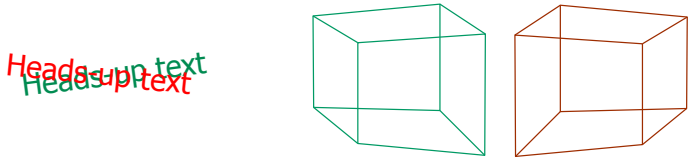
Projektion

- Falsch: konvergierende Hauptsehstrahlen



Projektions-ebenen

- Problem: vertikale Parallaxe



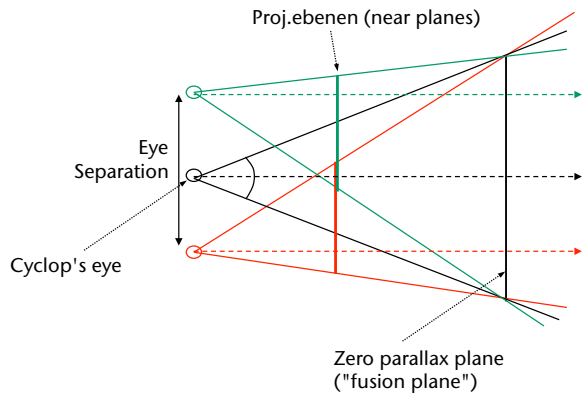
Head-up text
Head-up text

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 43

Stereoscopic Projection

- Richtig: parallele Hauptsehstrahlen

→ *off-axis perspective projection*



Proj.ebenen (near planes)

Eye Separation

Cyclop's eye

Zero parallax plane ("fusion plane")

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 44

- Gegeben i , aspect ratio w/h , horizontaler FOV α , near n , zero-parallax depth z_0
- Bestimme *left/right/top/bottom* für `glFrustum()`
- Annahme: kein Head-Tracking, d.h., Zyklonen-Auge befindet sich über der Mitte der Zero-Parallax-Plane
- top* und *bottom* wie gehabt:
$$t = \frac{h}{w} l$$
- left* am Beispiel linkes Auge:

$$l_c = n \tan \frac{\alpha}{2}$$

$$l' - l_c = i \frac{z_0 - n}{z_0}$$

$$l = l_c + (l' - l_c) - i = l_c - i \frac{n}{z_0}$$

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 45

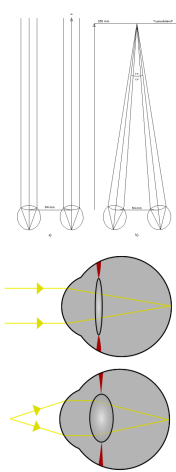
Probleme des Stereo-Renderings: Depth aliasing

- Selbst wenn z-Buffer kontinuierlich wäre, gäbe es diesen Effekt!

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 46

Exkurs: Akkomodation und Konvergenz


- Zwei wichtige Begriffe, die leicht verwechselt werden
- **Konvergenz** = gegensinnige Augenbewegung (um die Hochachse), so daß die Mittelachsen der Augen sich schneiden
 - damit ein bestimmtes Objekt (**Fixationspunkt**) auf den am höchsten aufgelösten Teil der Netzhaut abgebildet wird
- **Akkomodation** = Anpassung des Auges (der Linse) an verschiedene Distanzen
 - damit das gerade betrachtete Objekt (**Fixationspunkt**) scharf auf der Netzhaut abgebildet wird
 - (Ich sage oft auch **Fokussierung** hierzu, wg. Linse)



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 47

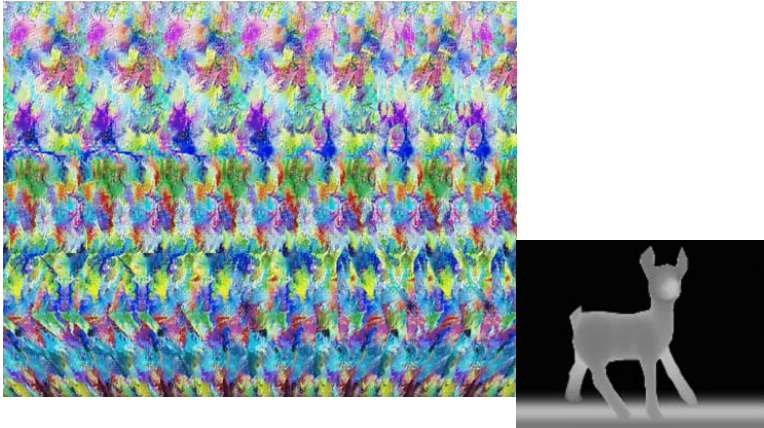
Experiment

- Folgendes Bild sieht man dreidimensional, wenn man Akkomodation und Konvergenz entkoppelt:



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 48

- "Magic Eye"-Bilder sind eine "Verklausulierung" dieses Effektes (werden speziell konstruiert):

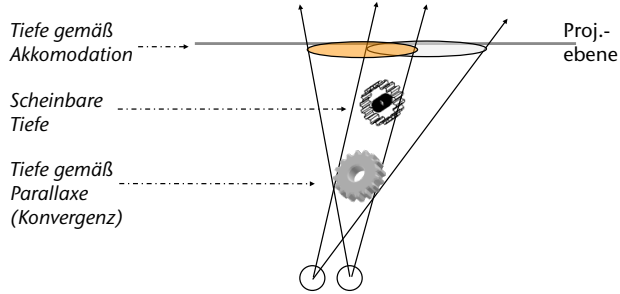


"Tiefenbild" dazu

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 49

Stereo ist nur die "halbe Miete" für echtes 3D!

- Effekt: in der Cave an der Powerwall erscheinen nahe Objekte zu weit entfernt
- Meine Hypothese:



- Lösung: holographisches oder volumetrisches Display

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 50

Stereo is a "one man show"

- Warum stimmt ein gerendertes Stereo-Bild nur für 1 Standpunkt?

- Lösungen:
 - Für 2 Betrachter: 4 Bilder rendern
 - Holographische/Volumetrische Displays

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 51

Stereo Violation

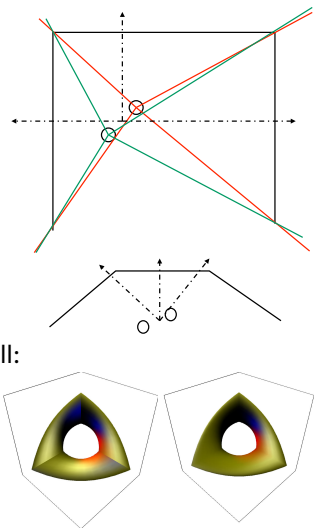
- 2 Effekte (treten immer zusammen auf):
 - Clipping*
- Widersprechende *depth cues*:
Obj wird geclippt, obwohl vor dem Rand des Windows

Bsp.: linke untere Ecke auf dem anaglyphen Mars-Bild

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 52

Rendering auf mehrere Wände

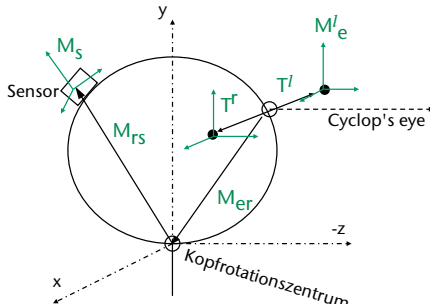
- Repräsentiere reale Proj.flächen durch Polygone in der virt. Umgebung
- Rotiere Pgon u. Viewpoint so, dass senkrecht zur z-Achse
- Bestimme left/right/top/bottom, weiter wie bisher
- Achtung bei *Viewing-Transformation*.
Macht man es exakt wie bei Single-Wall:
 - spekulare Beleuchtung hat Knicke
 - Generierte Texturkoord. unstetig



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 53

Das Kopfmodell

M_e = Viewpoint-Trafo
 M_s = aktuelle Sensormessung, rel. zu Kalibrierung
 M_{rs} = Trafo vom Kopffrotationszentrum zum Sensor
 M_{er} = Trafo vom "Zyklopenauge" zum Kopffrotationszentrum
 $T^l | T^r$ = Translation zum linken|rechten Auge

$$M_e = T_{l|r} M_{er} M_{rs} M_s$$


G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 54

■ Problem: "infinite viewer"
 bei spekularem Anteil
 $specular : (s \cdot n)^{shiny}, s = \overline{VL} + (0, 0, 1)$

■ Lösung:
 1. "Local viewer" setzen, damit ist
 $s = \overline{VL} + \overline{VE}$

2. Oder, Rotationsmatrix für Wand auf PROJECTION-Stack multiplizieren,
 nicht auf MODELVIEW

$$V_{screen} = M_{viewpoint} \underbrace{M_{proj} R_{wall}}_{GL_PROJECTION} \underbrace{M_{viewpoint} M_{world}}_{GL_MODELVIEW} V_{object}$$

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 55

Relevante GL(UT)-Befehle

■ Init:

```
glutInitDisplayMode (GLUT_DOUBLE | GLUT_RGB | GLUT_DEPTH |
GLUT_STEREO);
```

■ Rendern:

```
glDrawBuffer (GL_BACK_LEFT);
glClear (...);
glFrustum (...);
traverse scene graph ..
glDrawBuffer (GL_BACK_RIGHT);
glClear (...);
glFrustum (...);
traverse scene graph ..
```

■ Oder: in 2 verschiedene Pipes rendern
 ■ Oder: Panorama-Mode (2 Viewports in einem großen Window)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 56

Guidelines für Stereo-Rending

1. Parallaxe nicht zu groß!
 $\pm 1.6^\circ \sim \text{Parallaxe} \leq 0.03 \cdot \text{Entfernung Proj.wand}$
2. Einzelnes Objekt \rightarrow lege ZPP durch dessen Mittelpunkt
3. Ganze Szene \rightarrow 1/3 negative Parallaxe, 2/3 positive Parallaxe
4. Halte Objekte mit negativer Parallaxe möglichst in der Mitte

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rending 57

Entzerrung des Displays

- Optik verzerrt manchmal
- Idee: Vorverzerrung mit Textur

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rending 58

Offene Fragen

- Welcher Fehler entsteht durch die Annahme, daß Augen um Linsenmitte rotieren, und daß Augen perfekte Kugeln sind?
- Untersuchung der falschen Tiefenwahrnehmung (Dipl.arbeit!)
- ...

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 59

System-Übersicht: die Rendering-Loop

- 1 Prozessor → alles seriell
- 2 Prozessoren → App und Renderer parallel
- Stereo → 2 Render-Prozesse (3 Proc)
- Allg.: n Wände in Stereo →
 - Wenigstens $n+1$ Prozessoren, n Render-Prozesse
 - Besser $2n+1$ Prozessoren

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 60

Crosstalk (Ghosting)

- Wenn ein Auge (auch) das Bild sieht, das für das andere Auge bestimmt ist
 - Je nach Technologie mehr oder weniger vorhanden
- Papers von Bernd Froehlich und Robert van Liere!

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 61

Simulator Sickness

- Folgende Symptome treten manchmal bei längerem Verweilen in einem Flugsimulator / virtuellen Umgebung auf:
 - Seekrankheit, Augenschmerzen, verschwommene Sicht, Kopfweh, Schwindel, Ermüdung
- Ursache nicht sicher geklärt
- Häufigste Hypothese: nicht exakte Übereinstimmung zwischen visueller Wahrnehmung und Gleichgewichtsorgan
 - Bei längerem Aufenthalt auf einem Schiff unter Deck
 - Verzögerung der Bewegungen der Plattform im Flugsimulator
- Häufigkeit: 20-40% bei Kampfpiloten
- Weitere Beobachtungen:
 - Häufiger bei erfahrenen Piloten als unerfahrenen [sic]
 - In a rotating field when walking forward, people tilt their heads and feel like they are rotating in the opposite direction
 - If a person is walking on a treadmill holding onto a stationary bar and you change the rate the visuals are passing by, it will feel to the person like the bar is pushing or pulling on their hands

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 VR-Displays & Stereo-Rendering 62