

# Virtual Reality

Sommer 2012

## 3 VR-Hardware

Versionsdatum: 16. April 2012



## 3 VR-Hardware ...



**Grundlegend** besteht ein VR-System aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten

**Kategorisierung** mittels Informations- und Kontrollflusses Benutzer-Maschine:

**Input-Devices:** Wesentliche Funktionalitäten:

- Ermittlung der Beobachterposition und -orientierung (bzgl. Output-Device)
- Navigation und Objektmanipulation (z.B. Greifen, Einfügen, Bewegen)

Zentrale Fragestellungen:

- ausreichende Genauigkeit
- Samplingrate, d.h. wie oft wird das Datum ermittelt
- Aktionsbereich
- Justierung und Kalibrierung

**Output-Devices:** Wesentliche Funktionalitäten:

- Visuelle und akustische Darstellung der virtuellen Welt
- Feedback: Taktile (Berührung), Kraft, vestibulär (Beschleunigung, Körperlage, etc.)



**Grundsätzlich** kann jeder Monitor als Anzeigegeräte dienen, *aber* Immersion erfordert:

1. größtmögliche Ausnutzung des Sichtfeldes
2. Ausnutzung der Stereo-Fähigkeit der visuellen Wahrnehmung

**Immersions-Stufen** aus Sicht der visuellen Wahrnehmung

**Voll-immersiv:** Vollständige Sichtfeldnutzung, Stereo, voll räumliche Synchronisation

**Schwach-immersiv:** Einfach 3D-Darstellung auf Monitor

**Teil-immersiv:** Etwas zwischendrin

**Stereo:** Erzeugung von einem Bildkanal für jedes Auge

- ein Projektor: 60 Hz *pro Auge* notwendig, d.h. mit 120 Hz Gesamtfrequenz
- Alternative: Zwei Projektoren, einer pro Auge
- Hauptproblem: Trennung der Bildkanäle bei gemeinsamer Projektionsfläche (später)



### 3.1.1 Projektions-Techniken



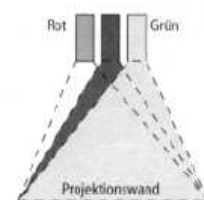
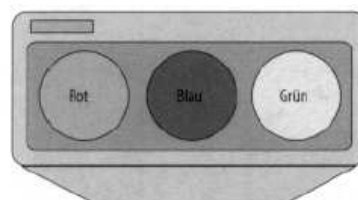
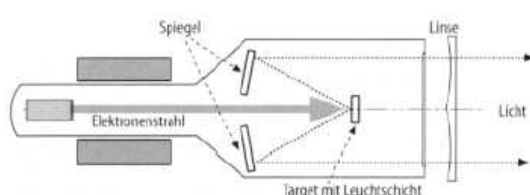
#### Kathodenstrahl Röhre (CRT)

**Leuchtschicht:** Darstellung des Bildes

**Farben:** Drei Röhren (RGB), die auf Projektionsebene Farben überlagern

**Bewertung:** + keine Pixelstrukturen, weiches Bild

- + hohe Bildwiederholfrequenz ( $\geq 120\text{Hz}$ )
- Justierung der Röhren aufwendig und häufig
- relativ lichtschwach



### 3.1.1 Projektions-Techniken ...



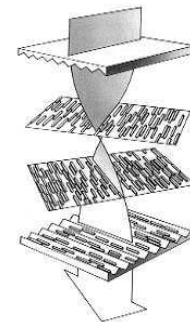
#### Liquid Crystal Display (LCD)

**Flüssigkristalle** vereinen Eigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten (hier: Leitung elektr.-magn. Strahlung/Licht).

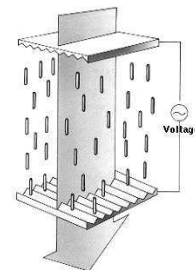
**Polarisatoren:** Lassen Licht nur in eingeschränkter Schwingungsrichtung passieren

**Aufbau:** ○ Zwei um 90° Grad verdrehte Polarisationsfilter

- Ebenen (*Sandwich-Technik*) mit Flüssigkristallen in Helix-Anordnung
- Helix lenkt das Licht zwischen Polarisationsfilter um
- Helligkeitssteuerung:
  - Ruhezustand: max. Lichtdurchlass
  - Spannung anlegen: Ausrichten der Kristalle  $\Rightarrow$  Lichtsperre



Ruhelage der Kristallebenen



Spannung angelegt



### 3.1.1 Projektions-Techniken ...



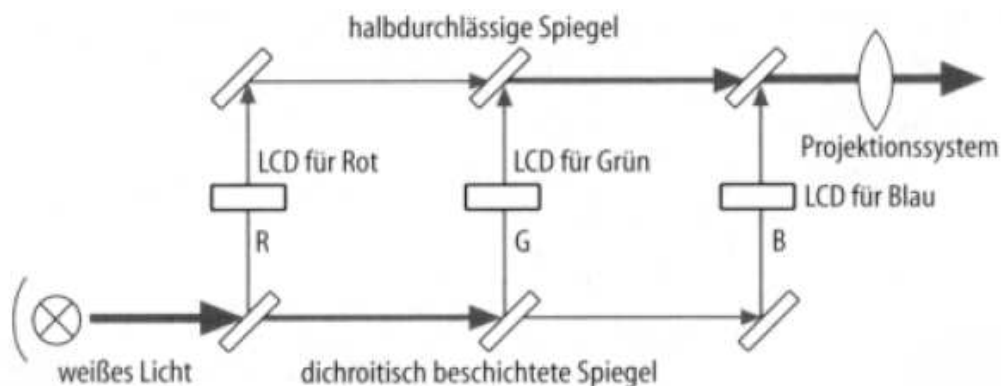
#### LCD Farbprojektoren

**Aufsplitten** des Lichtes dichroitisch beschichtete, frequenzselektive Spiegel

**LCD** für jedes Farbprimativ

**Transmittiertes Licht** wird über Linsensystem auf die Projektionswand projiziert

**Lichtabsorption** von über 60% im Flüssigkristallelement



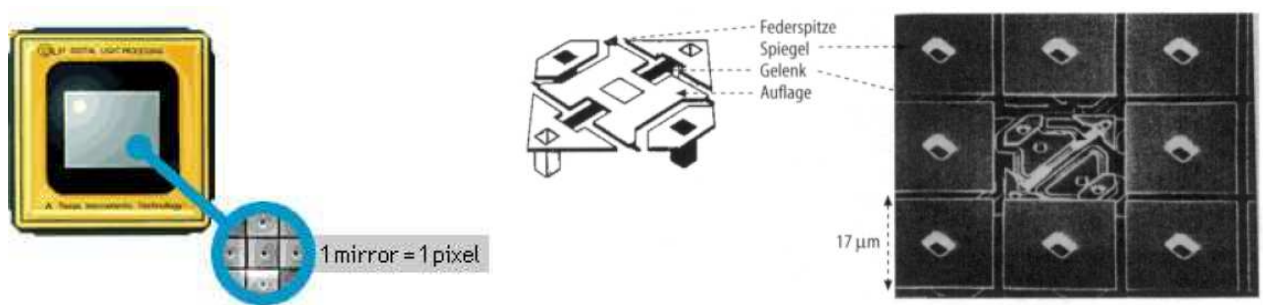
### 3.1.1 Projektions-Techniken ...



#### Digital Light Processing (DLP)

##### Digital Micromirror Device (DMD):

- Optischer Chip ausgestattet mit einem Mikro-Spiegel pro Pixel
- Mikro-Spiegel kann um Achse durch elektrostatische Anziehung gekippt werden
- Mikro-Spiegel können mit ca. 5 kHz schalten (Helligkeitsstufen)



### 3.1.1 Projektions-Techniken ...

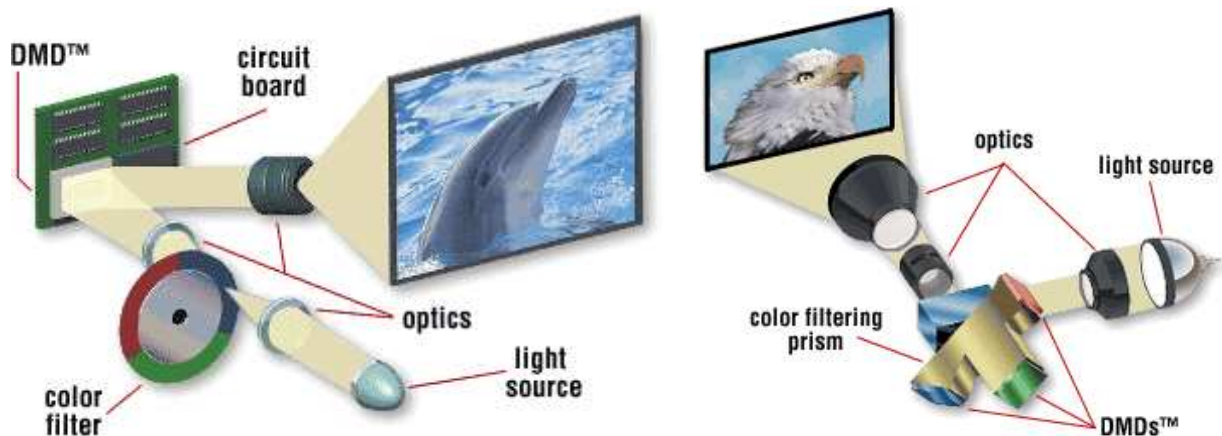


#### DLP Projektoren

**DLP-Formatter Board** setzt Digitalbild in DMD-Steuersequenzen um

**Aufbau:** DMD erzeugt durch Reflexion von Licht einer Lichtquelle ein Bild

- sequentielle Farbdarstellung mittels Farbfilter und einem DMD
- parallel Farbdarstellung mittels Farbprisma und drei DMDs



### 3.1.1 Projektions-Techniken ...

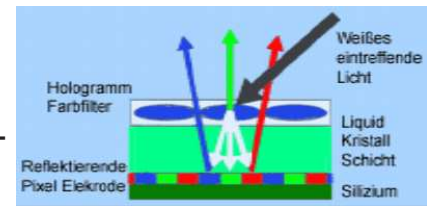


#### D-ILA

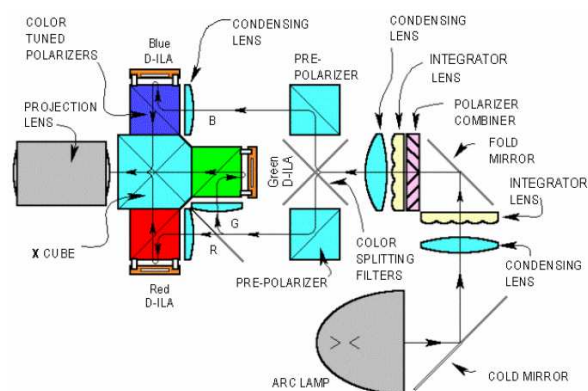
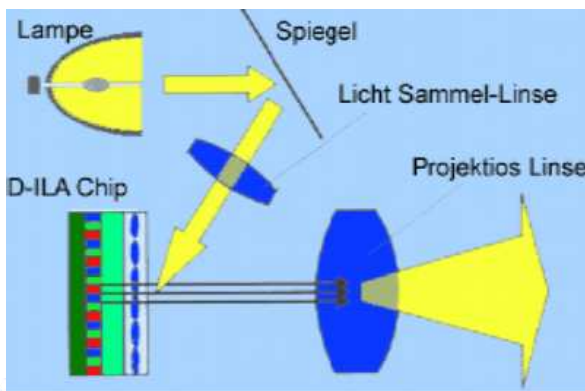
**Grundlage:** LCD-Module reflektieren Licht

**Füllfaktor/Lichtsensitive Fläche:** 100%  
durch „Liquide Crystal on Silicon (LCoS)“-Technologie

**Aufbau:** ○ Reflexion von Licht auf D-ILA Chip  
○ Farbdarstellung durch Farb-Splitting



Reflekt. LC Schema



### 3.1.1 Projektions-Techniken ...



#### Bewertung der Projektionstechniken

Kriterium	CRT	LCD	DLP	D-ILA
Auflösung	+ dynamisch	- statisch	- statisch	- statisch
Helligkeit & Kontrast	--	+	++	++
Bildqualität	++	-	-	-
Natürlichkeit	weiches Bild	Pixel sichtbar	Pixel sichtbar	Pixel sichtbar
Latenz/Geschw.	++	0	+	0
Preis für VR-optimierte Beamer	-	+	-	-

Hinweis: + bzw. ++ bedeuten eine günstige bzw. sehr günstige Bewertung, was bei „Preis“ auch ein günstiger Preis ist.



### 3.1.2 Head Mounted Displays (HMD)



**Grundsätzlicher Aufbau:** ○ Ein oder zwei Displays (LCD, auch OLED) direkt vor Augen  
⇒ automatische Auftrennung der Bilder für beide Augen

○ Geringer Augenabstand ⇒ Verzerrung; wird entsprechend korrigiert

**Wichtige Kenngrößen** zur Beurteilung von HMDs:

- Bildqualität/Auflösung
- Gewicht/Tragekomfort
- Sichtbereich

**Anwendungsspezifische HMD-Varianten:**

- Single-Eye
- Semi-transparent
- BOOMs (Binocular Omni-Orientalional Monitor) mit integriertem Tracking mittels mehrgliedrigem Gelenkarm



### 3.1.2 Head Mounted Displays (HMD) ...



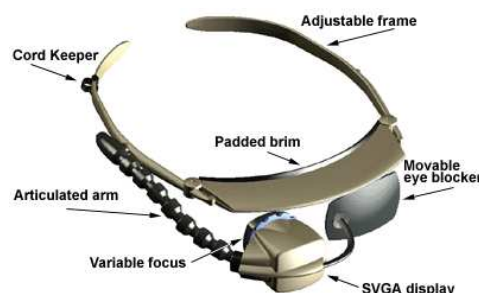
**CRT-HMD:**



**LCD-HMD:**



**Single-Eye-HMD:**





### 3.1.2 Head Mounted Displays (HMD) ...

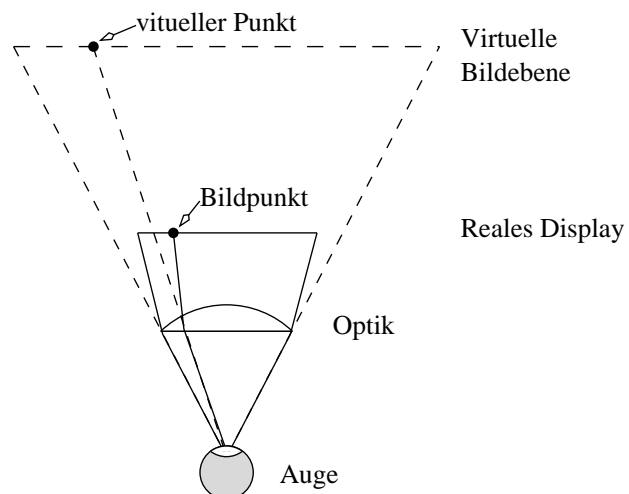


#### Technische Aspekte von HMDs

Weitwinkelaufnahme  
mit Verzerrungen



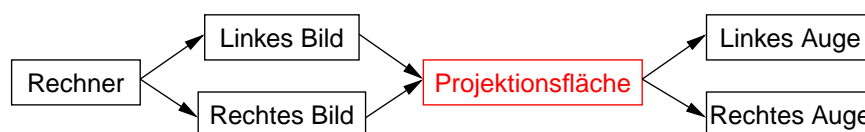
Schematische Darstellung  
der Verzerrung



### 3.1.3 Kanaltrennung



**Stereoprojektion:** Rechtes/linkes Bild muß auf rechtes/linkes Auge „gelenkt“ werden

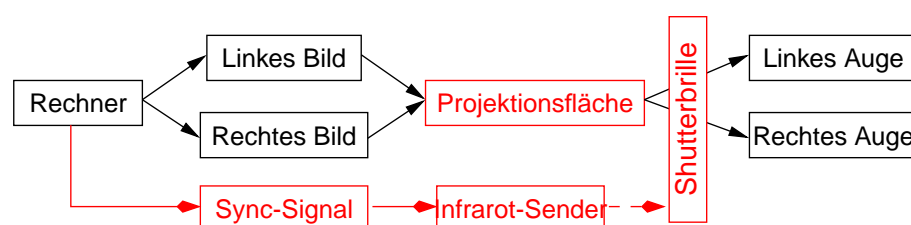


#### Aktiv Stereo

Rechtes/linkes Bild *abwechselnd* darstellen (1 Projektor mit 120Hz)

**Shutterbrille:** Verschließt beim Beobachter *aktiv* jeweils ein Auge (*shuttern*); diese Brillen sind empfindlich

**Synchronisation:** Graphikrechner steuert das Shattern der Brille (meist via Infrarot)



### 3.1.3 Kanaltrennung ...

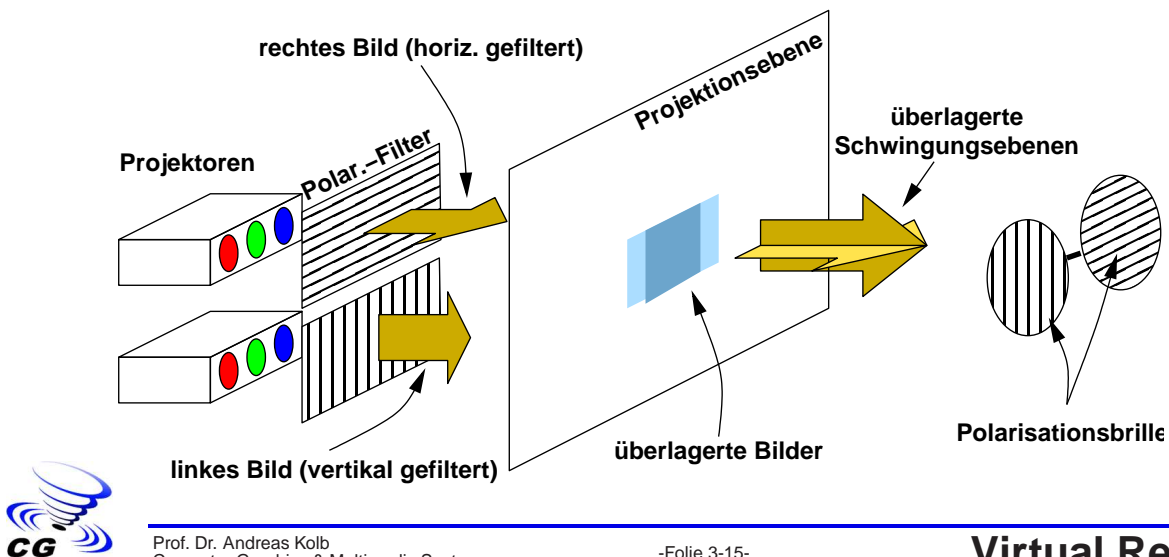


#### Passive Polarisationstechnik

Rechtes/linkes Bild *gleichzeitig* darstellen

**Polarisationsfilter:** Filtert eine Schwingungsebene des Lichtes heraus

**Polarisationsbrille:** Passive Polarisationsbrille, die entsprechende Ebene filtert



### 3.1.3 Kanaltrennung ...

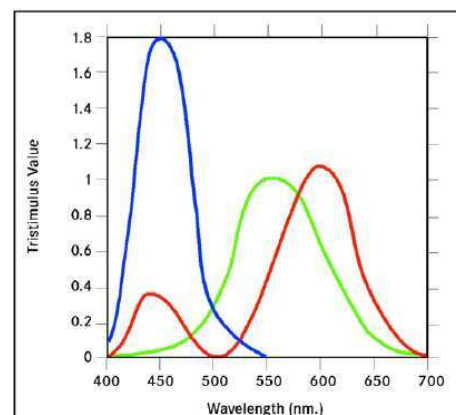


#### InfiTec™

**Tri-Stimulus Wahrnehmung** des Menschen basiert auf Zapfen-Empfindlichkeit

- Blau: Max. bei  $\lambda = 450 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 60 \text{ nm}$
- Grün: Max. bei  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 80 \text{ nm}$
- Rot: Max. bei  $\lambda = 600 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 70 \text{ nm}$

**Display-Geräte** verwenden RGB-Leuchtprimitive ggf. mit schmalbandigen Emissionsspektren



**InfiTec** entspricht *Frequenz-Multiplex-Verfahren*

- Emissionsspektren der beiden Projektoren auf getrennte RGB-Bänder
- Brillen enthalten „Kammfilter“ (dielektrische Interferenzfilter)

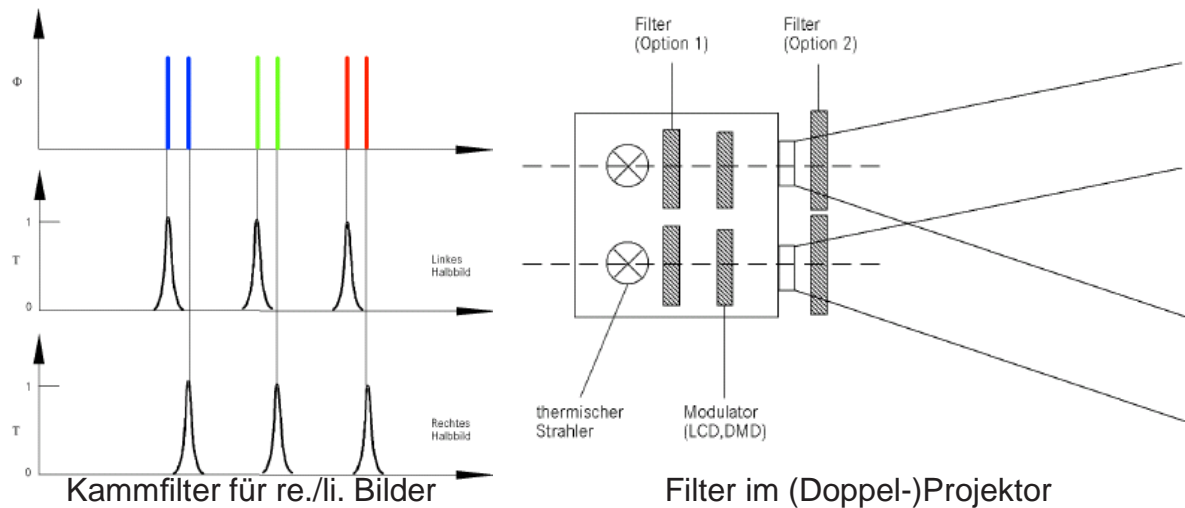




### 3.1.3 Kanaltrennung ...



#### InfiTec™(Forts.)



**Grundsätzlich** auch mehr als 2 Kanäle möglich  $\Rightarrow$  mehrere getrackte User



### 3.1.3 Kanaltrennung ...



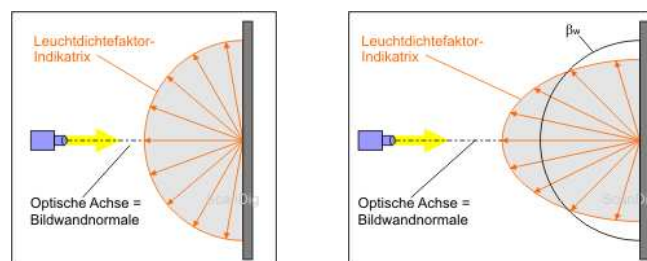
#### Qualitätskriterien

**Gleichmäßige und hohe Lichtausbeute** über der Projektionsfläche

- Gain: Lichtausbeute auf einer Projektionsfläche im Verhältnis zur ideal diffuser Reflexion
- Half Gain Angle: Winkel, unter dem noch 50% Lichtenergie im Vergleich zur Hauptstrahlrichtung in Transmission abgestrahlt wird

**Bildqualität:** ○ Helligkeit: Idealerweise bei Tageslicht nutzbar

- Homogenität: Weiche Übergänge und keine sichtbaren Pixel



Diffuse Reflexion und Gain in Aufprojektion



### 3.1.3 Kanaltrennung ...



#### Vergleich der Kanaltrennung

	Komfort	Trennschärfe	Gain	max. Blickwinkel	Preis	
					Projektortechnik	Brille
<b>Aktiv</b>	-	o/+	+	+	+ (CRT), - (DLP)	-
<b>Passiv</b>						
- orthog	+	-	o	o	o	o
- zirkular	+	o	o	-	o	o
<b>Infitec</b>	+	+	+	+	-	-

#### Bemerkung:

- In der Regel ein Projektor für beide Bilder bei aktiv Stereo und zwei bei passiv & Infitec pro Stereoprojektion
- + bzw. ++ bedeuten eine günstige bzw. sehr günstige Bewertung, was bei „Preis“ auch ein günstiger Preis ist.
- Preis Projektortechnik: Umrüstungskosten des Projektors



### 3.1.3 Kanaltrennung ...

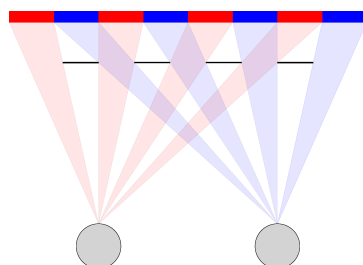


#### Autostereoskopie

**Ziel:** Stereoeindruck ohne Brille o.ä. Device

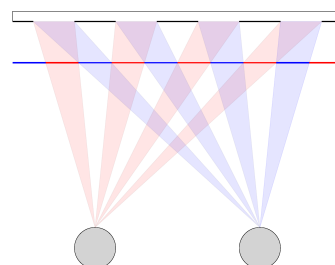
**Idee:** „Kippbilder“ ermöglichen blickwinkelabhängigen Eindruck

**Parallaxen-Ansatz:** Nutzung der verschiedenen Strahlengänge zum Auge



**Aktiv**

Barriere vor LCD Display, dynamische Anpassung, Headtracking erforderlich

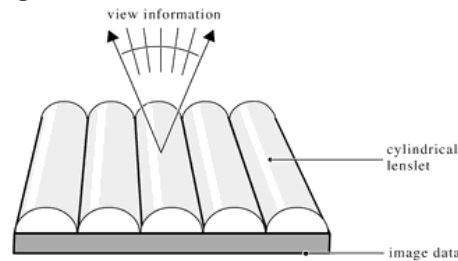


**Passiv**

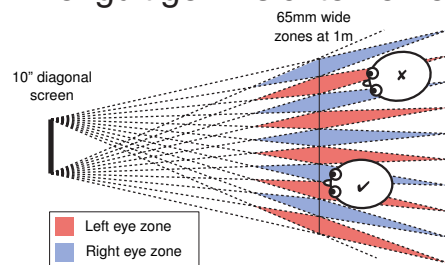
Barriere ist fix, erzeugt feste Sichtbereiche



#### Linsen-Ansatz: Fokussierung auf Teilbereiche der Bildebene

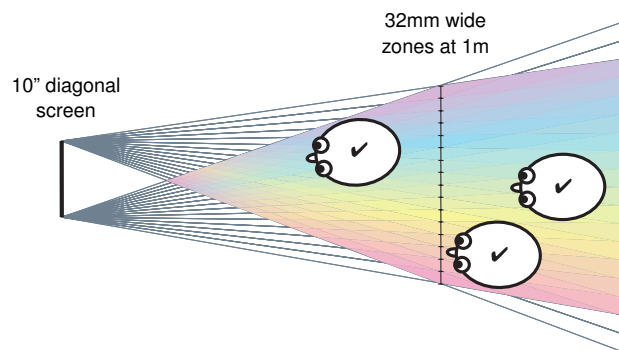


#### Feste Sichtbereiche, da nur zwei gültige Ansichten erzeugt werden



#### Erweiterung auf Multiview-Ansätze

- Mehr als zwei Ansichten, die jeweils zur entsprechenden Raumrichtung gehören



- Im Sichtbereich erhalten die Augen benachbarte Ansichten
- Geeignet für horizontale Bewegung des Benutzers
- Geeignet für mehrere Benutzer im Sichtbereich
- Aufwand vervielfacht sich (Displaytechnik, Aufnahmetechnik, Speicherbedarf)

### 3.1.3 Kanaltrennung ...



#### Erweiterung auf freie Bewegung des Benutzers

- Übergang von zylindrischen zu sphärischen Linsen
- Jede Mikrolinse gibt ein volles 2D Bild wieder
- Beispiel real-eyes.eu
  - ❑ 250.000 Linsen pro Quadratmeter (etwa Streichholzkopfgröße)
  - ❑ Linsenbilder hergestellt aus ca. 30.000 einzelnen Ansichten
  - ❑ Aufgetragen auf Spezialfilm, beleuchtet



### 3.1.4 Konkrete Hardwareaufbauten



#### Projektionsflächen

**Auf-Projektion:** Beamer bestrahlt opaque Oberfläche

- + geringer Raumbedarf
- + gute Lichtausbeute
- Schattenwurf durch Nutzer bei immersiver Nutzung

**Rück-Projektion:** Beamer bestrahlt teiltransparente Wand von hinten

- + kein Schattenwurf durch Nutzer
- Problematik des half-gain angles: Nötige Diffusion vs. Abschwächung
- Hotspot-Verhalten
- größerer Platzbedarf

**Edge-Blending** bei mehreren Beamern/Kanälen auf einer Ebene

- Beamer haben immer untersch. Leuchtcharakteristik
  - ⇒ harte Kanten werden sichtbar



lineares Edge-Blending sorgt für weichen Übergang

### 3.1.4 Konkrete Hardwareaufbauten ...



#### Multi-User Setups

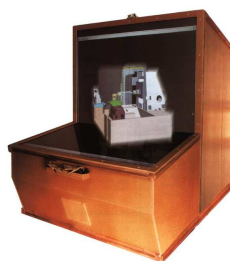
**Projektionswände:** 1-3 überlappende Teilprojektionen; Immersionsgrad mittel  
Einsatz: Präsentationen, real-grosse Objektdarstellung

**Projektionstische:** 1-2 Seiten mit sep. Projektion; Immersionsgrad mittel-hoch  
Einsatz: Interaktive Anwendungen, z.B. Simulation

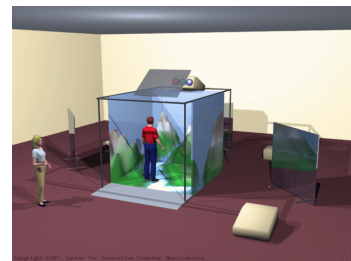
**Projektionsräume:** 3-6 Seiten mit je einer Projektion; Immersionsgrad hoch  
Einsatz: Interaktive Anwendungen für mehrere Personen



Projektionswand



Projektionstisch



Projektionsraum (CAVE)



### 3.1.4 Konkrete Hardwareaufbauten ...



#### Vergleich der Hardwareaufbauten

##### **Projektionswände:**

- hauptsächlich für Präsentationszwecke, weniger immersiv
- verwenden Auf- und Rück-Projektion (Kino)
- mit und ohne Blending, je nach benötigter Auflösung

##### **Projektionstische:**

- Verwenden nur Rückprojektion ohne Blending
- Immersive Einzelarbeitsplätze

##### **CAVE-Aufbauten:**

- Verwenden von Rück- und Aufprojektion, meist ohne Blending
- Immersive Arbeitsplätze für weniger Nutzer

##### **Hybride Systeme** wie unser Zylinder-Aufbau

- Kombinierte Nutzung für Präsentation und immersives Arbeiten
- Verwenden von Rück- und Aufprojektion, meist mit Blending



### 3.1.4 Konkrete Hardwareaufbauten ...



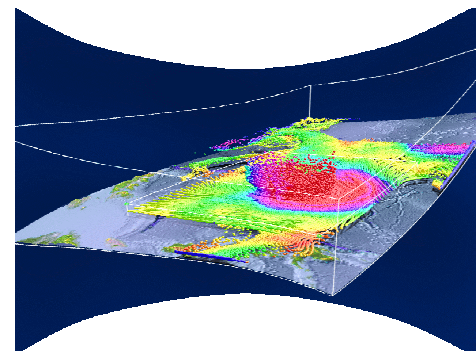
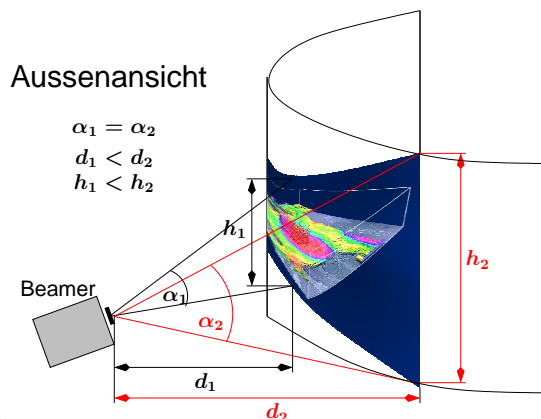
#### Gekrümmte Projektionsflächen

**Ziel:** Nutzung nicht-ebener Projektionsflächen (Zylinder, Sphären etc.)

**Problem:** ○ Aktuelle Bildsyntheseverfahren projizieren 3D-Objekte immer auf eine **Bildebene**

○ Eine Projektion auf eine ebene Fläche erzeugt wieder das korrekte Bild

**Beispiel:** Rückprojektion auf Zylinder



Beamer-Sicht



### 3.1.4 Konkrete Hardwareaufbauten ...

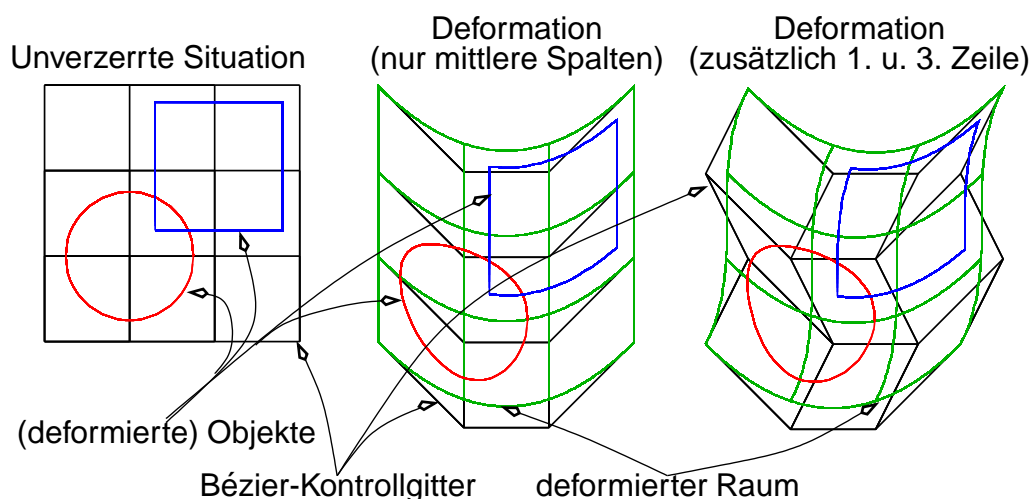


#### Gekrümmte Projektionsflächen - Warping

**Erinnerung CG-II:** Mit Warping können 2D- oder 3D-Räume verzerrt werden

**Ansatz:** Warping der Bilder derart, dass projizierte Bilder wieder korrekt sind (vgl. Abschnitt 3.1.2)

**Beispiel aus CG-II:** Freiform-Deformation







## 3.2 Bewegungserfassung ...



### Mechanische Bewegungserfassung

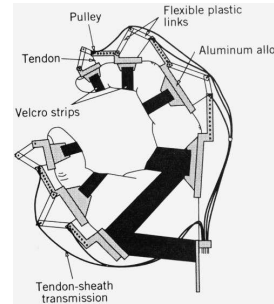
**Ansatz:** Mechanische Vorrichtungen für spezielle Bewegungsarten und Körperteile

**Vorteile:**

- (beliebig) hohe Genauigkeit
- einfache Kopplung mit Kraft-Rückkopplung (siehe Tiefenwahrnehmung)

**Nachteile:**

- Hohe Spezialisierung
- mechanischer „Overhead“
- wenig Tragekomfort
- Justierung für jeden Nutzer neu



Aufbau eines Exo-Glove



Cyber Force



## 3.2 Bewegungserfassung ...



### Magnetische Bewegungserfassung

**Tracking** von 6DOFs (Position & Orientierung)

**Transmitter:** ○ drei senkrecht aufeinanderstehende Spulen

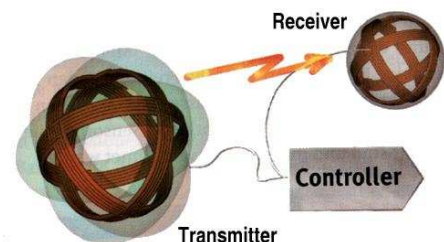
- sequentielles, niederfrequente Magnetfelder

**Sensor/Receiver:** ○ ebenfalls drei Spulen

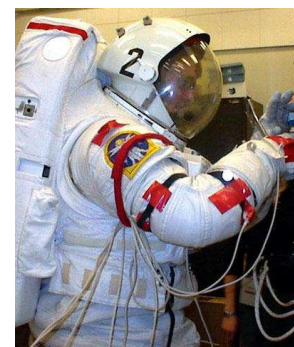
- Induktion erzeugt Strom in Receiver-Spulen
- Feldabschwächung  $\Rightarrow$  Berechnung von Position & Orientierung

**Weitere Eigenschaften:** ○ Magnetische Tracker arbeiten in Halbräumen rel. zum Transmitter

- Genauigkeit nimmt mit Abstand zum Transmitter ab



Systemkomponenten



Magnetisches Motion-Capturing



## 3.2 Bewegungserfassung ...



### Akustische Bewegungserfassung

Sehr analog zu magnetischen Trackern:

**Lautsprecher:** (=Transmitter) drei Stück in fester Position; senden sequentiell Ultraschall aus

**Mikrofone:** (=Receiver) drei Stück in fester Konstellation; empfangen die Schallwellen

**Arbeitsweise:** Entfernungsberechnung aufgrund der (temperaturabhängigen) Laufzeit  $\Rightarrow$  9 Entfernungswerte  $\Rightarrow$  Berechnung der 6 DOFs



## 3.2 Bewegungserfassung ...



### Optische Bewegungserfassung

**Ansatz:** 2D-Kameras erfassen spezielle Objekte (*Marker*)

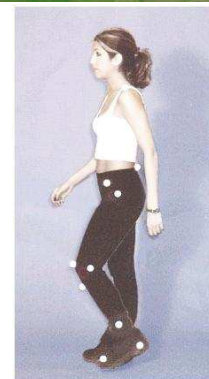
**Kameras:** IR-Kameras, mindestens vier

**Marker:** aktiv (LED-Leuchten) oder passive IR-Reflektoren mit aktiv blitzenden Kameras

**Kalibrierung:** Relative Position und Orientierung der Kameras zu Weltkoordinaten

**3D-Rekonstruktion:** ○ Kameras liefern 2D-Bild mit Markerpositionen

- Rückrechnung der 3D-Markerpositionen
- 6DOF über fixe Anordnung von Markern möglich



Optisches Motion-Capturing



## 3.2 Bewegungserfassung ...



### Optische Bewegungserfassung bei Augmented Reality

**Ausgangslage:** User-Mounted Kamera und Display (HMD)

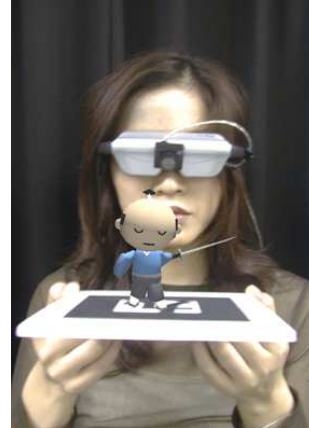
**Ziel:** Erfassung der Beobachter-Position *relativ* zu einem realen Objekt

⇒ reales Objekt bzgl. virtueller Kamera (Augen) bekannt

**Ansatz:** ○ Anbringen von *Markern* am Objekt (in Szene)

○ Schätzung der *Starrkörper-Transformation*  $T$  von Marker zu Kamera

**Abgleich** mit *Marker-Datenbank* liefert Marker-ID



## 3.2 Bewegungserfassung ...



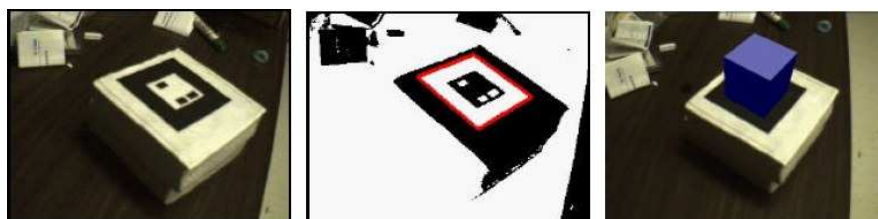
### Optische Bewegungserfassung bei Augmented Reality (Forts.)

**Transformation** von Marker- in Bild-Koordinaten (Projektionsmatrix bekannt):

$$\mathbf{P}^I = \begin{pmatrix} x^I \\ y^I \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x^I \\ y^I \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} sf_x & 0 & t_x^C & 0 \\ 0 & sf_y & t_y^C & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{Projektion}} \underbrace{\begin{bmatrix} R & \vec{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{=T(R \text{ Rotation})} \underbrace{\begin{pmatrix} x^M \\ y^M \\ z^M \end{pmatrix}}_{=P^M}$$

**Abschätzung** von Starrkörper-Transformation  $T$  (6 Unbekannte!):

- Binärbild durch *Schwelwert-Operation* & *Rechteck-Suche*
- Marker in Größe bekannt ⇒ 4 Paare  $(P_i^M, P_i^I) \Rightarrow 8$  Bedingungen



### Vergleich der Bewegungserfassungstechniken

Kriterium	Mechanisch	Magnetisch	Akustisch	Optisch
Äußerer Einfluß	keine	Metall, Stromleitung etc.	Temperatur, Reflexion	Verdeckung
Genauigkeit	sehr genau	mittel	mittel	genau
Skalierbarkeit	gar nicht	gering	gering	möglich
Updaterate	hoch	mittel/hoch	gering	mittel
Latenz	gering	gering	gering/mittel	mittel
Komfort	gering	mittel	gering	mittel/gut

## 3.3 Interaktions-Devices

**Ziel:** Intuitive Interaktion mit einer VR-Anwendung

1. Reine Interaktion
2. Interaktion mit Kraft- und/oder taktilem Feedback

**3D-Mäuse:** Space-Ball, Space-Maus etc. schwierig bei Non-Desktop Anwendungen (zus. Orientierung)

**Stifte:** z.B. Stylus, Flying Mouse, etc.

**Datenhandschuh:** Tracking der Handposition plus Fingerbewegungen:





### 3.3 Interaktions-Devices ...



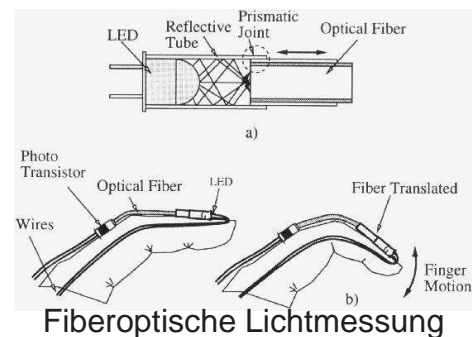
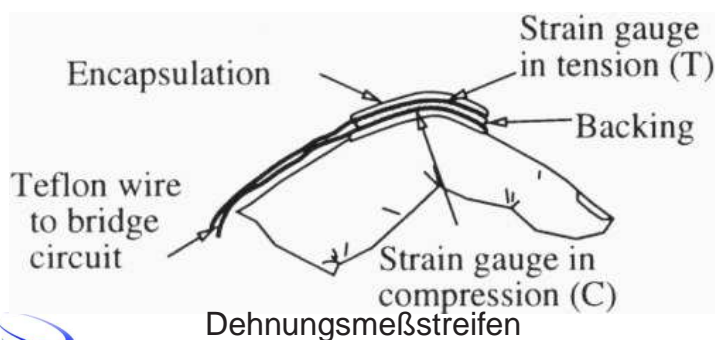
#### Bewegungserfassung beim Datenhandschuhe

##### Fiberoptisch: Lichtleitwiderstand

- LED-Licht mit Glasfiber-Schleifen an jedem Knöchel
- Beugung verändert Lichtleitfähigkeit

##### Elektromechanisch: Dehnungsmeßstreifen

- Ohmscher Dehnungssensor aus feinem metallischem Widerstandsmaterial
- Verformung (Dehnung, Stauchung) verändert Widerstand



### 3.4 Krafrückkopplung



**Krafrückkopplung:** Simulation von Tiefenwahrnehmungs-Reizen

**Häufig** in Kombination mit Input-Device

**Verankerung** zur Kraftausübung:

- Extern befestigt (Ground-based)
- Am Körper befestigt (Body-based)



EXOS Force Arm Master

**Beispiele** für Krafrückkopplung:

- *EXOS Force Arm Master*: Body-based; Kraftausübung auf Arm
- *PHANTOM™*: Interaktions-Stift; Ground-based; Gibt auch taktilen Feedback über Vibration (Oberflächentextur)



Phantoms





## 3.5 Taktile Rückkopplung



**Taktiler Feedback:** Simulation von exterozeptiven Stimulanzen sehr schwierig  
**Kopplung** mit

- Datenhandschuhen oder
- speziellen Input-Devices oder anwendungsspezifischen Werkzeugen

**Datenhandschuh:** Taktiler Feedback für Fingerspitzen

- kleine Luftkissen („TeleTact Glove“)  
⇒ relativ ungenau und relativ hohe Latenz
- Piezo-elektrische Matrix ( $8 \times 8$ ) im Bereich der Fingerkuppe (taxel = „tactile element“)  
⇒ ca. 25 Hz und bis zu 1.3N pro Taxel



## 3.5 Taktile Rückkopplung ...



### PHANTOM: Kraft- und taktile Rückkopplung

**Freiheitsgrade:** Degrees of Freedom (DOF)

- Drei Translations-DOF; Kraftrückkopplung
- Stiftdrehung ist passiv (keine Kraft simulierbar)

**Arbeitsbereich:** Handgelenk evtl. mit geringen Unterarmbewegungen

**Kraftübertragung** bis zu 6.4 N

**De facto** Standard Interaktionswerkzeug



## 3.6 Akustische Rückkopplung



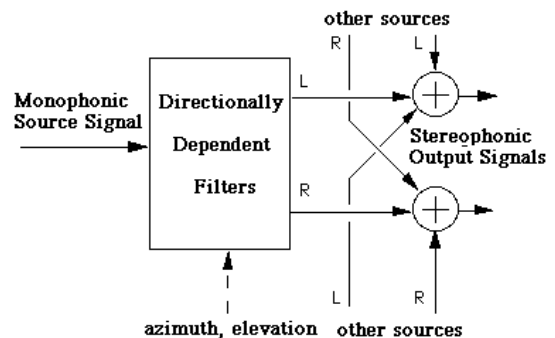
**Benutzer und virtuelle Klangquellen** bewegen sich relativ zueinander  
⇒ Usertracking notwendig

**Position virtueller Klangquellen** nicht an Position realer Klangerzeuger  
(Kopfhörer, Lautsprecher) gebunden  
⇒ dynamische Anpassung des Klangbildes notwendig (HRTF)

### Klangerzeuger:

- *Kopfhörer*: Feste Kopplung der Klangquellen an Hörer
- *Lautsprecher*: Feste Kopplung der Klangquellen an Hardware-Aufbau

**Richtungsfilterung:** Bei *einer* Klangquelle und *ausschließlich* direkter Beschallung  
⇒ Filterung des Klangs mit HRTF und Einfallsrichtung liefert richtiges Klangbild



Verarbeitungsprinzip Kopfhörer



## 3.6 Akustische Rückkopplung ...



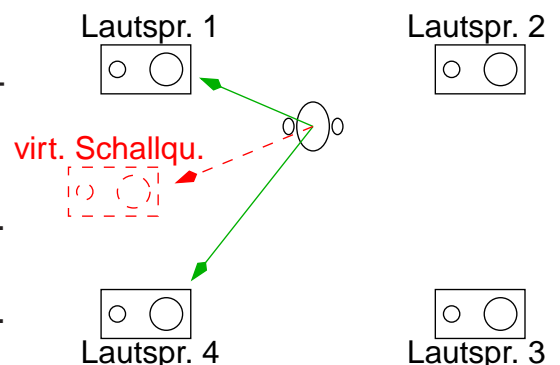
### Lautsprecher-Ansatz

**Grundsätzlich:** Multi-User Ansatz (nur WFS kann das)

**Problematisch:** Nur wenige Klangrichtungen „real“ vorhanden

**Interpolation:** ermöglicht Illusion der „zwischenliegenden“ Klangquelle  
Ausgehend vom Nutzer bzgl.

- Richtung zu Lautsprechern und virt. Schallquelle
- Abstand zu Lautsprechern und virt. Schallquelle



**Nieder-frequente Töne** für Menschen kaum ortbar

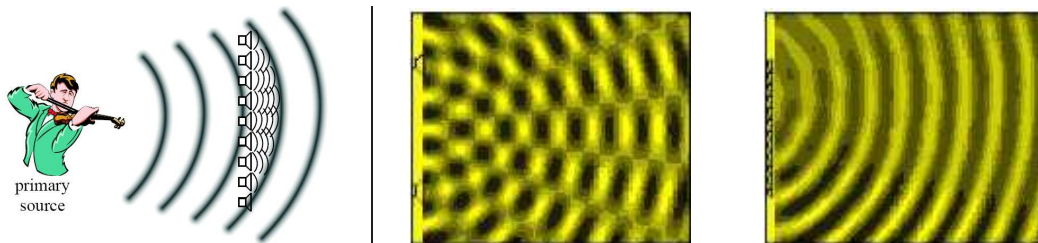
⇒ tiefe Töne ohne Richtungsfilterung



### Wellenfeldsynthese

**Huygens' Prinzip:** Wellenfeld lässt sich ausserhalb der Quelleposition durch Lautsprecherfeld erzeugen

- Abstände der Lautsprecher bestimmen max. darstellbare Frequenz
- Schallquellen müssen korrekts Signal abgeben (Lautstärke, Verzögerung)



Links: Huygens' Prinzip; Mitte & rechts: Erzeugung einer hohen Frequenz mit zu großen und korrekten Lautsprecherabständen.

**Herausforderungen:** 1. Zerlegung des Quellen-Signals in passende Lautsprecher-Signale



2. Einzelnen Ansteuerung einer großen Zahl Lautsprecher

Prof. Dr. Andreas Kolb  
Computer Graphics & Multimedia Systems

-Folie 3-45-

**Virtual Reality**

### Herausforderungen der Klangerzeugung

**Mehrere Klangquellen** durch Überlagerung (Addition)

**Reflexionen/Klangpfade:** Unendlich viele Pfade zwischen Klangquelle und Hörer

⇒ Modellierung beliebiger Klangausbreitung schwierig (viele Pfade)

**Klangumgebung (Hall etc.)** über Phasenfilterung und -verschiebung

**Doppler-Effekt:** Phasenfilterung und rel. Geschwindigkeit

**Cross-Talk:** Zusätzliches Problem des Lautsprecher-Ansatzes; Schall für re./li. Ohr wird auch vom li./re. Ohr wahrgenommen