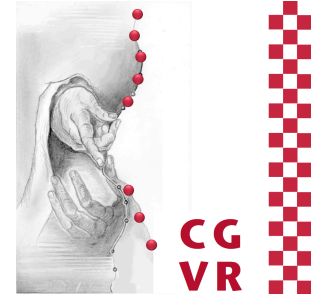


Bremen



Virtuelle Realität

VR-Displays & Stereo-Rendering



G. Zachmann
University of Bremen, Germany
cgvr.cs.uni-bremen.de

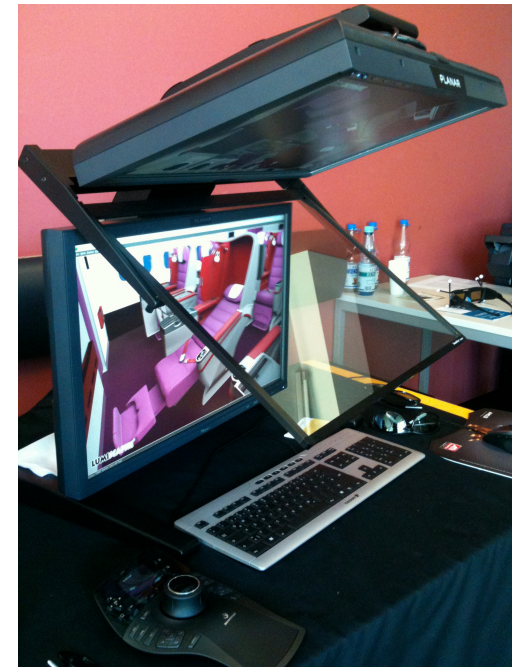
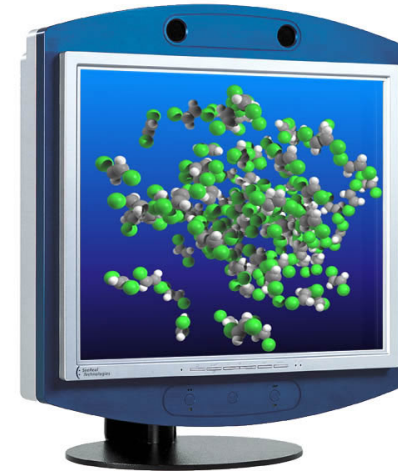
- Monitor
- *Head-Mounted Displays (HMDs)*
- *Head-Coupled Displays (HCDs)*
- *Immersive projection displays (IPDs)*
 - *"Powerwall"*
 - *Workbench*
 - *Cave*
- Retinal displays



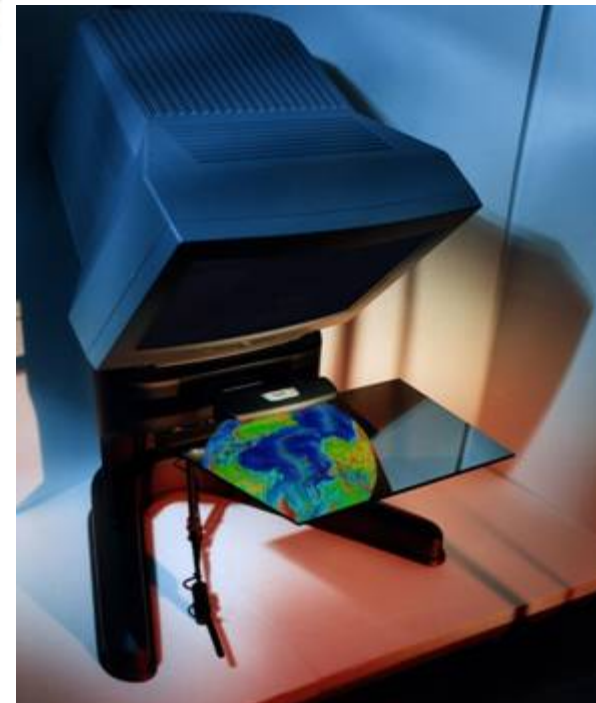
Monitor mit Stereo (meist Autostereo)



- "Fishtank VR"
- Vorteile:
 - 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*" ist häufig



- Die Reachin-Idee:



Nachteil eines geringen FoV

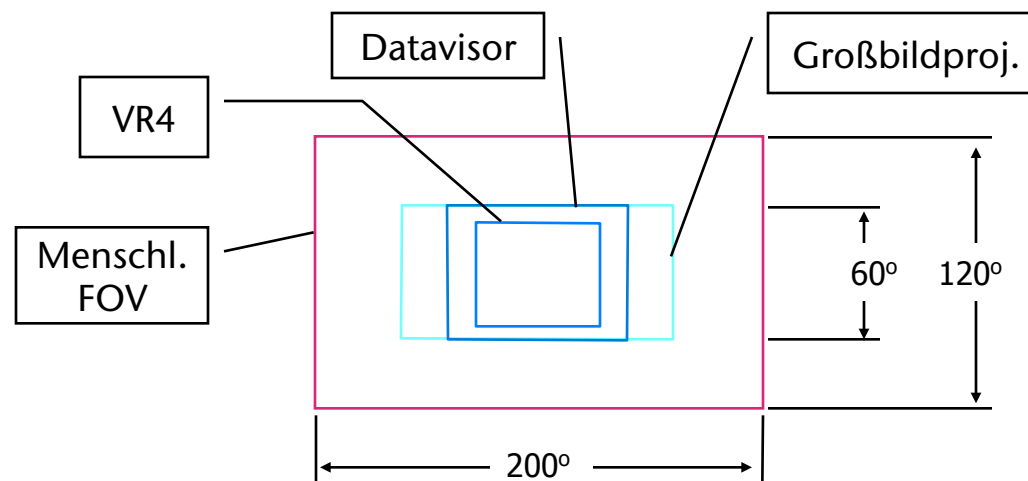
- Keine Immersion!



- Erstes "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



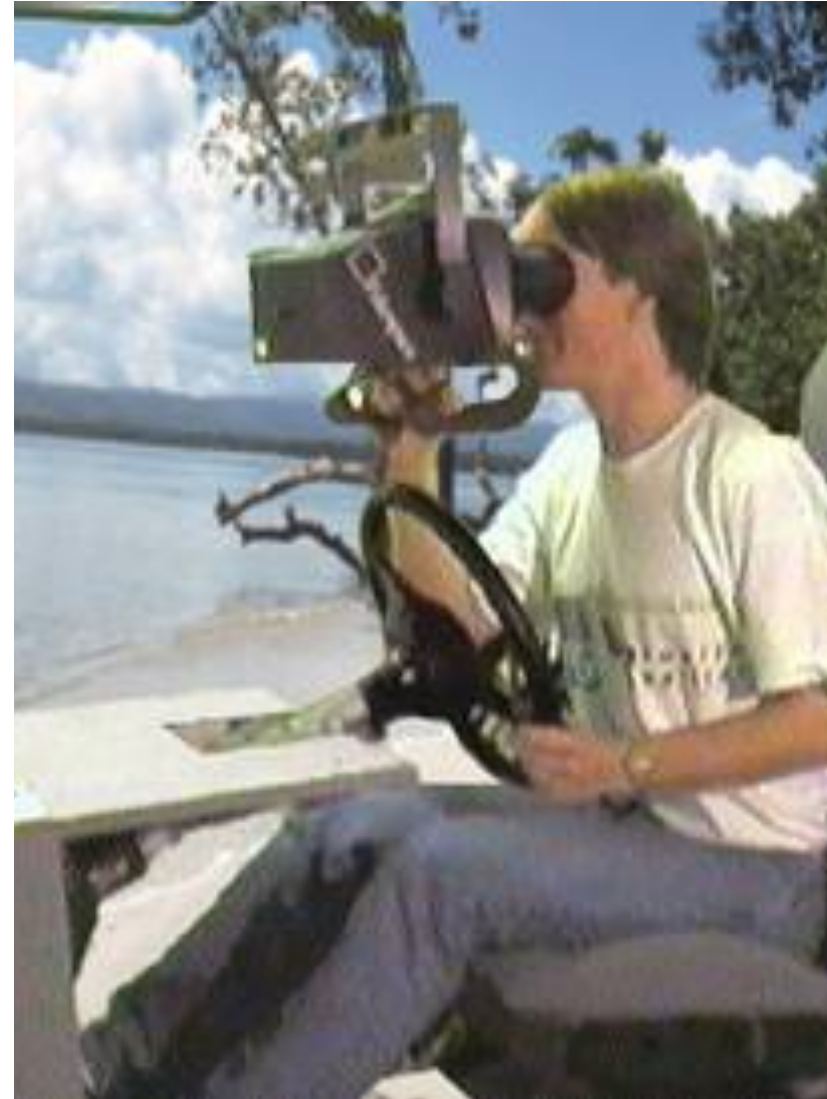
- Nachteile:
 - Auf Dauer unbequem ("*invasive interface*")
 - Verzerrungen
 - Reale Umgebung ist ausgeblendet (insbesondere User selbst)
 - Manipulation von realen Steuerelementen schwierig
 - Jeder braucht einen HMD (dafür hat jeder, potentiell, eine korrekte Darstellung)
- HMDs gibt es schon sehr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



Bell Helicopter, 1967

HCD (Head Coupled Displays)

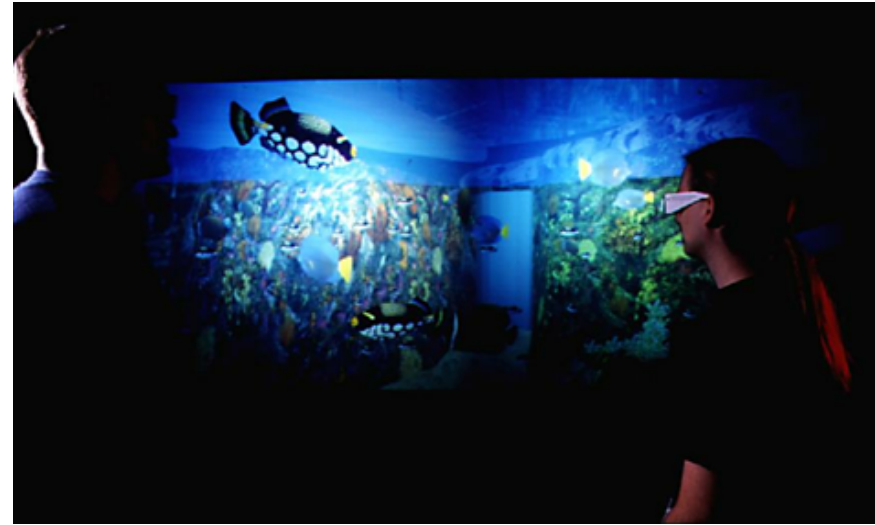
- HCD = HMD auf "Galgen" montiert ("Boom")
 - Vorteile von HCDs gegenüber HMDs:
 - Größere Auflösung, da CRTs
 - "Mal schnell weglegen" oder "schnell mal durchschauen"
 - Geringe Last
 - Gutes *Tracking* ist eingebaut
 - Nachteile gegenüber HMDs:
 - Geringer Bewegungsfreiraum
 - Nur eine Hand frei
 -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



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



Powerwall mit Rückprojektion

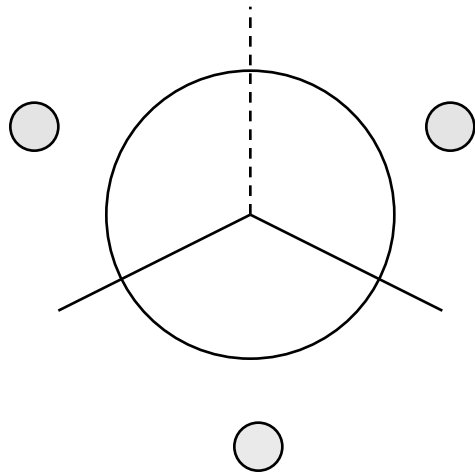


*Powerwall mit Aufprojektion,
(Probleme hier: Edge-Blending, Hot Spots)*

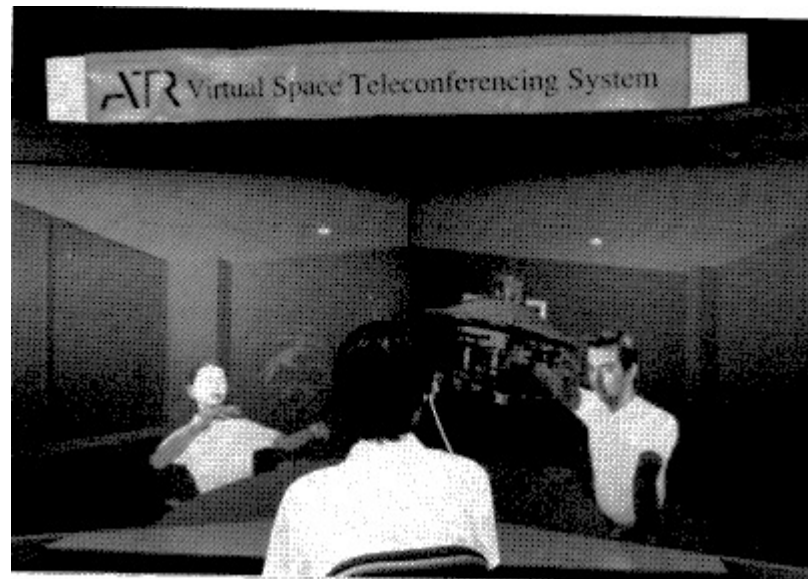
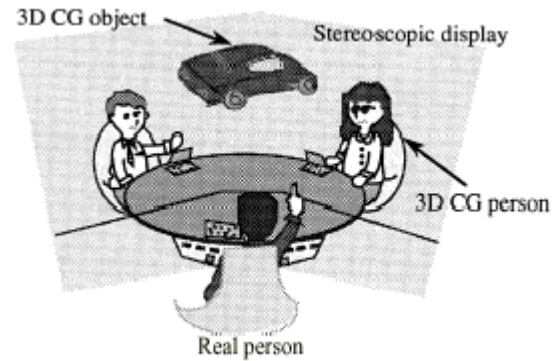
- "*HeyeWall*", Darmstadt:
 - 24 Kacheln, 48 PCs
 - Gesamtauflösung: 18 Mio Pixel (6144 x 3072) in Stereo



Beispiel-Anwendung: virtueller Konferenzraum



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

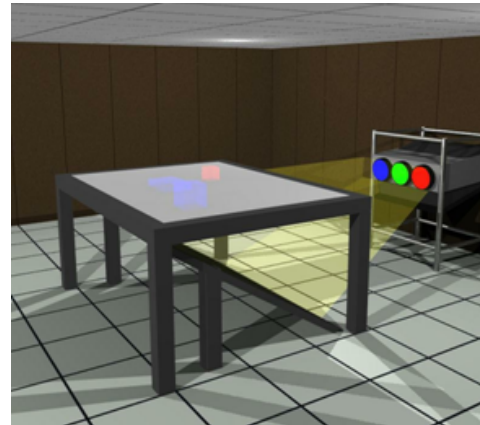


Workbench, L-Shape, etc.

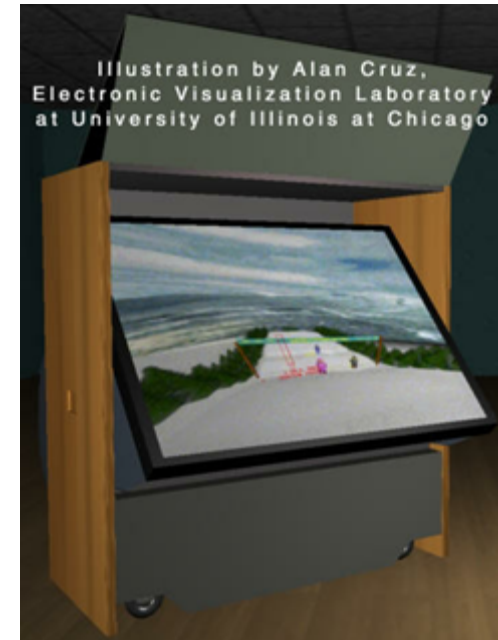
Workbench



Prinzip der Workbench



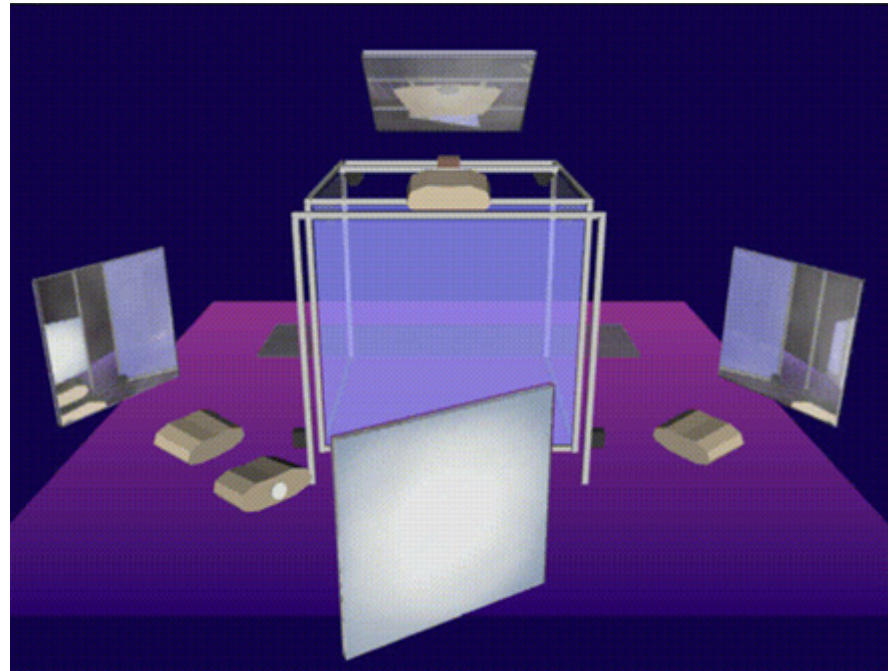
Kippbare Proj.fläche



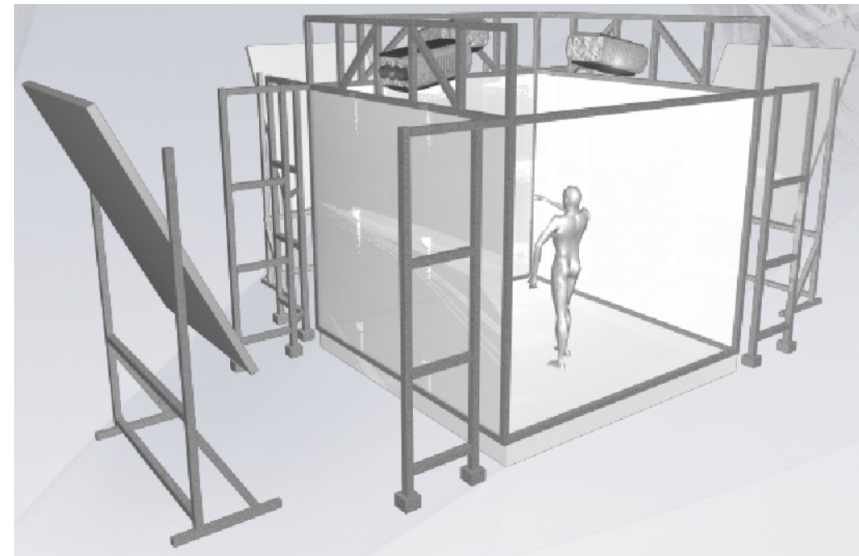
Holobench



3-Seiten Cave



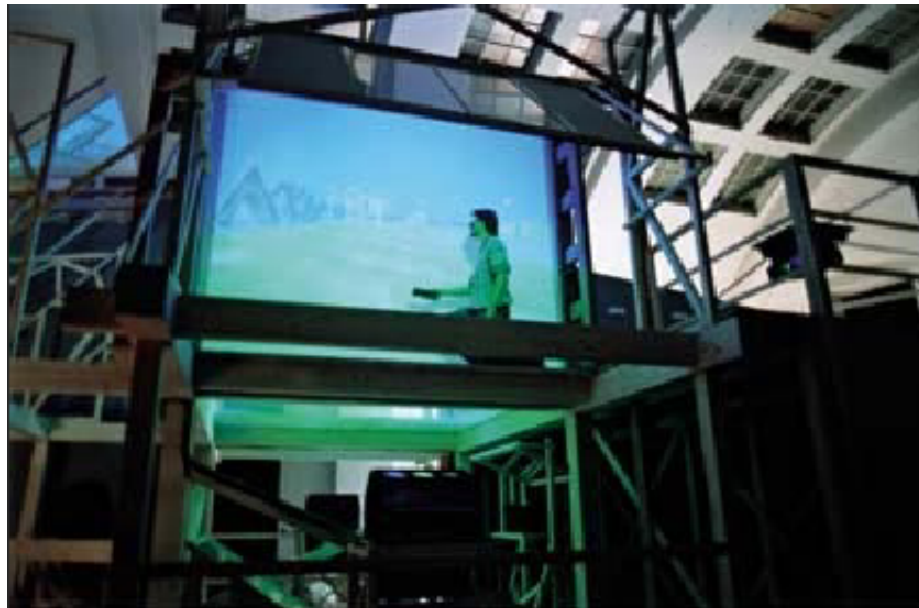
Spiegelanordnung



5-Seiten Cave, FhG-IGD, Darmstadt

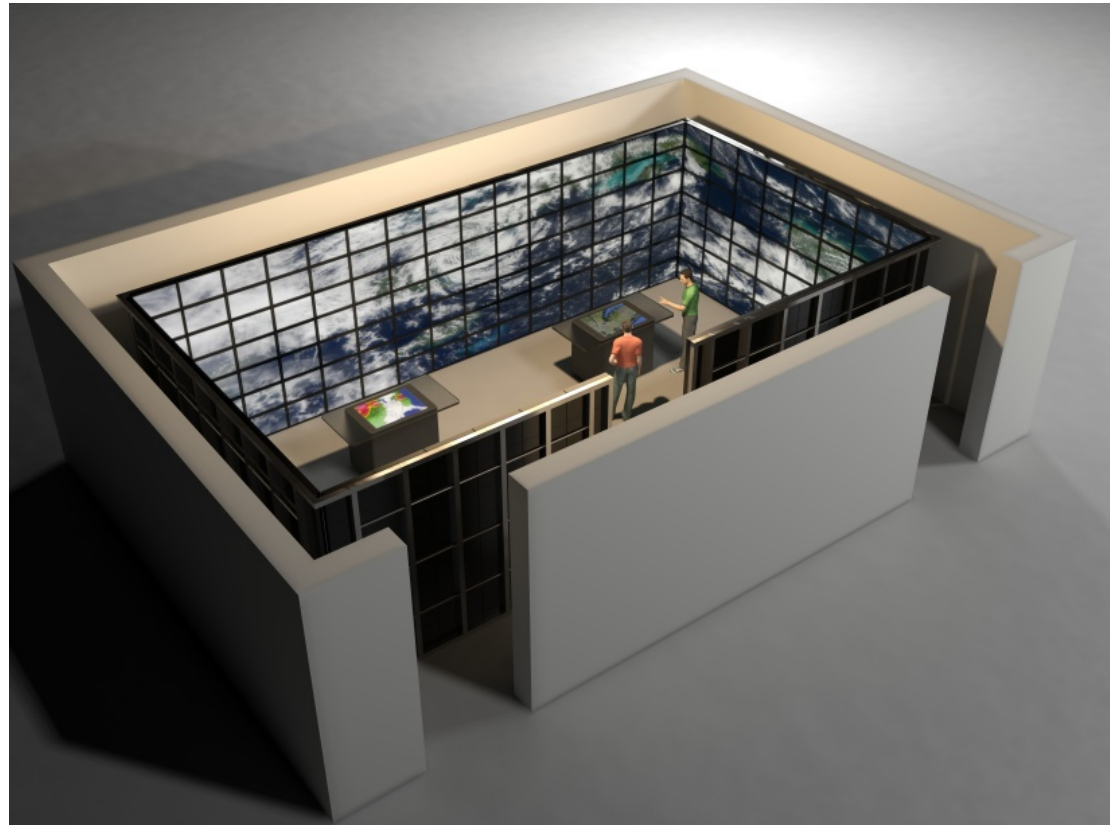


6-Seiten Cave, Alborg, DK



RealityDeck - Immersive Giga-Pixel Display

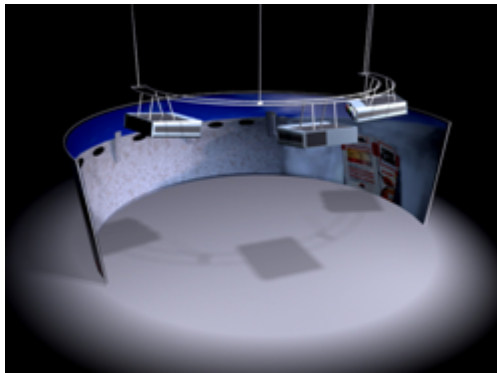
- Entwickelt an der Stony Brook U, New York
- 308 30" LCD Displays
- 2560 x 1600 resolution per display
- 1.2+ billion pixels of resolution
- 40'x30'x11' physical dimensions
- 85 dual quad-core, dual-GPU cluster nodes



<http://www.cs.stonybrook.edu/~realitydeck/>

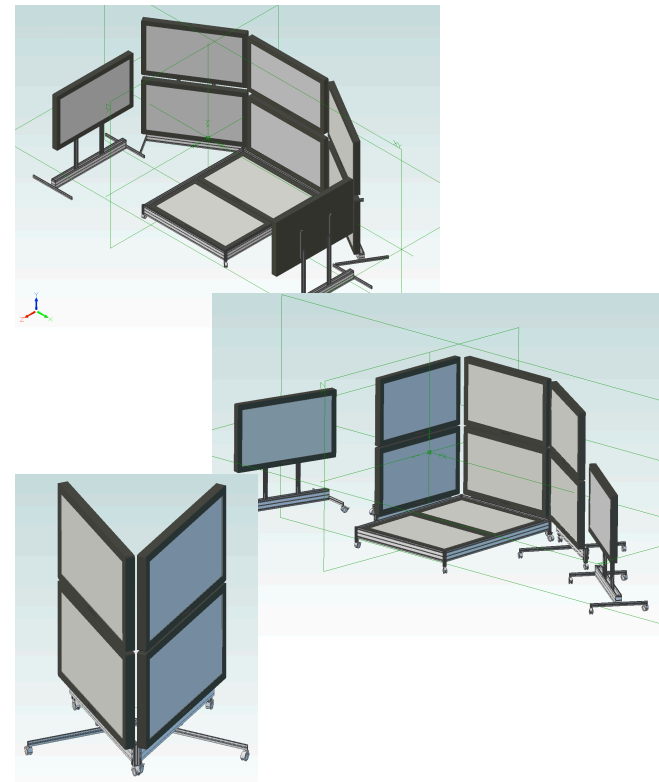


Curved Screens

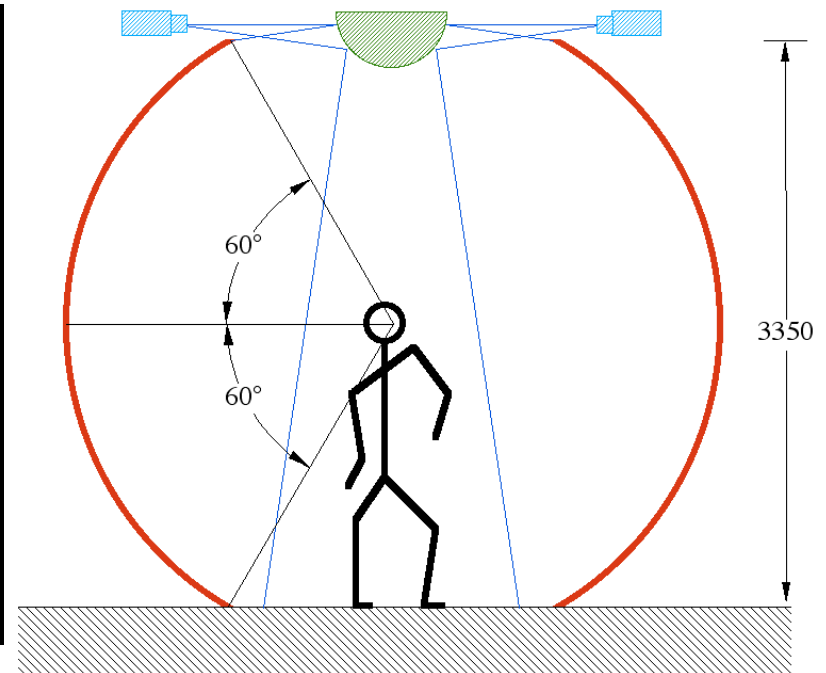
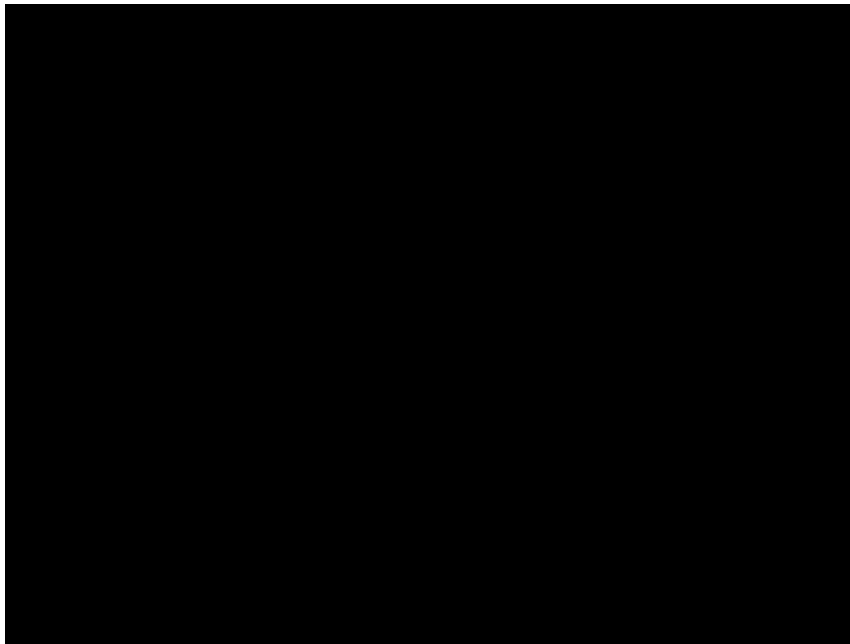


Curved Screen aus 3D-TVs

- Idee: baue die Wände der Cave aus einer kleinen Anzahl von 3D-Fernseh-Bildschirmen
- Vorteil: ist sehr leicht rekonfigurierbar (verschiebbare Wände)



- Beispiel: Wii + Dome + MacBook Pro



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

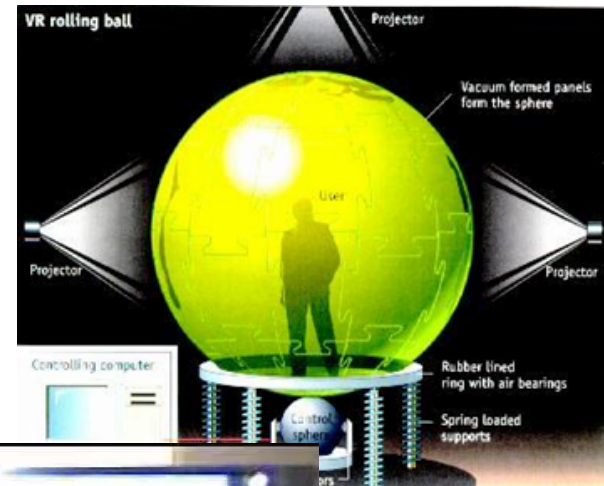
- One-man curved screens (fast schon Dome):



- Ein modernes "Sensorama":



Immersa-Dome von Aardvark Applications



Studie



www.virtusphere.com



■ Vorteile:

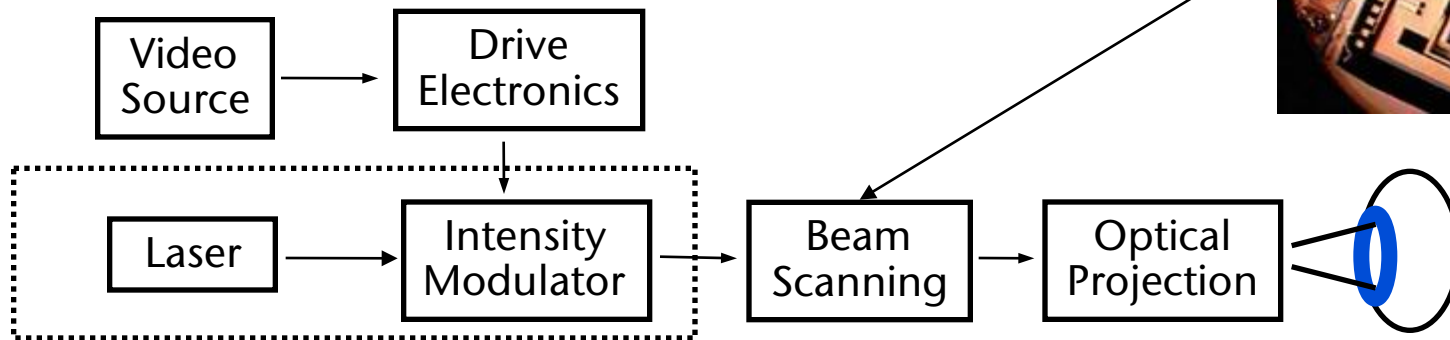
- Hohe Auflösung (z.Z. bis zu ca. 1600 x 1280 pro Kachel)
- Großer *field-of-view*
- "*Non-invasive*"
- Keine Isolation von der realen Welt
- (Mehrere User)
- *Cave*: Kopfdrehung bewirkt nur kleine Änderungen im Bild
→ Latenz-Problem reduziert / nicht so auffällig

■ Nachteile:

- Platz
- Preis (viele Projektoren, viele *Graphik-Karten*)
- Präzision, Justierung
- Möglicherweise "*stereoscopic violation*"
- Korrekte Ansicht nur für einen *Viewer* (erste Ansätze für korrekte Ansichten für 2-3 Viewer sind in Forschung)

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





Retinal display



Studie

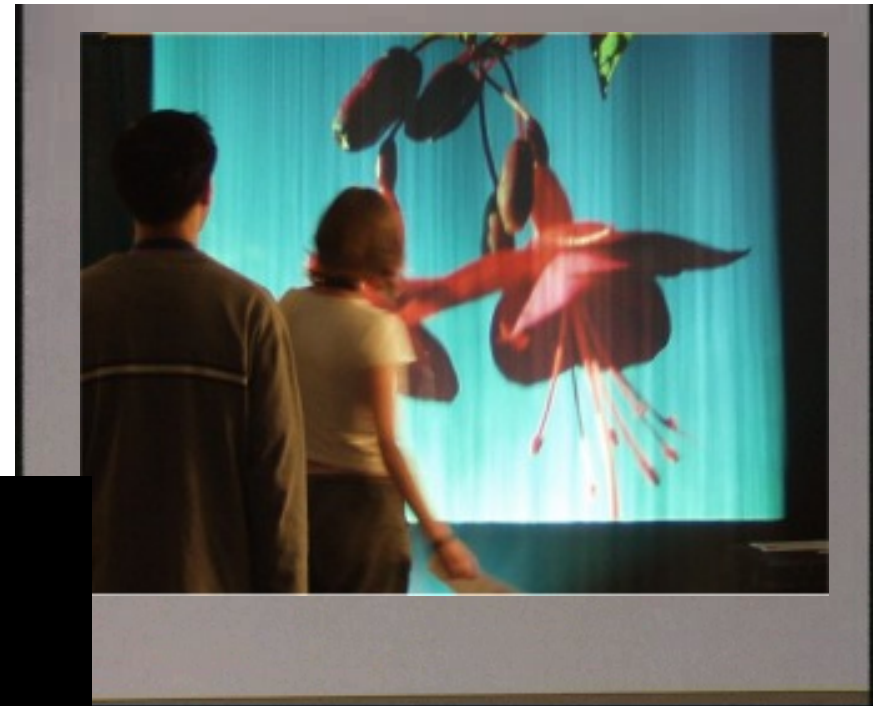
Holographische / volumetrische Displays

- 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 = $1000 \times 1000 \times 100$)
 - Verdeckung?

- Volumetrisches Display:
 - $198 \times 768 \times 768 \approx 100$ million voxels
 - Frame rate: 20 Hz



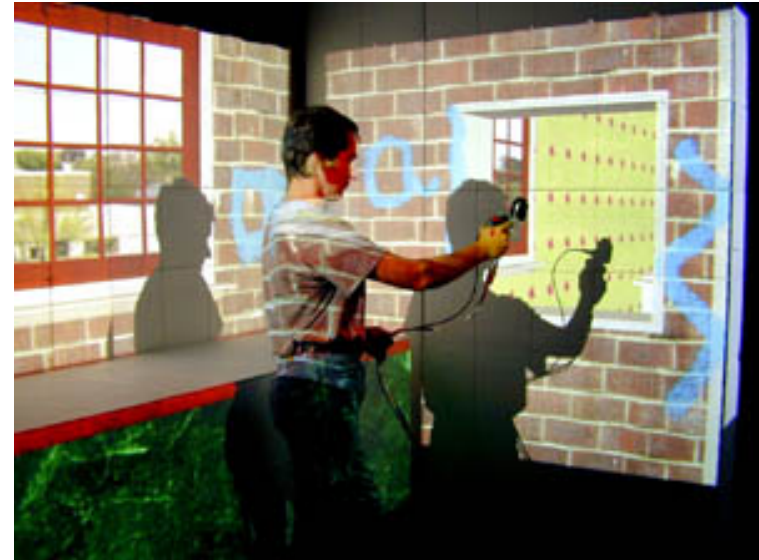
- Nebel ("fog screen")
 - Laminarer, nicht-turbulenter Luftstrom
 - Wassertröpfchen "sandwiched" im Luftstrom



FogScreen

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

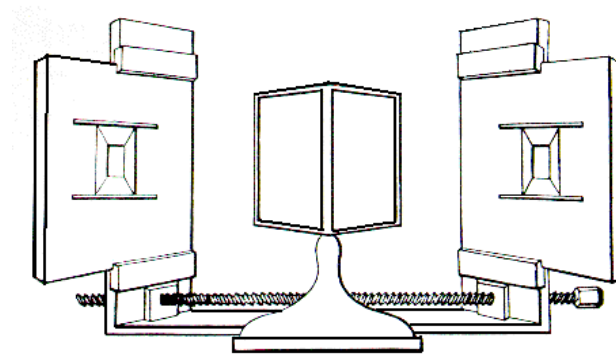
- "Everywhere displays":



Art	Vorteile	Nachteile
"Fishtank"	Preiswert, Akzeptanz, Auflösung,	Keine Immersion, <i>stereoscopic violation</i> , Bewegungsfreiraum, <i>field-of-view</i>
Head-mounted	Immersion, <i>field-of-view</i> , <i>no stereoscopic violation</i> , Bewegungsfreiraum	Auflösung, Gewicht, Verzerrung, Akzeptanz, Präsenz
Projection-based	Auflösung, <i>field-of-view</i> , Präsenz,	Teuer, Wartung, (<i>stereoscopic violation</i>)

Geschichte der Stereo-Bilder

- Euklid (4. Jh. v. Chr.)
- Sir Charles Wheatstone (1838)
- 1860: 1 Million Stereoskope verkauft
- 1950er:



- Heute (Demo):



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

- Benötigt irgend eine Art von *Multiplexing*

1. Zeitliches Multiplexing ("aktives Stereo"):

- Typischerweise 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

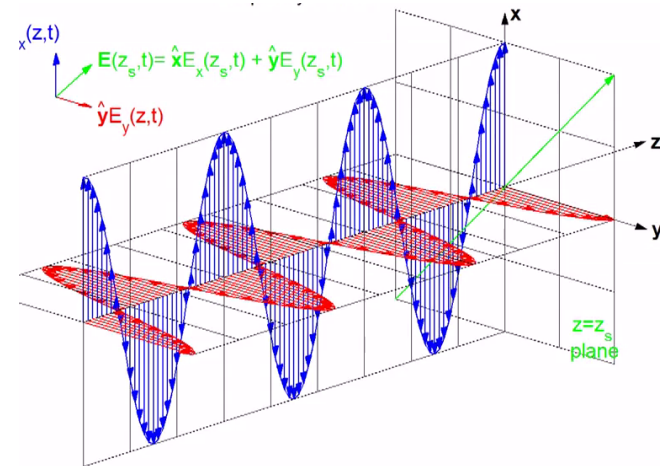


2. Multiplexing per Polarisation ("passives Stereo"):

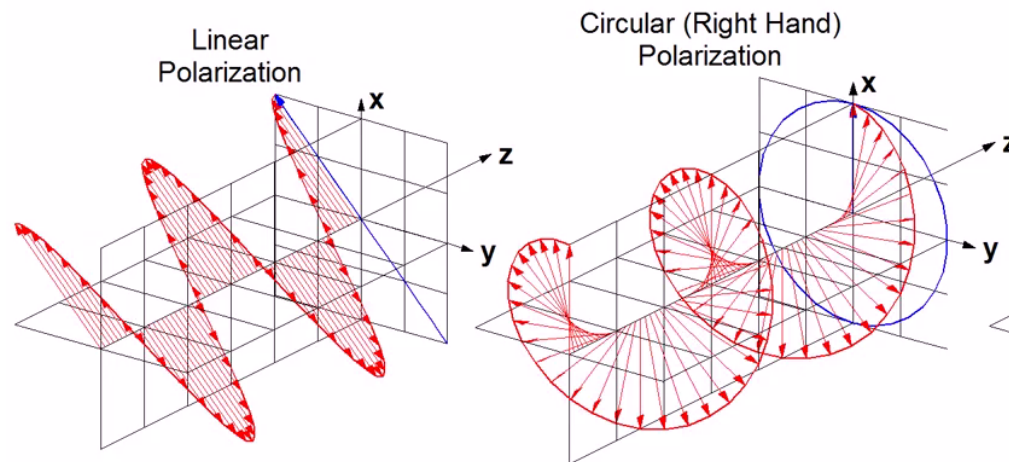
- 2 Projektoren auf dieselbe Fläche
- Gleichzeitig projizieren mit unterschiedlicher Polarisation des Lichtes
- Polarisationsbrille lässt richtiges Bild links/rechts durch

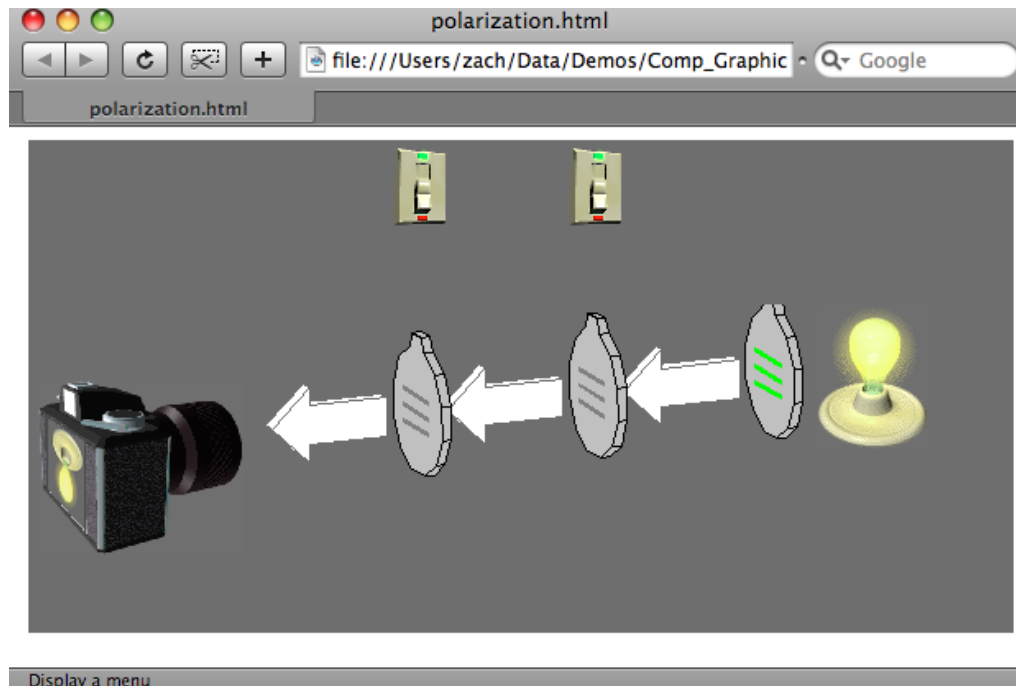


- Polarisationsarten:
 - Lineare Polarisation:



- Zirkuläre Polarisation (Circular polarization):
 - Left-handed / right-handed polarization

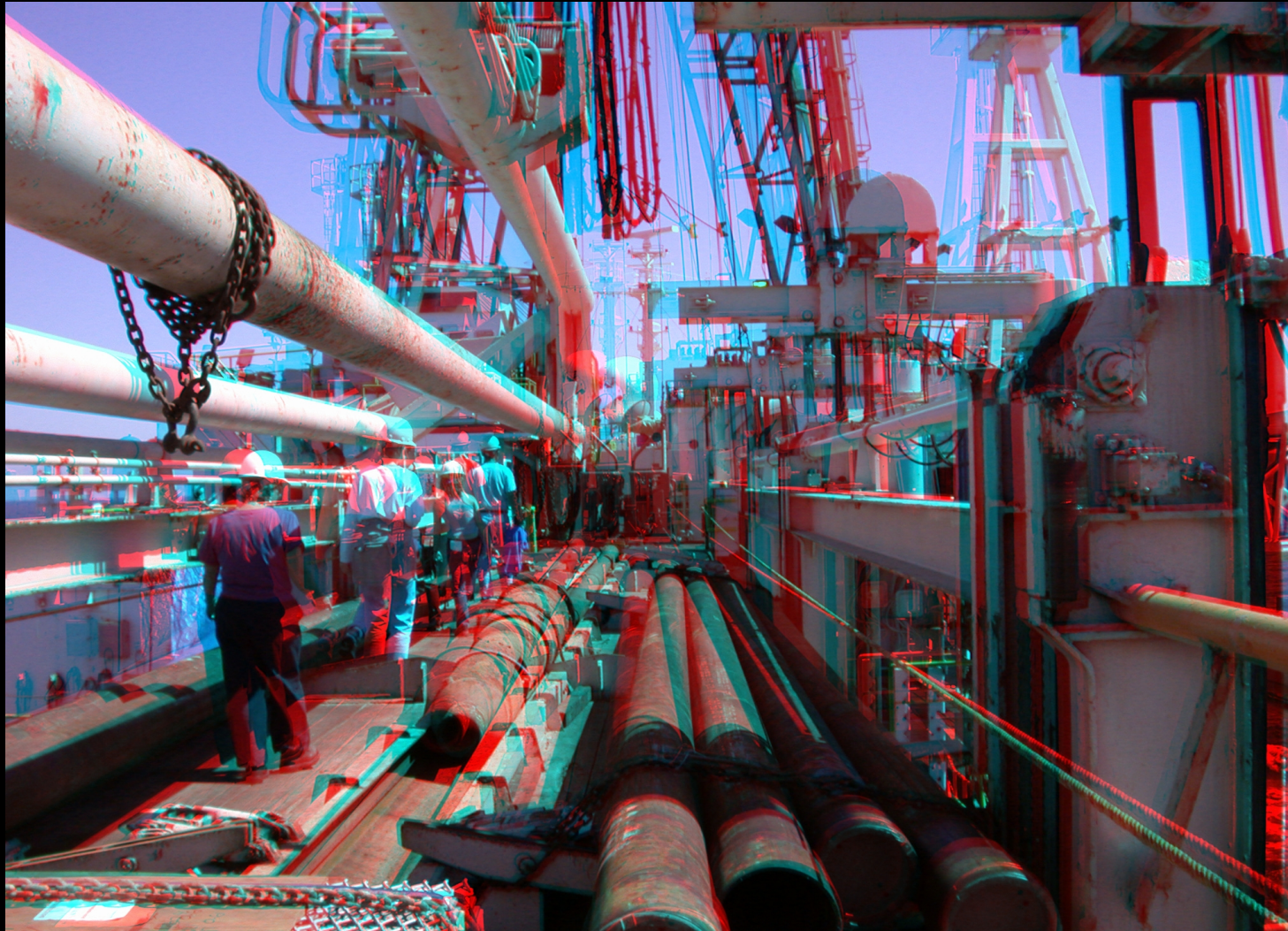




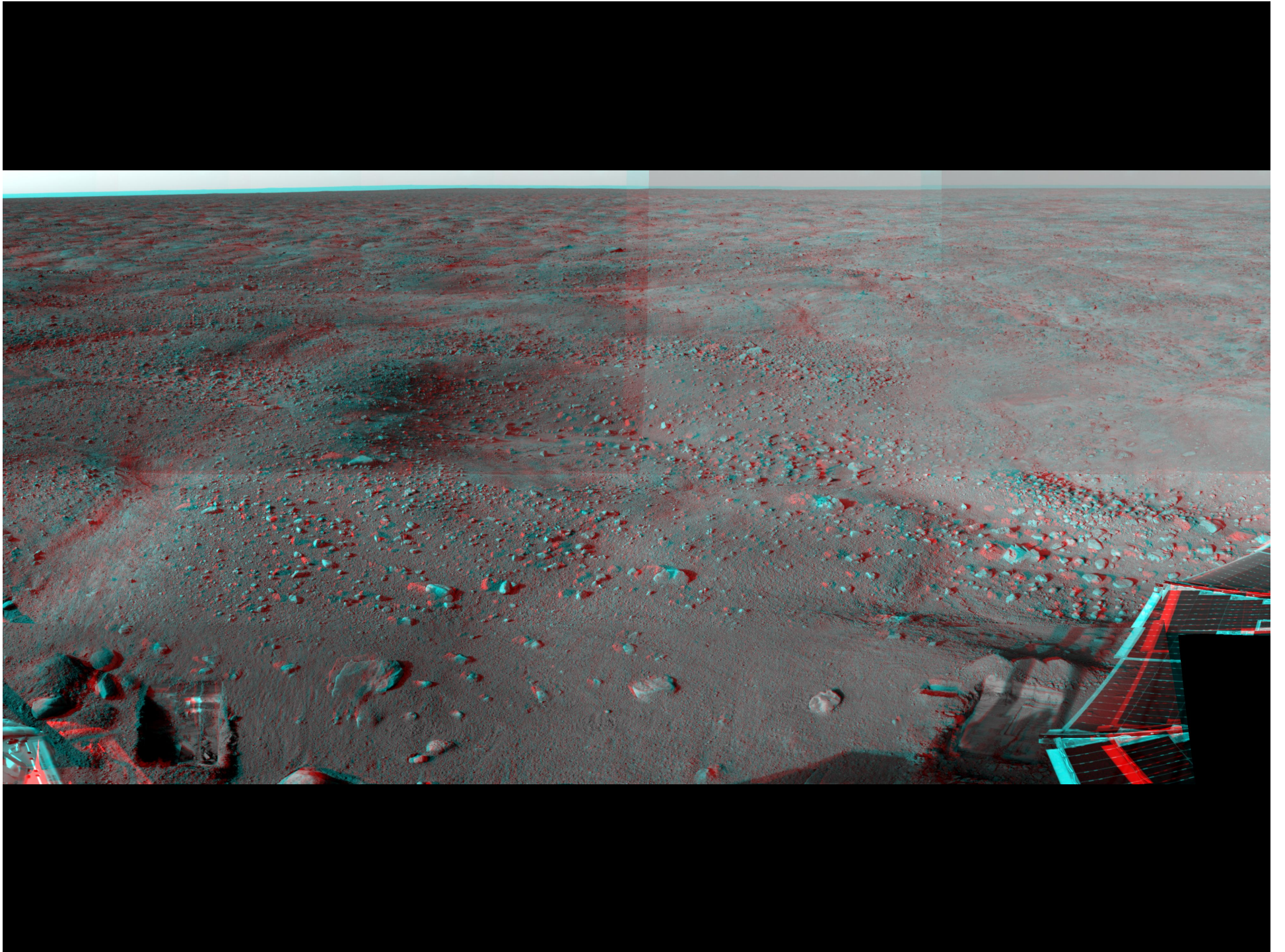
<http://www.colorado.edu/physics/2000/applets/polarization.html>

"Farb-Multiplexing"

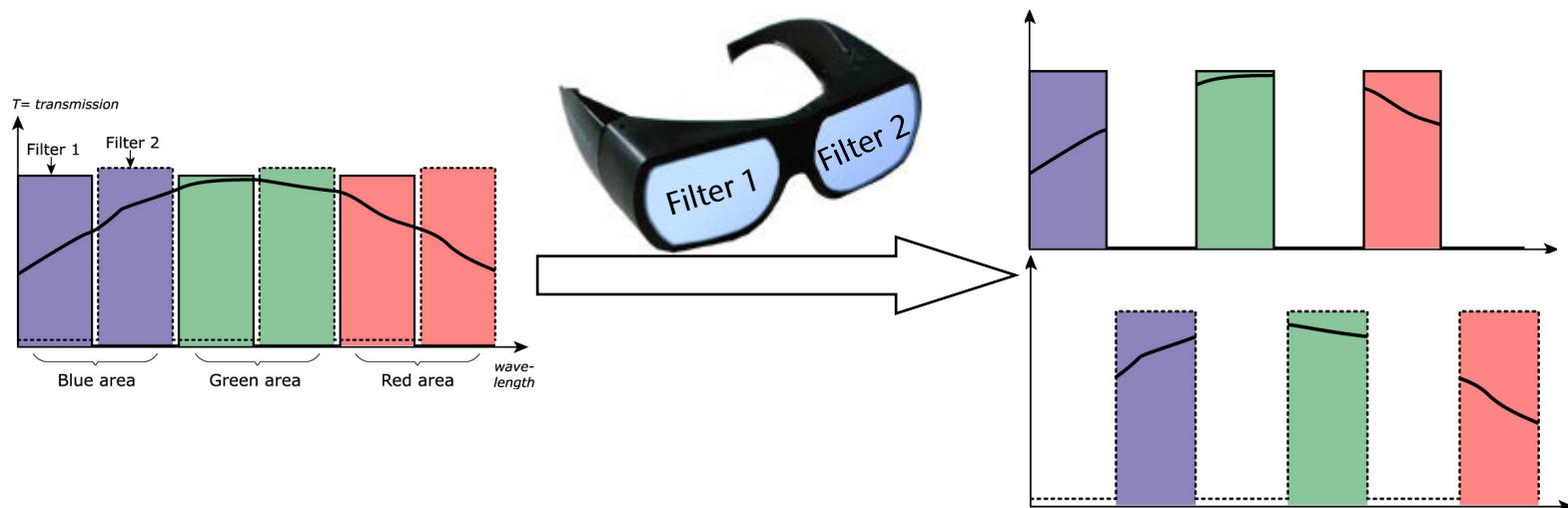
- Einfache Version: *Anaglyphes Stereo* (Rot-Grün-Stereo)







- Verallgemeinerung ("*Infitec*", Dolby3D, spectral comb filter, wavelength multiplex):
 - Jede Farbe durch einen engen Farbkanal (Bandpaß)
 - Jeder User bekommt Brille mit verschobenen Filtern



- Problem:
 - Farbtreue

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

Das Problem mehrerer User und einem IPD

- Problem mit einer single-tracked Projection (stereo oder mono): nur der Viewpoint des "getrackten" Users ist korrekt, nur er bekommt ein korrektes Bild!
- Beispiel:

Bild wird für den User korrekt dargestellt

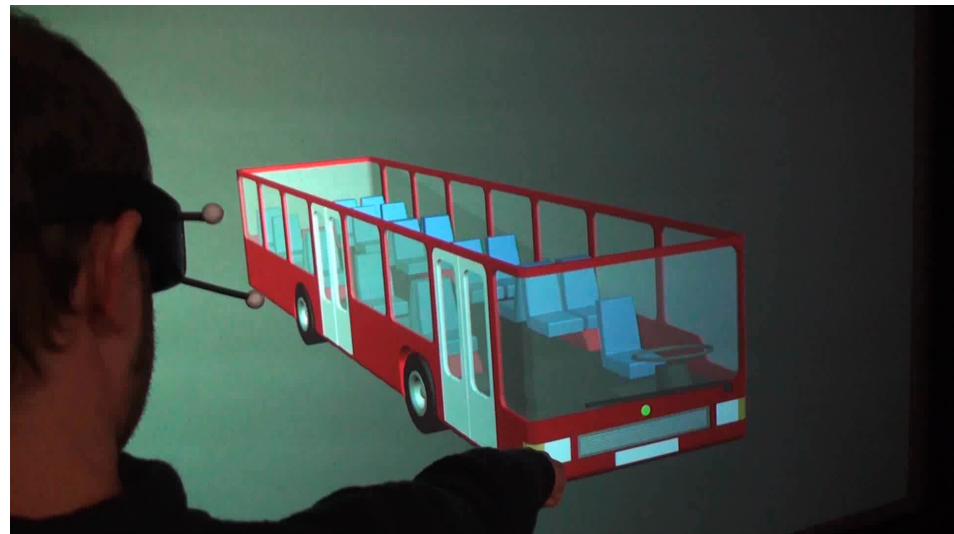
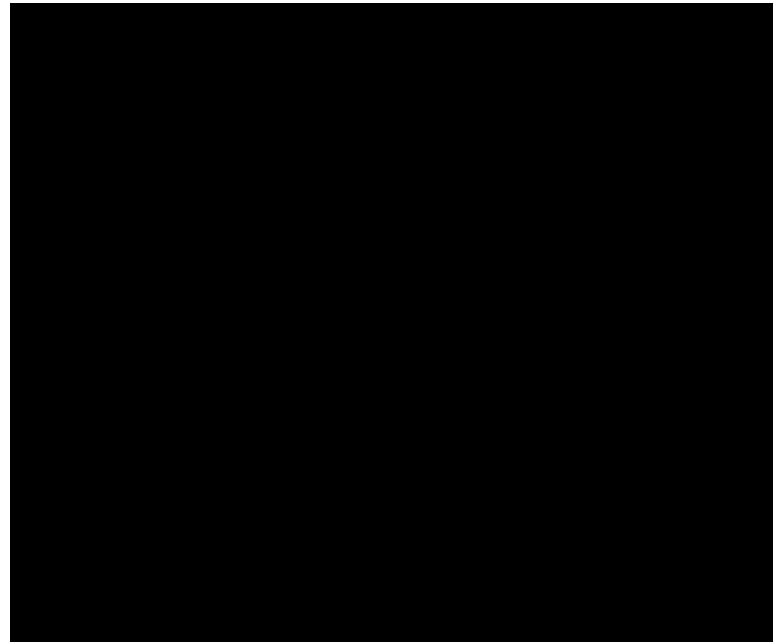
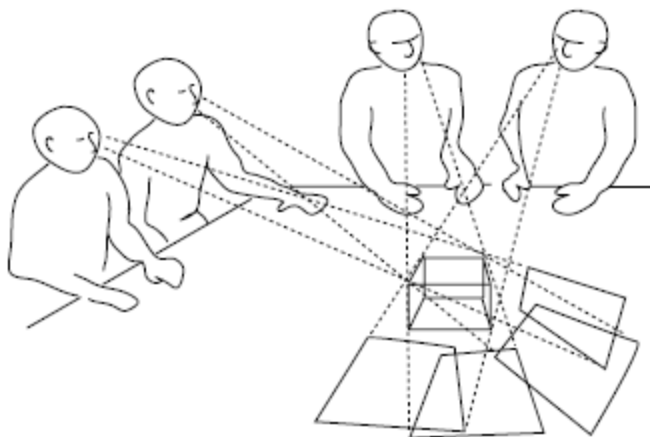
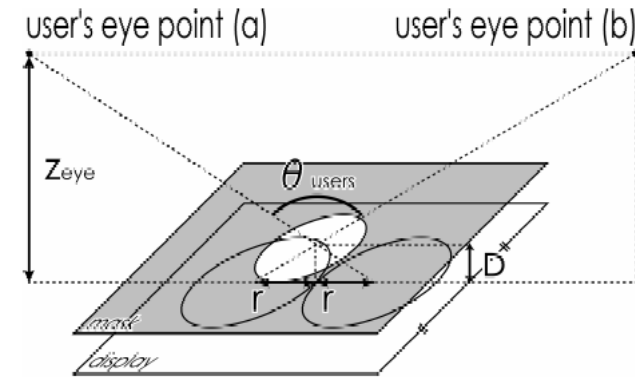


Bild wird für die (echte) Kamera korrekt dargestellt

Korrekte (Stereo-)Projektion für mehrere Benutzer

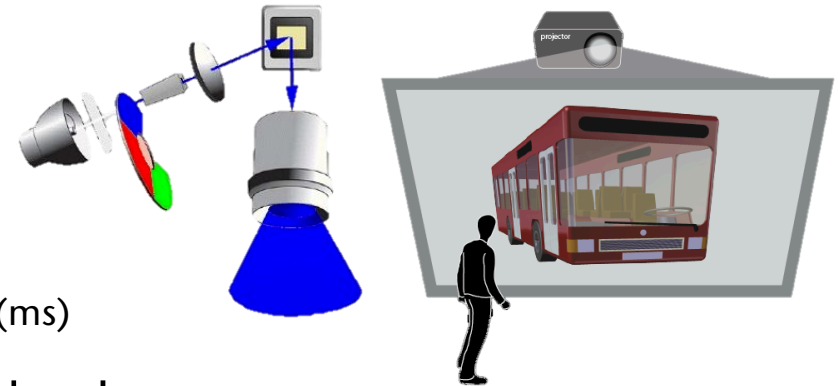
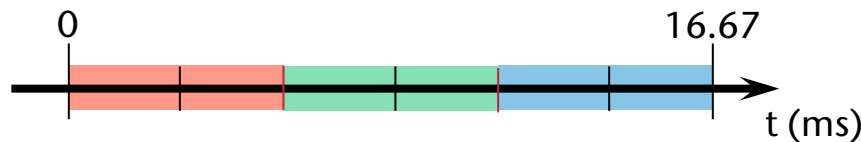
- Geht immer nur für eine rel. kleine Anzahl von Usern
- Zeit-multiplexed (*temporally multiplexed*):
 - Frame-Rate für multi-user stereo = Frame-Rate für Mono / $2 \cdot \#User$
- Infitec für mehrere User:
 - Jeder User bekommt Brille mit verschobenen Filtern
 - Bei n Usern braucht man also $2n$ verschiedene Filter
- *Spatially multiplexed*
- Kombination davon

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

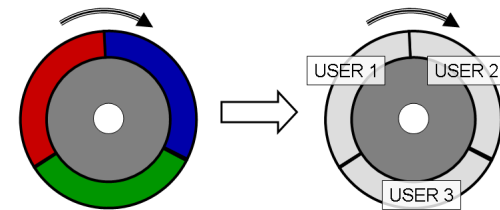


IllusionHole @ Siggraph 2001

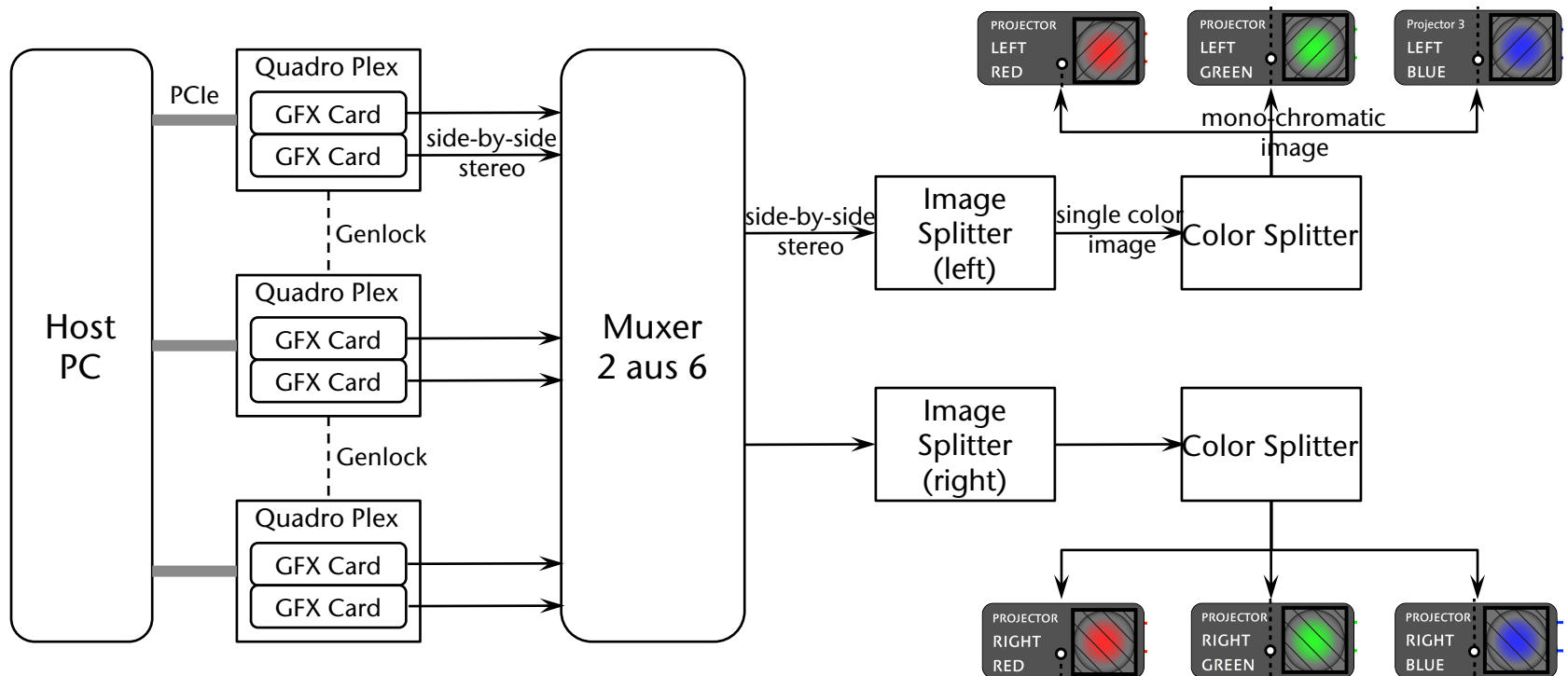
- Kombination aus aktivem und passivem Stereo, plus geschickter Ausnutzung von time-sequential Stereo
- Zur Erinnerung (aus CG1): Time-Sequential RGB with DLPs



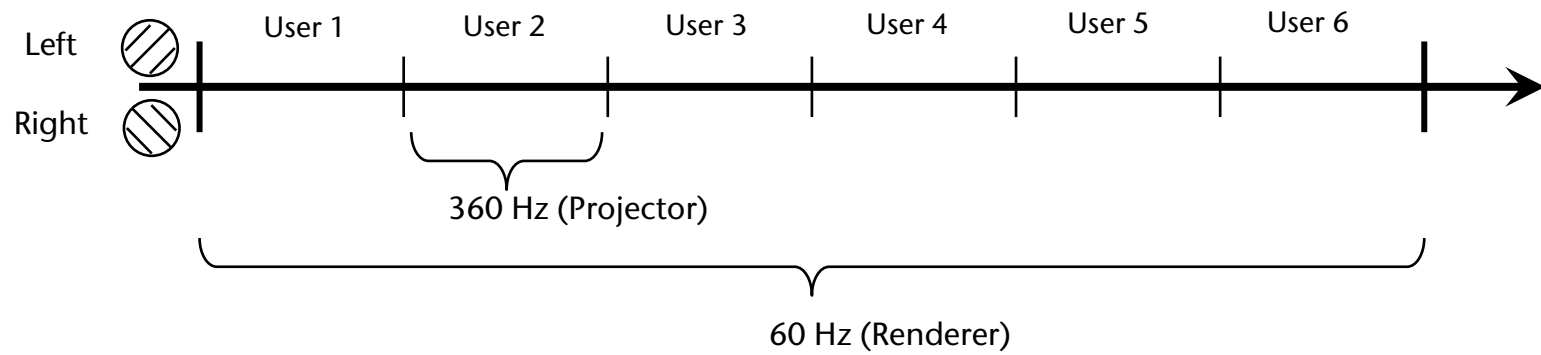
1. Modifikation: ersetze das Farbrad durch einen monochromatischen Filter (rot, oder grün, oder blau)
2. Modifikation: statt User mit Shutter-Glasses aus, die *zusätzlich* links & rechts einen Polfilter haben
 - Müssen schnell genug sein, damit kein Cross-Talk entsteht!



- Erzeugung von 6 Stereo-Video-Streams mittels 6 Graphikkarten in 1 PC
- Verteilung an die Projektoren durch Multiplexer & Splitter



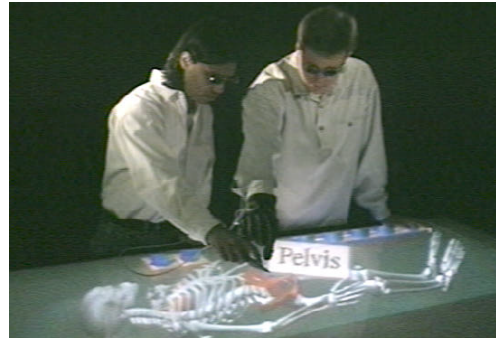
■ Timing:



■ Video:



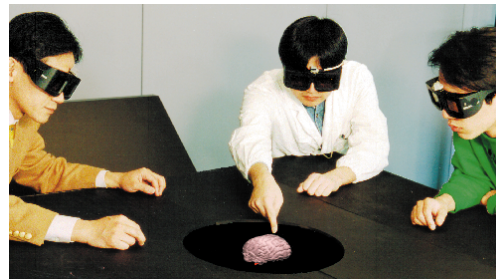
- Durch korrekte Darstellung der VE für *jeden* User entsteht für alle ein **kohärenter** 3D-Raum
- Konsequenz: direkte Kommunikation (mit Zeigen) in **co-located CSCW** ist möglich



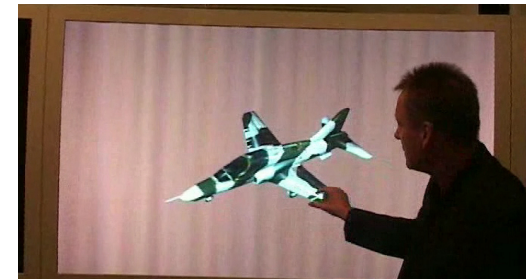
Agrawala et al. 1997



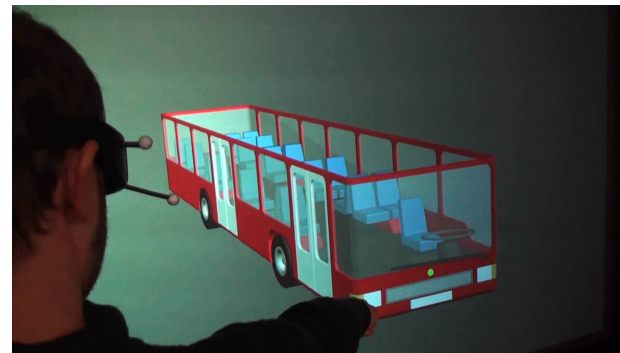
Arthur et al. 1998



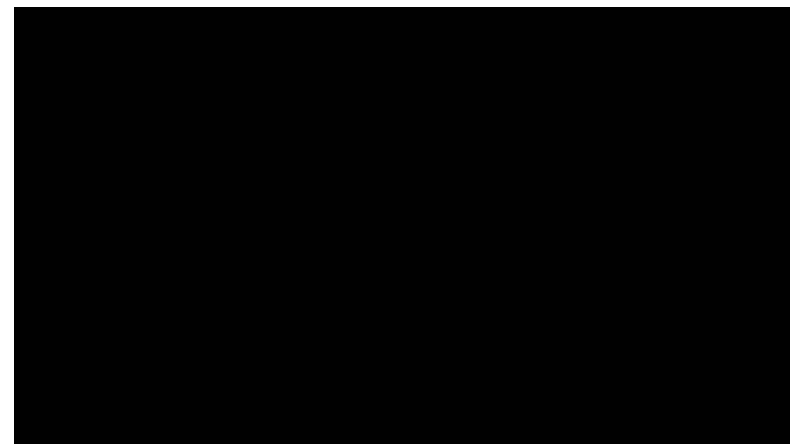
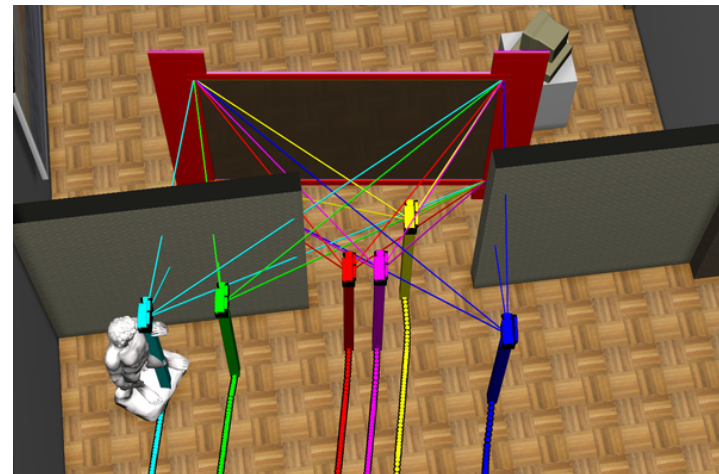
Kitamura et al. 2001



Agócs et al. 2006



- Navigation: der "Steuermann" gibt den Pfad vor (und kennt dabei nur seinen eigenen Viewpoint)
- Problem: die anderen fliegen evtl. durch Wände
- Lösung:
 - Pfade der "anderen" Viewpoints automatisch näher an den Viewpoint des Steuermanns bewegen
 - Hindernisse ausblenden beim Durchfliegen





Stereoskopischer Effekt basierend auf dem Pulfrich-Effekt



- Siehe Folie "Pulfrich Effekt" in *Optische Täuschungen*

Der Pulfrich-Effekt

- 1922 entdeckt von Carl Pulfrich, deutscher Physiker
- Basis: dunkle Lichtreize lösen etwas später ein Signal aus als helle
- Beispiel: Video mit einer Sonnenbrille über einem Auge betrachten



A Demonstration of The Pulfrich Effect

photography by Todd E. Gaul
www.photophile.com

http://www.youtube.com/watch?v=1mnWl_u_zBg

Auto-Stereo-Displays

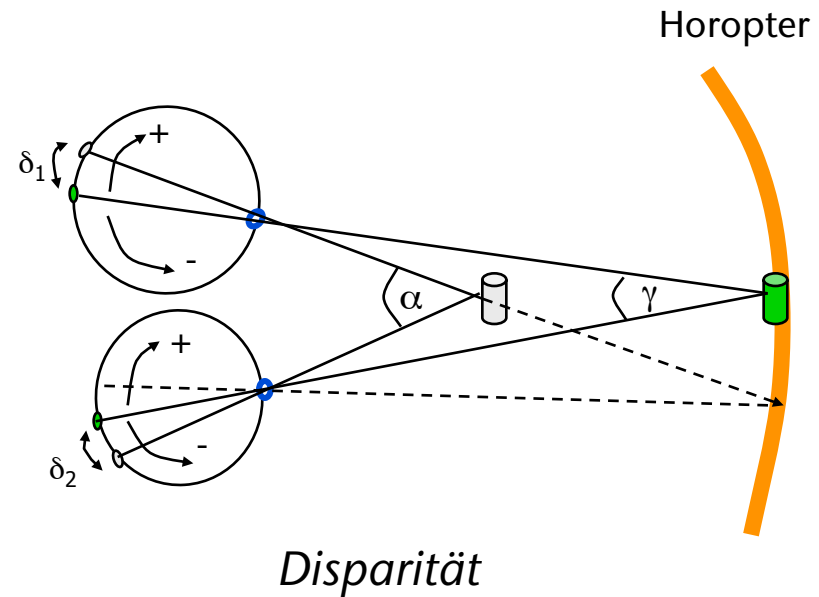
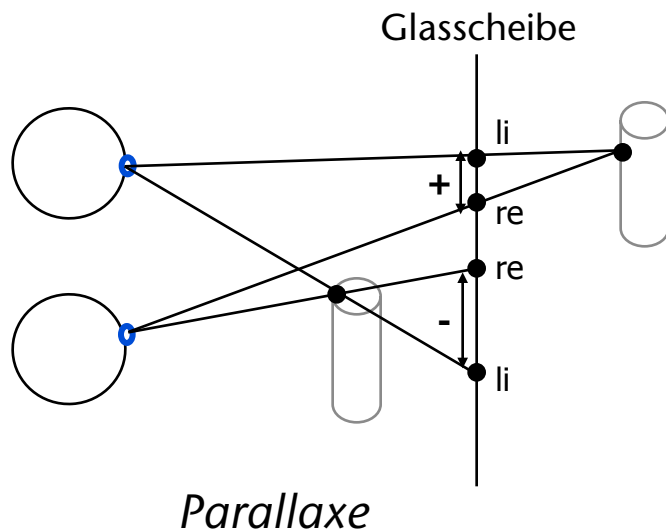
- Monitore

Light-Field Displays (hier: RePro3D)

- <http://tachilab.org/modules/projects/repro3d.html>

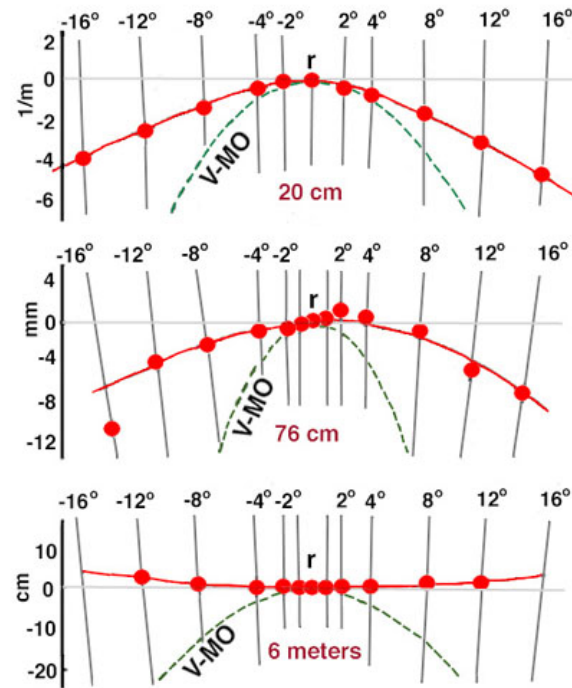
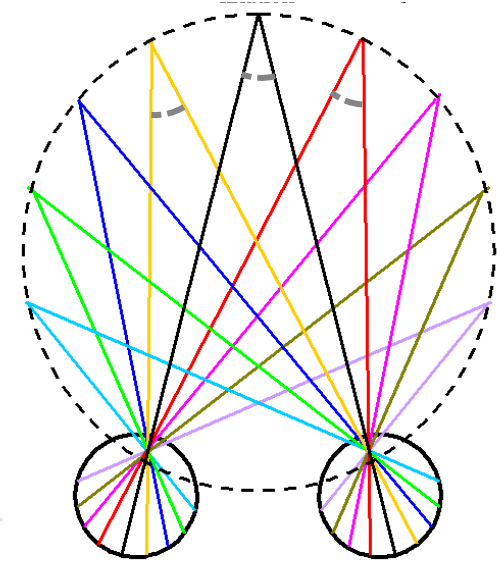
Stereo-Sehen (*Binocular / Stereo Vision*)

- 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:



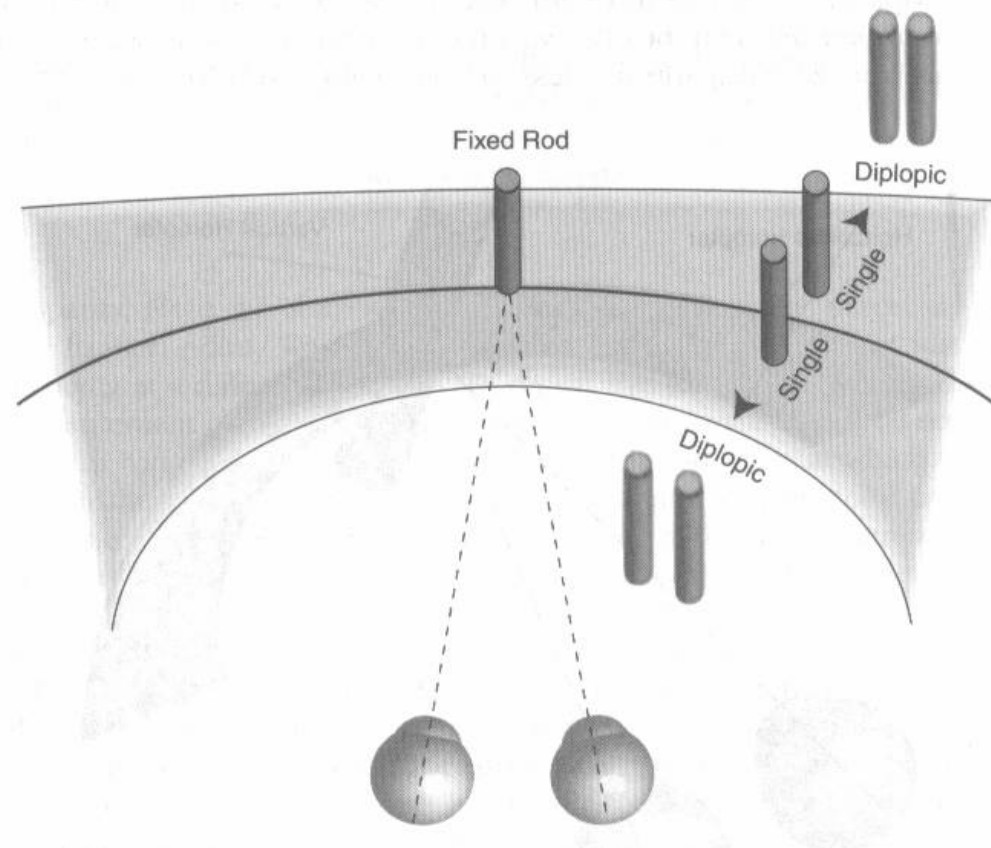
Measuring the Horopter

- First: not measuring it, but constructing it
 → Vieth-Müller Circle
 = theoretical locus of points in space that stimulate corresponding retinal points
- Horopter-Messung mit der sog. "Apparent Fronto-Parallel Plane"-Methode:
 - Subject is asked to arrange a series of objects so that there appears to be no depth difference between them

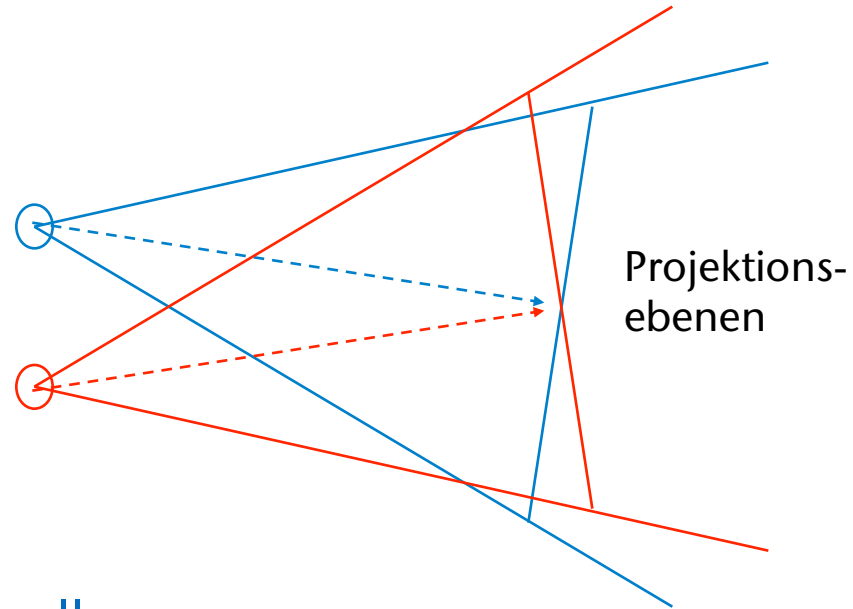


Panum's Fusional Area

- Es gibt einen Tiefen-Bereich um den Horopter herum, wo das Gehirn trotz Doppelbilder eine Fusion erzeugt → **Panum's Area of Fusion**

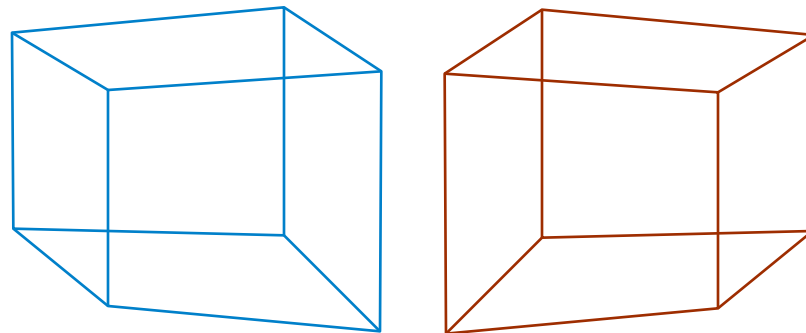


- Falsch: konvergierende Hauptsehstrahlen

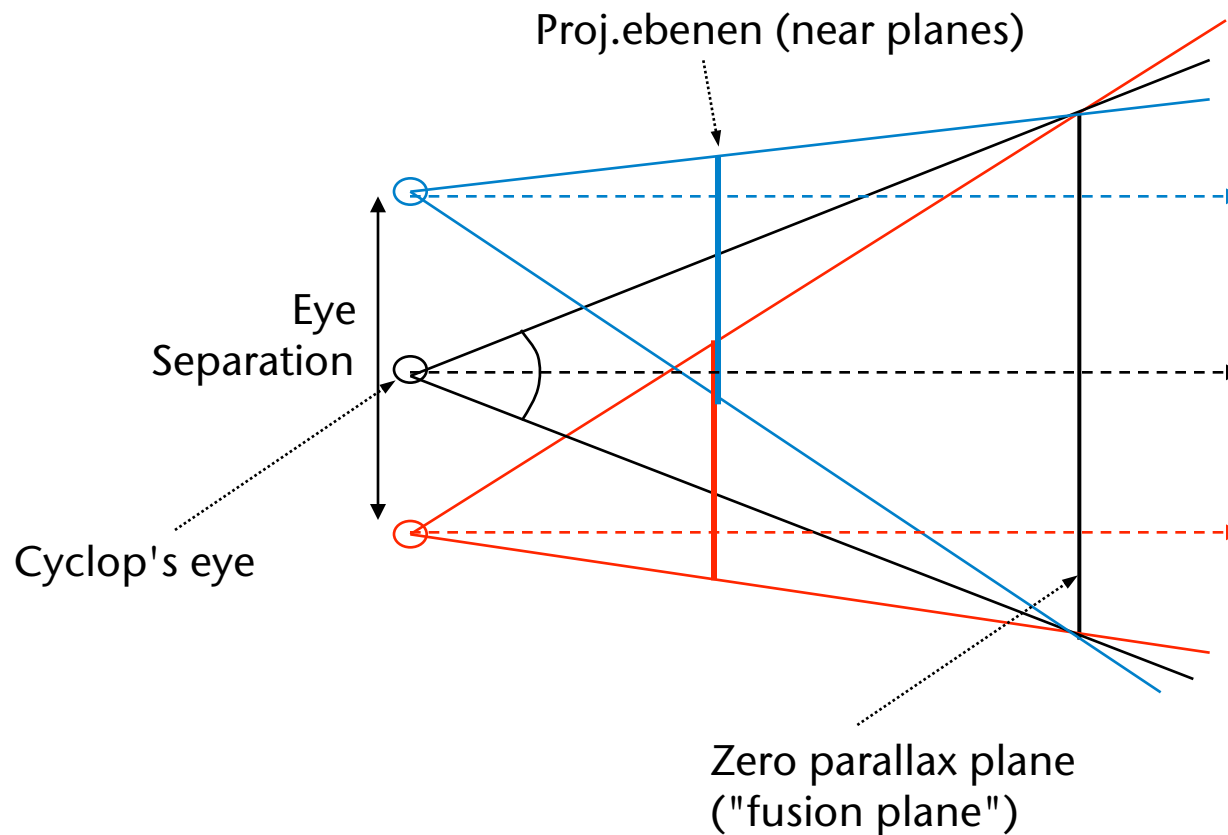


- Problem: vertikale Parallaxe

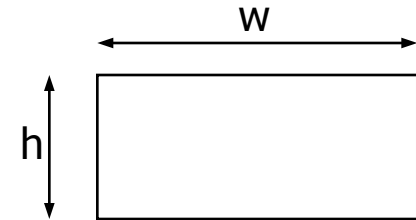
Heads-up text
Heads-up text



- Richtig: parallele Hauptsehstrahlen
→ *off-axis perspective projection*



- 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.,
Zyklopen-Auge befindet sich über der Mitte der Zero-Parallax-Plane



- *top* und *bottom* wie gehabt:

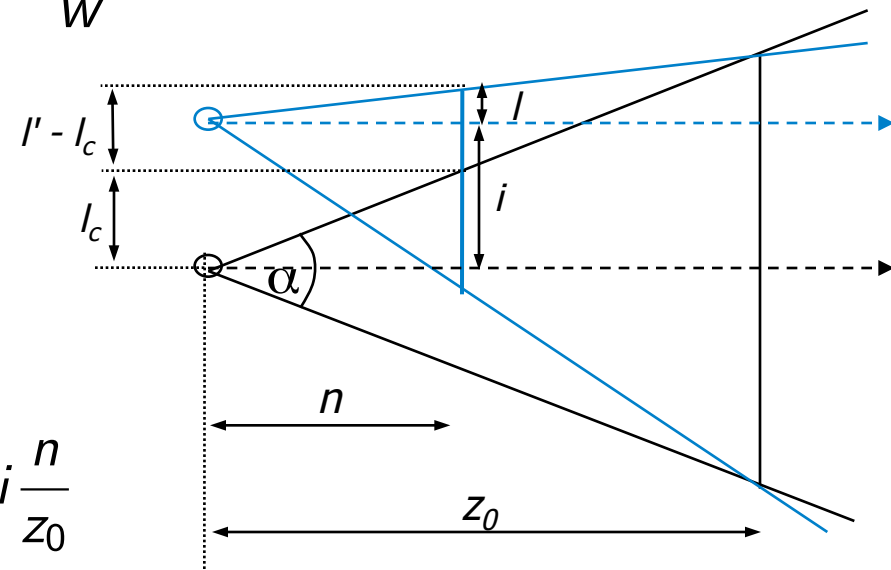
$$t = \frac{h}{w} l$$

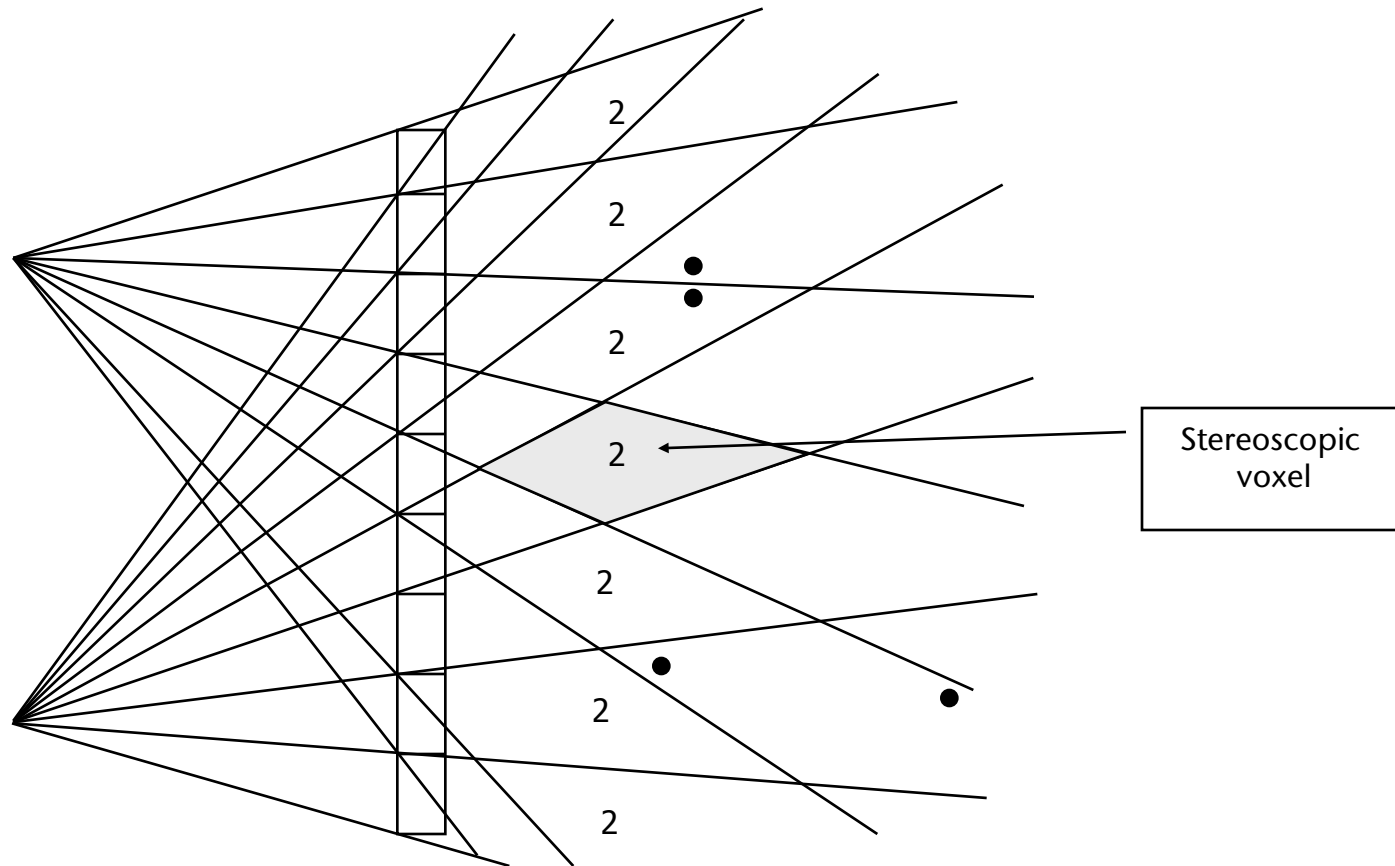
- *left* am Beispiel linkes Auge:

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

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

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

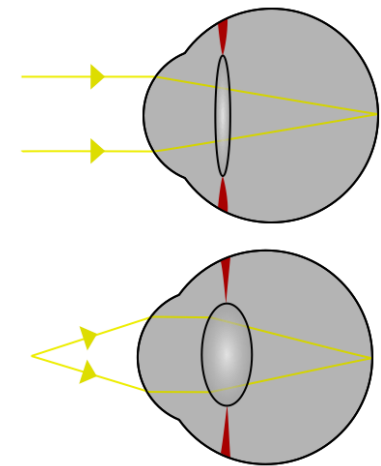
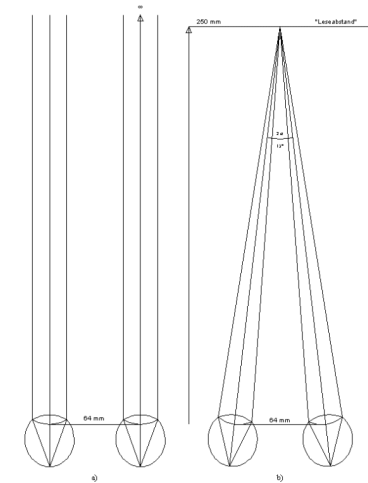




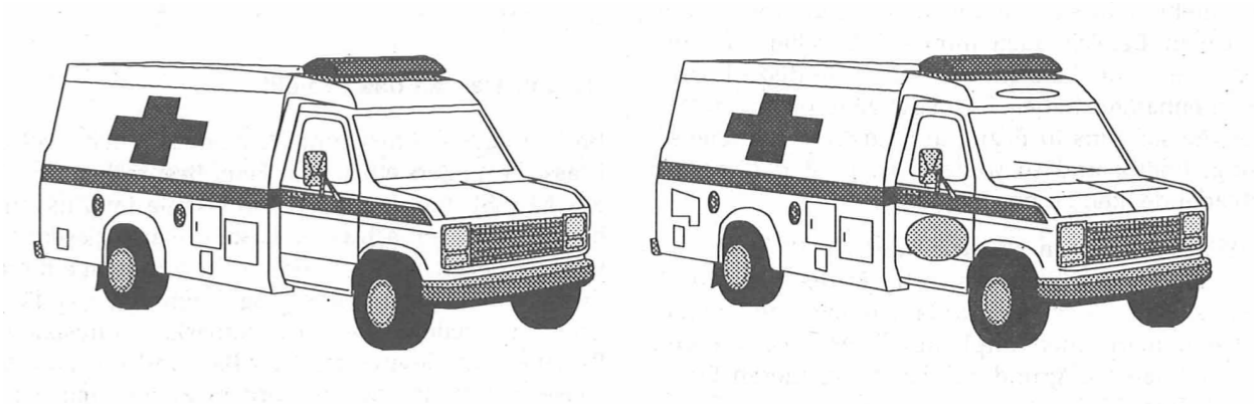
- Selbst wenn z-Buffer kontinuierlich wäre, gäbe es diesen Effekt!

Exkurs: Akkomodation und Konvergenz

- Zwei wichtige Begriffe, die leicht verwechselt werden
- **Konvergenz** = gegensinnige Augenbewegung (um die Hochachse), so daß die Mittelachsen der Augen (**Hauptsehachsen**) 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)



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



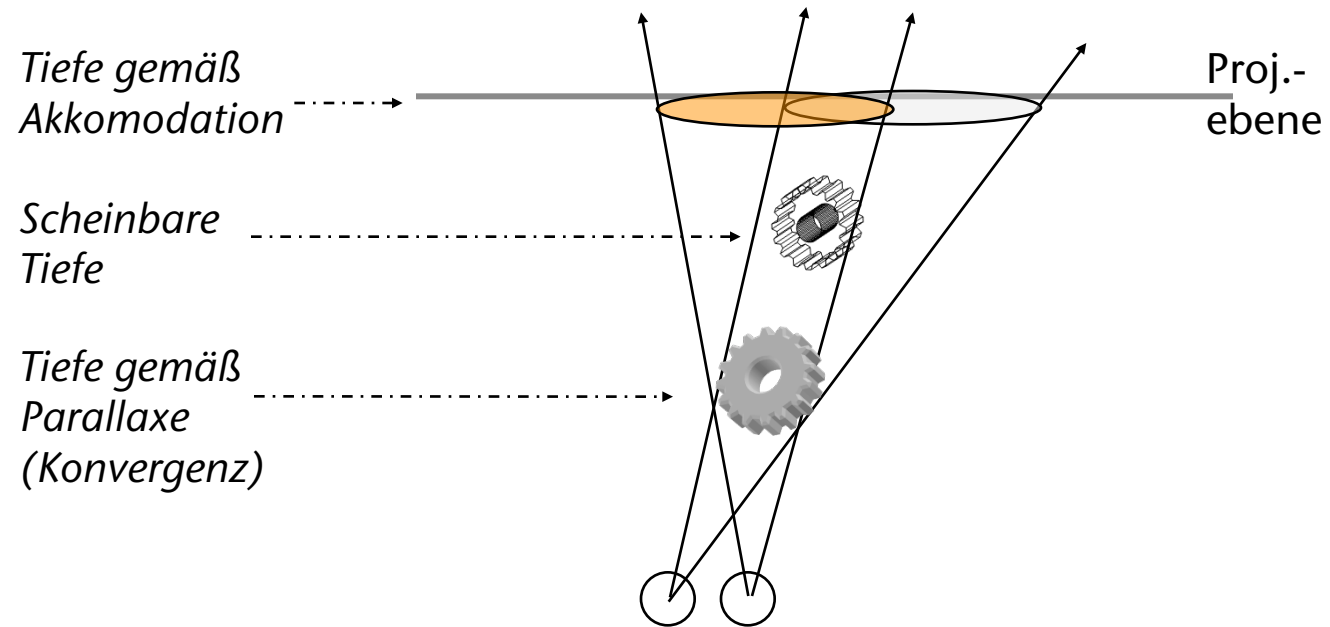
- "Magic Eye"-Bilder sind eine "Verklausulierung" dieses Effektes (werden speziell konstruiert):



"Tiefenbild" dazu

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

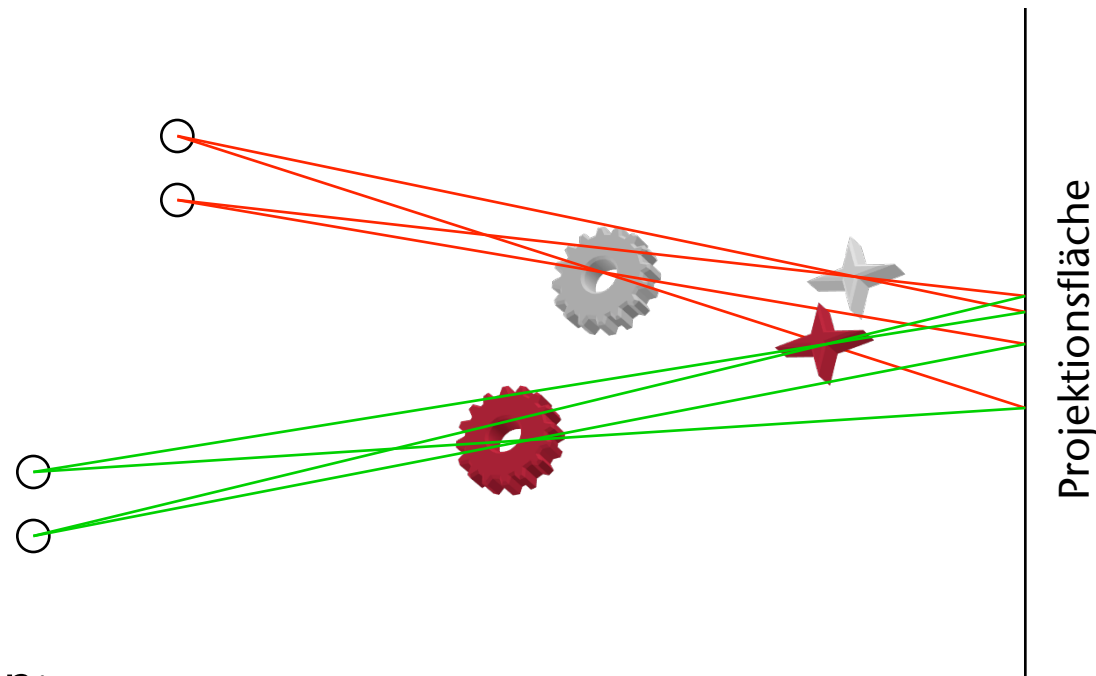
- Effekt: in der Cave an der Powerwall erscheinen nahe Objekte zu weit entfernt
- Meine Hypothese:



- Lösung: holographisches oder volumetrisches Display

Stereo is a "one man show"

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



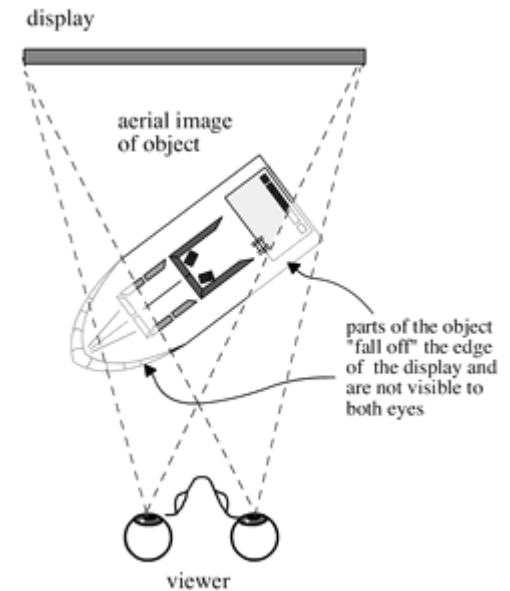
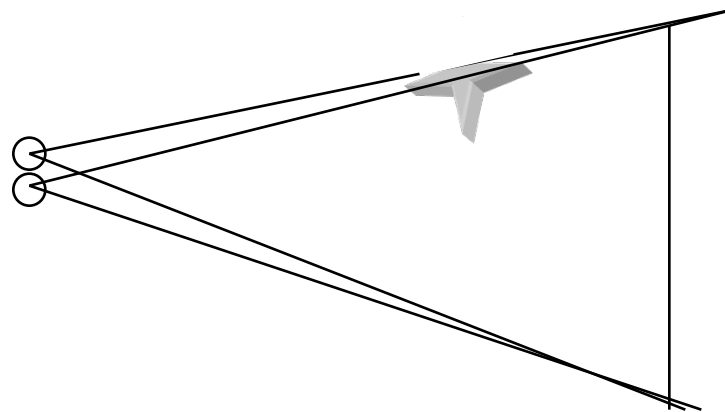
- Lösungen:
 - Für 2 Betrachter: 4 Bilder rendern
 - Holographische/Volumetrische Displays

- 2 Effekte (treten immer zusammen auf):

- *Clipping*

- Widersprechende *depth cues*:

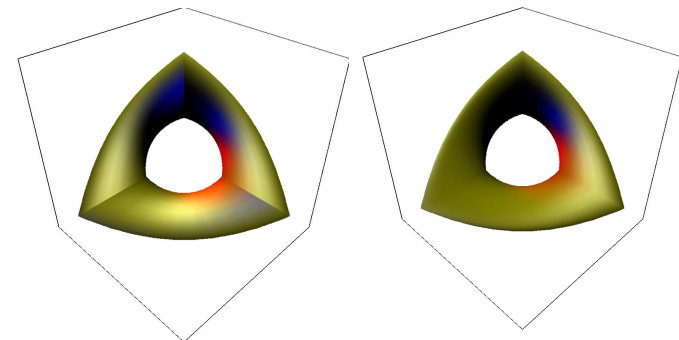
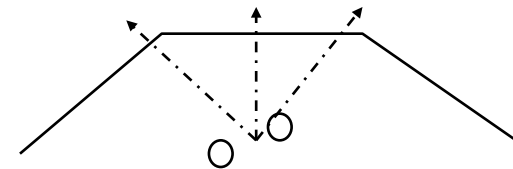
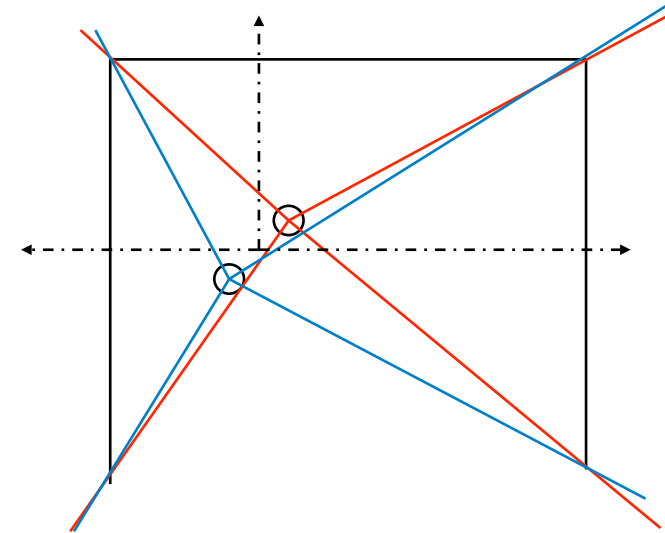
Obj wird geclippt, obwohl vor dem Rand des Windows



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

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



Das Kopfmodell

M_e = Viewpoint-Trafo

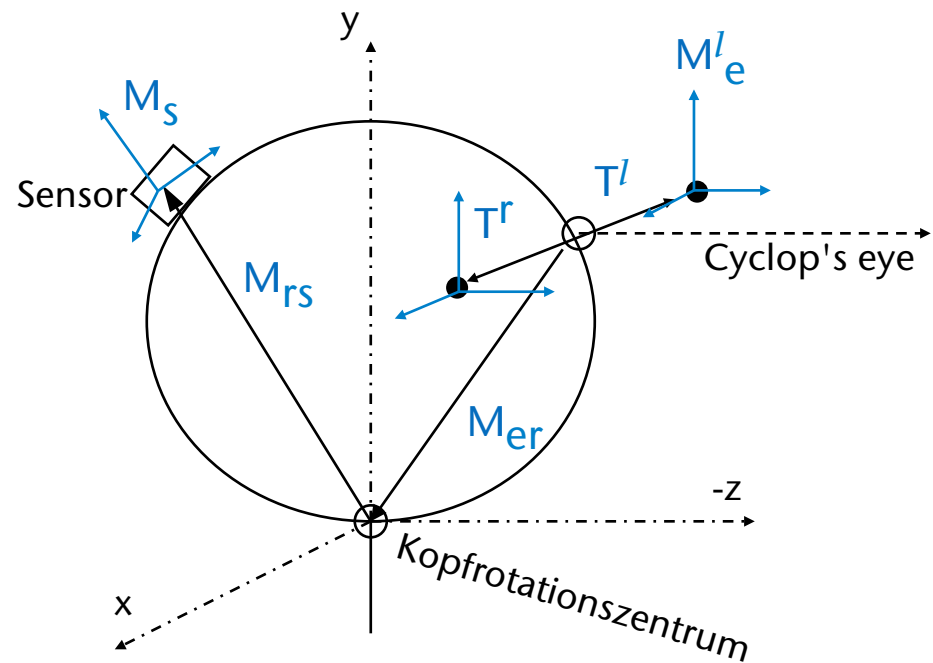
M_s = aktuelle Sensormessung, rel. zu Kalibrierung

M_{rs} = Trafo vom Kopffrotationszentrum zum Sensor

M_{er} = Trafo vom "Zyklopaugenauge" zum Kopffrotationszentrum

$T^l | T^r$ = Translation zum linken|rechten Auge

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



- Problem: "*infinite viewer*"

bei spekularem Anteil

$$specular : (s \cdot n)^{shiny}, s = \overline{VL} + (0, 0, 1)$$

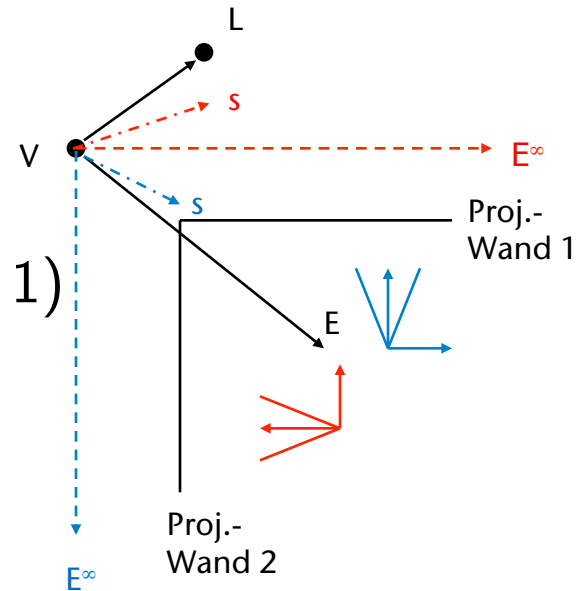
- Lösung:

1. "*Local viewer*" setzen, damit ist

$$s = \overline{VL} + \overline{VE}$$

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

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



- **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**

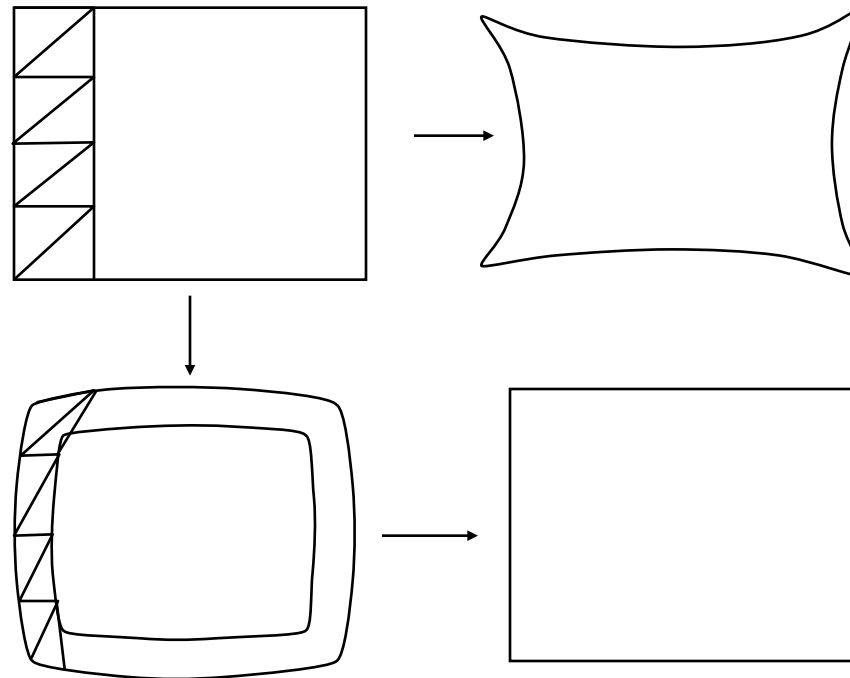
- **Oder: Panorama-Mode (2 Viewports in einem großen Window)**

Guidelines für Stereo-Rendering

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

Entzerrung des Displays

- Optik verzerrt manchmal
- Idee: Vorverzerrung mit Textur

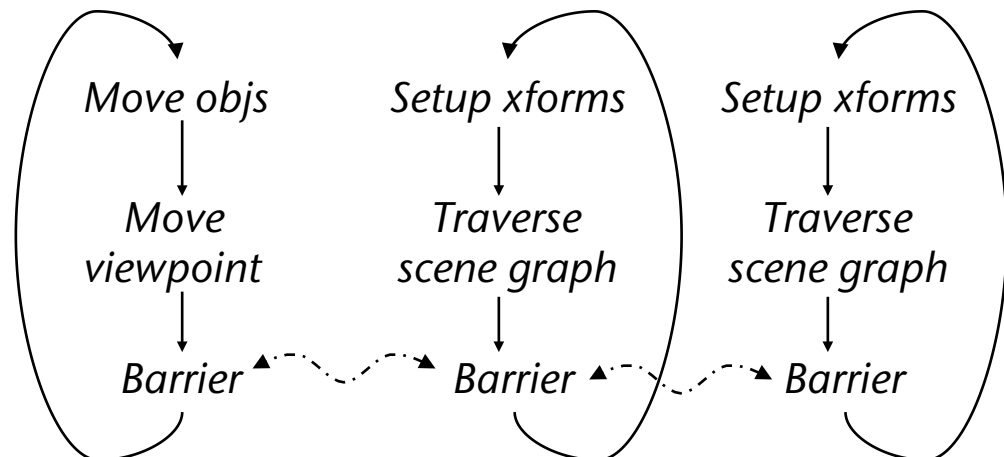
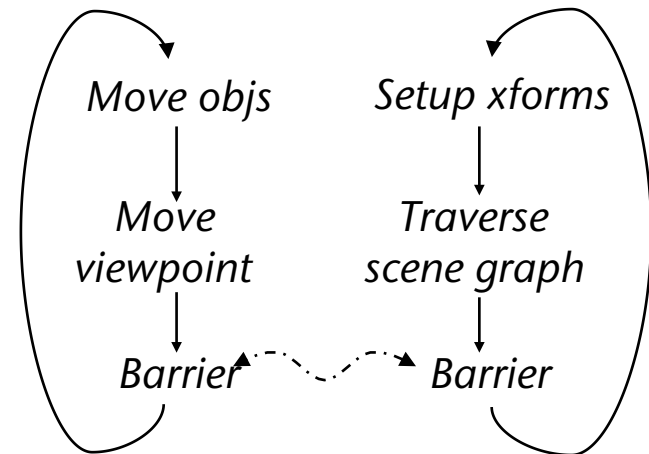


Offene Fragen

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

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



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!

- 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