

- 9. 3D-Bildgebung und Objekterfassung**
 - 9.1 Grundlagen / Triangulation**
 - 9.2 Stereo-Sehen und Stereo-Mikroskope**
 - 9.3 Optische Vermessung von 3D-Objekten**
 - 9.4 3D-Visualisierungsmethoden**

9. 3D-Bildgebung und Objekterfassung

9.1 Grundlagen / Triangulation

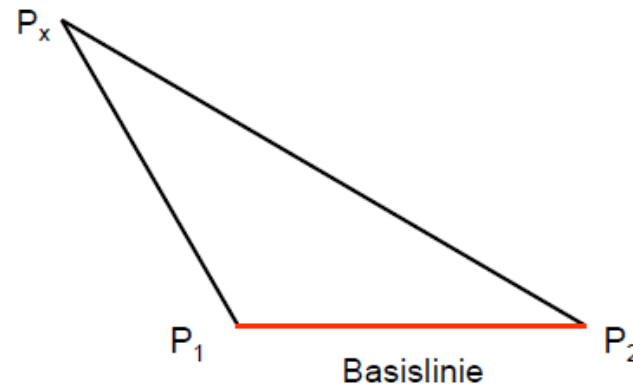
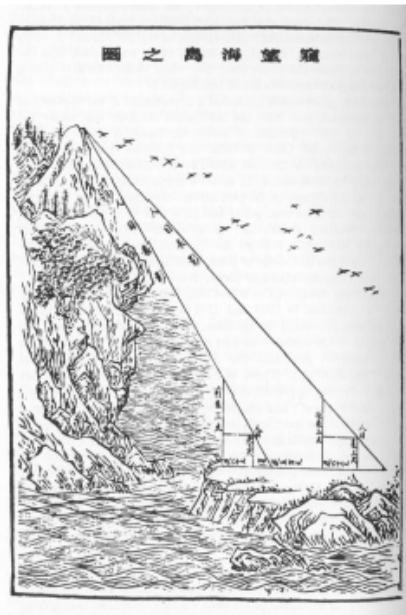
9.2 Stereo-Sehen und Stereo-Mikroskope

9.3 Optische Vermessung von 3D-Objekten

9.4 3D-Visualisierungsmethoden

Definition:

Verfahren zur Bestimmung des Ortes eines Punktes durch die Messung von Winkeln, die von Strecken eingeschlossen werden, welche von bekannten Punkten ausgehen, die an den Enden einer sog. Basislinie lokalisiert sind.



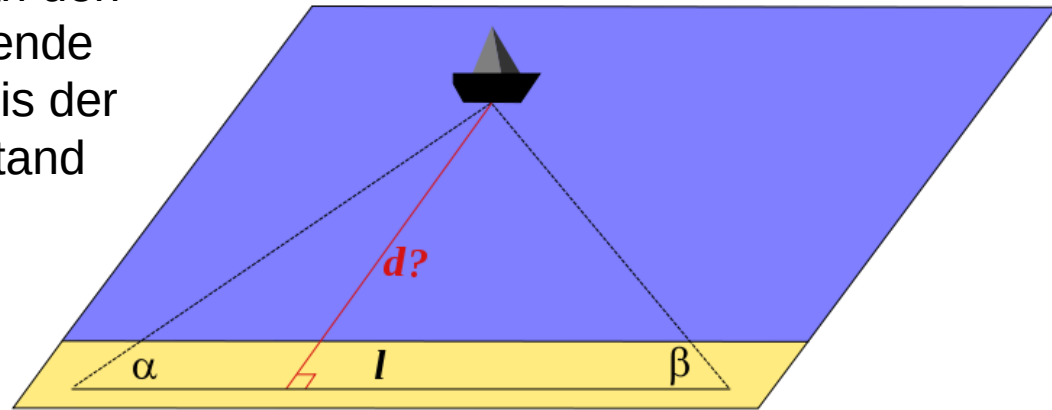
Liu Hui: „How to measure the height of a sea island.“
Illustration aus einer Edition von 1726

Grundprinzip der Triangulation:

Von zwei verschiedenen Stationen an den Positionen und wird der zu bestimmende Objektpunkt angepeilt. Unter Kenntnis der Basislänge kann man dann den Abstand Zur Basislänge bestimmen

Gegeben: Strecke l
Winkel α, β

Gesucht: Abstand d



$$l = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta}$$

$$l = d \cdot \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right) = d \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta + \cos \beta \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

Mit
 $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta, :$

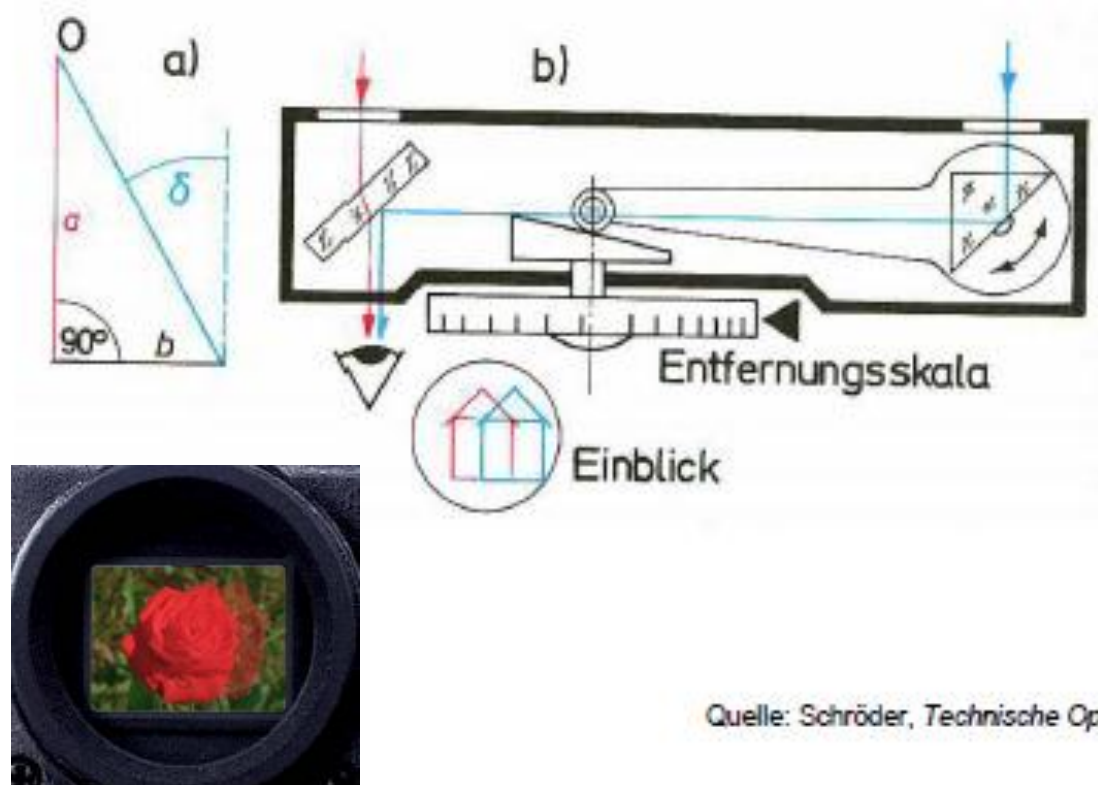
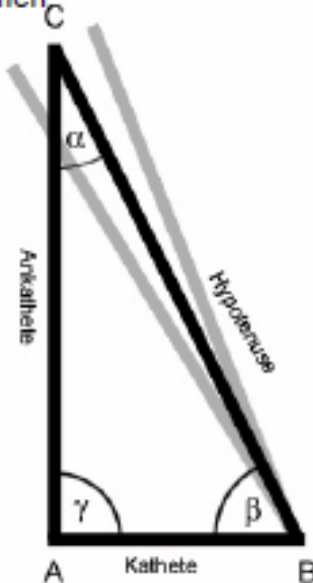
$$d = l \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (9.1)$$

Prinzip:

- Überlagerung von Bildern
- Änderung des Winkels bis Bilder überlappen
- Bei bekannter Basislänge folgt Entfernung

Basisentfernungsmesser

- Kathete (Basis) vorgegeben
- Winkel β verändert bis sich Hypotenuse und Ankathete im Objekt treffen

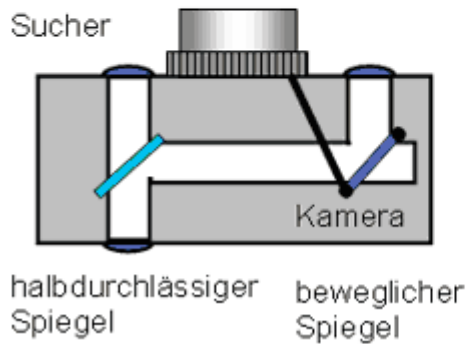


Quelle: Schröder, Technische Optik, 1990

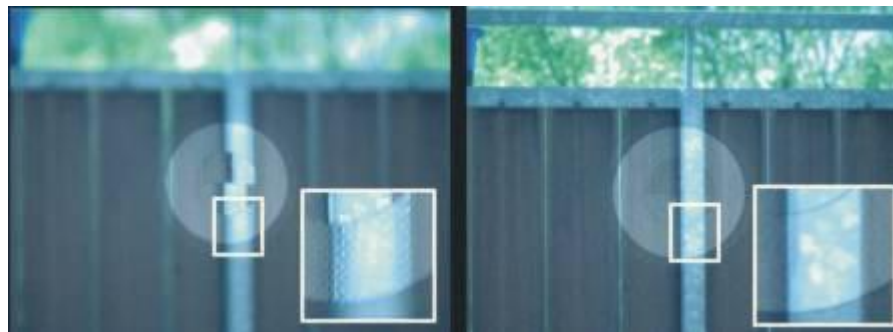
Anwendung z.B. Fotoapparat



Falsche Fokussierung



Korrekte Fokussierung



Quelle: www.puchner.org

9. 3D-Bildgebung und Objekterfassung

9.1 Grundlagen / Triangulation

9.2 Stereo-Sehen und Stereo-Mikroskope

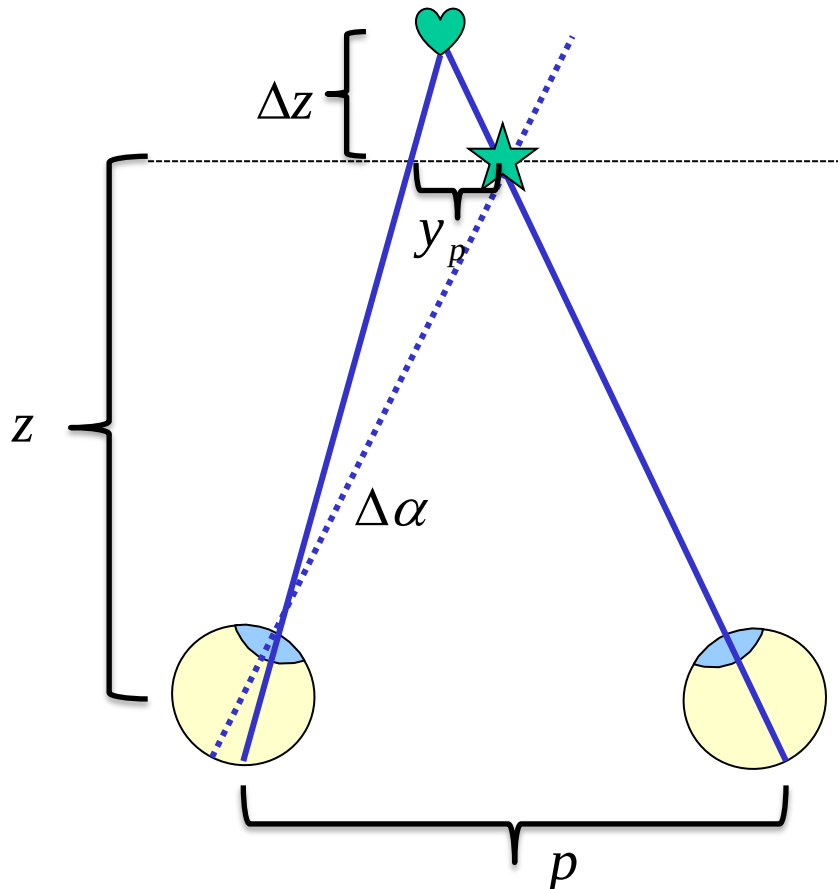
9.3 Optische Vermessung von 3D-Objekten

9.4 3D-Visualisierungsmethoden

Tiefenauflösung / Stereopsis

Stereoskopische Tiefenwahrnehmung:

- Das Auge/Gehirn liefert “eingebautes” Triangulationsverfahren
- Entscheidend: Stereowinkel α



$$\Delta\alpha \approx y_p / z$$

α Stereowinkel

y_p Stereoskopische Parallaxe

z Entfernung Fixationspunkt

p Pupillenabstand

$$\Delta z = \frac{z \cdot y_p}{p} = \frac{\Delta\alpha \cdot z^2}{p}$$

(9.2)

Tiefenauflösung / Stereopsis

Stereoskopische Tiefenauflösung des Auges:

$$\Delta z_{\text{Auge}} = \frac{\Delta \alpha_{\text{Auge}} \cdot z^2}{p} = \frac{\Delta \alpha_{\text{Auge}} \cdot s_0^2}{p} \quad (9.3)$$

$\Delta \alpha_{\text{Auge}}$: Stereogrenzwinkel des Auges (experimentell bestimmt)

→ $\approx 10''$ im Tageslicht

p : Pupillenabstand (ca. 65mm)

s_0 : Bezugssehweite 250mm

→ Für das “nackte” Auge ergibt sich

$$\Delta z_{\text{Auge}} = 45 \mu m$$

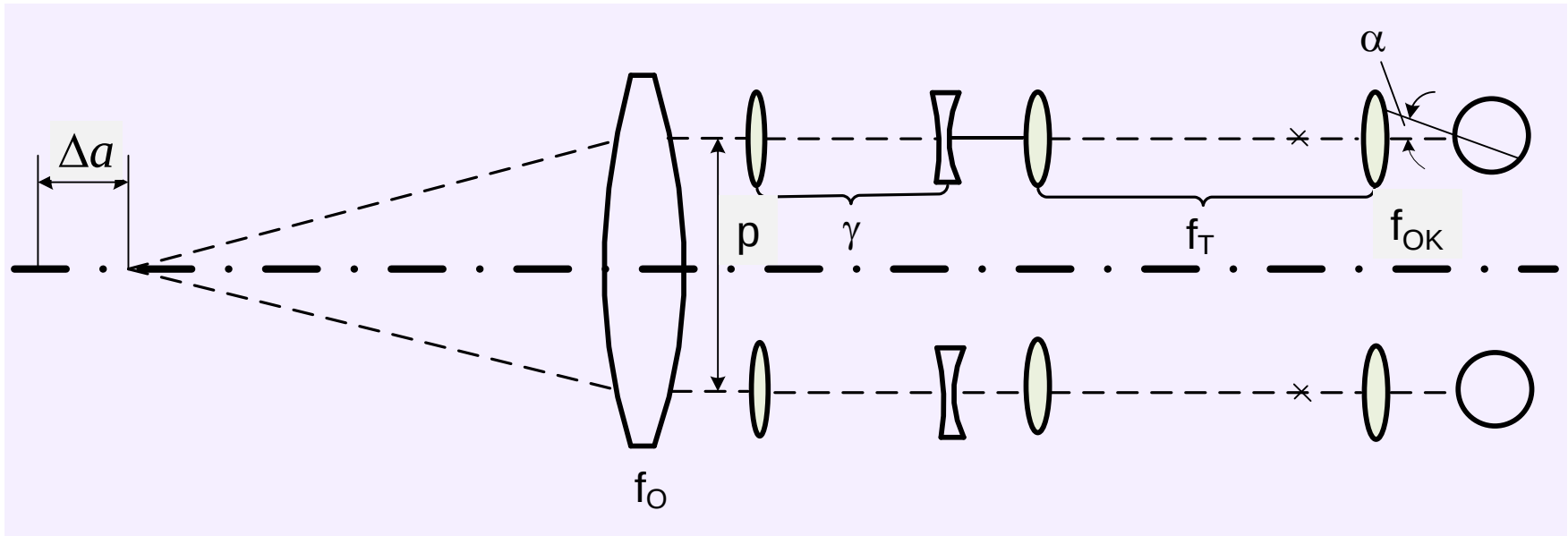
Tiefenauflösung mit Instrumenten

Für Stereromikroskope
ergibt sich:

(9.4)

$$\Delta a = \frac{\Delta \alpha_{Inst} \cdot f_O^2}{p} = \frac{\Delta \alpha_{Auge}}{\underbrace{\gamma \cdot \frac{f_T}{f_{Ok}}}_{\text{Winkelvergr.}}} \cdot \frac{f_O^2}{p}$$

α_{Auge} Stereogrenzwinkel ($10''$)
 f_O Brennweite Objektiv
 p Stereobasis (Abstand Kanäle)
 γ Vergrößerung Zoom
 f_T Brennweite Tubuslinse
 f_{Ok} Brennweite Okular

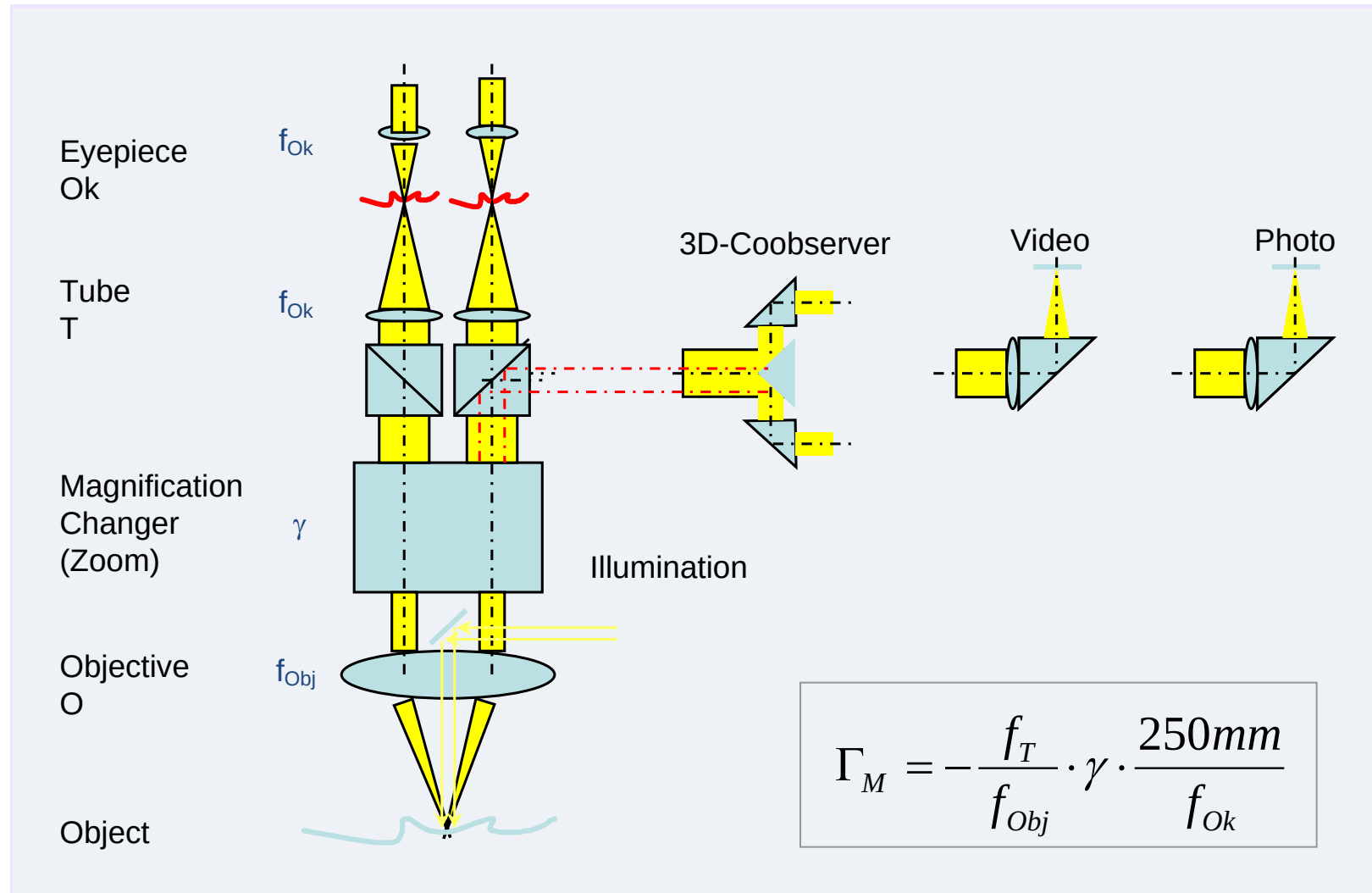


Tiefenauflösung

α (10'')	f_{obj} [mm]	γ	f_T [mm]	f_{Ok} [mm]	p [mm]	Δa [μm]
0.05	200	0,4	125	20	22	35,2
0.05	300	0,4	125	20	22	79,3
0.05	400	0,4	125	20	22	140,9
0.05	300	0,4	125	20	22	79,3
0.05	300	0,63	125	20	22	50,3
0.05	300	1	125	20	22	31,7

Tiefenauflösung Operationsmikroskope liegt im Bereich der Tiefenauflösung des Auges.

Stereomikroskop



Varioskope

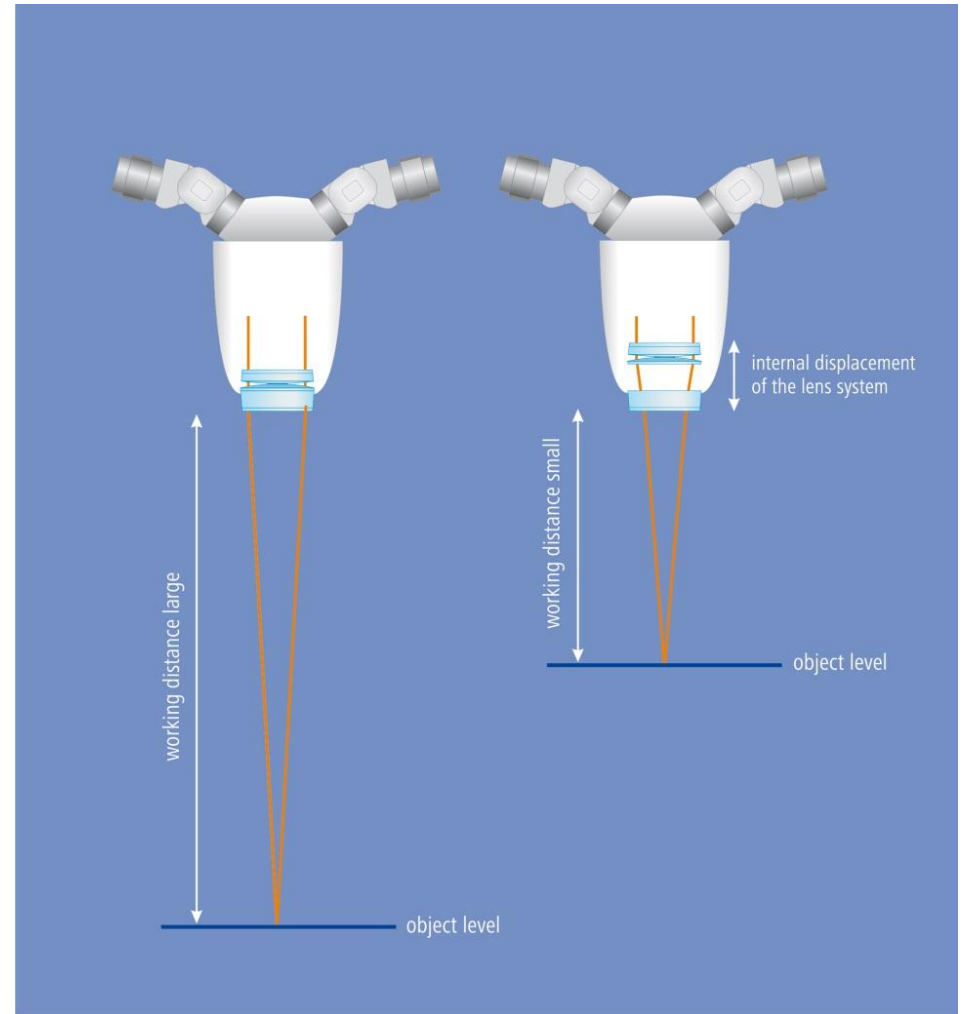
Varioskope

Möglichkeit zur Veränderung
des Arbeitabstandes
ohne Nachfokussierung

Prinzip

Objektiv ist als Zoom-System
ausgelegt.

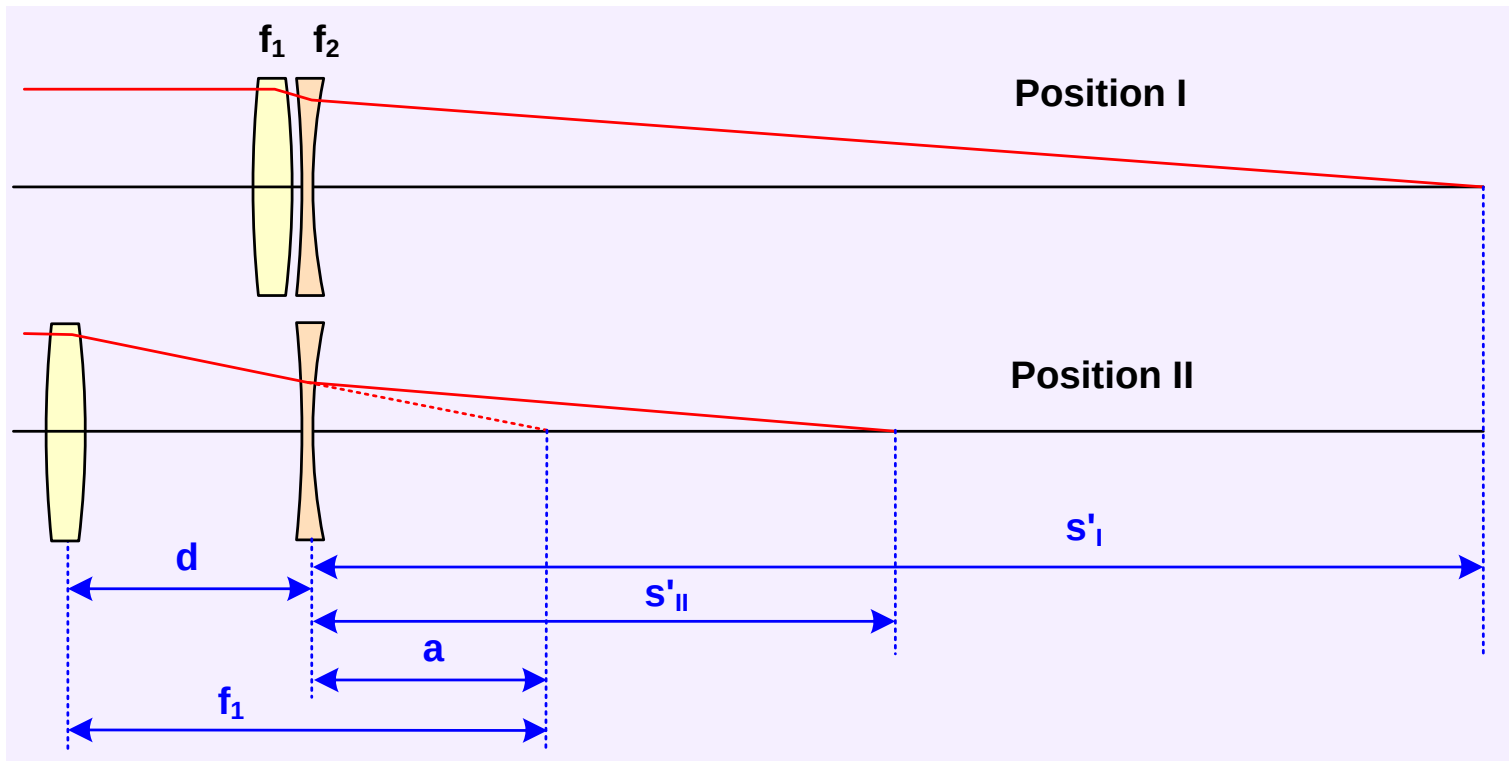
D.h. f_{Obj} ist variabel



Varioskop - Prinzip

Gesamtbrechkraft: $\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2$

→ Änderung des Abstandes d zwischen den Linsen ändert Gesamtbrechkraft:

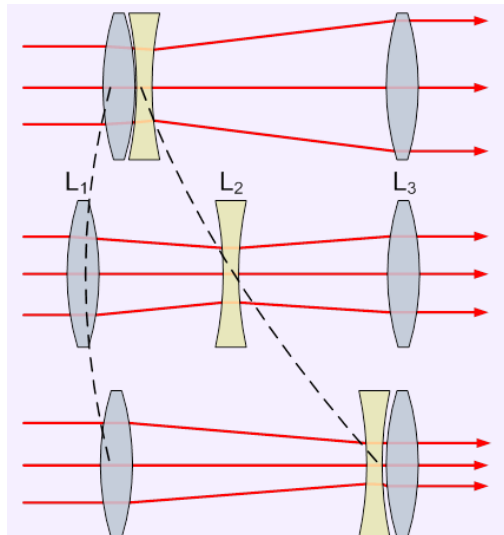
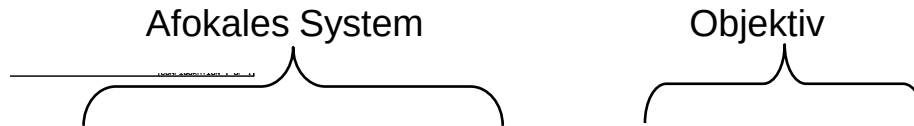


Afokales Zoomsystem



Operationsmikroskope sind meist zusätzlich mit variabler Vergrößerung ausgestattet

Prinzip: Afokales System mit variabler Vergrößerung vor **Objektiv**



Beispiel:

- Zwei Sammellinsen mit gleicher Brechkraft φ_1 in festem Abstand d
- Dazwischen Zerstreuungslinse mit Brechkraft $\varphi_2 < -2\varphi_1$

Extremstellungen:

$$\frac{1}{f_+} = \varphi_1 + \varphi_2$$

$$\frac{1}{f_-} = \varphi_1$$

Bei passendem Abstand:

Galilei-Teleskop mit Vergrößerung

$$\gamma_a = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2}$$

$$\gamma_b = \frac{1}{\Gamma_a} = -\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_1}$$

$$\varphi_1$$

$$\varphi_2 + \varphi_1$$

9. 3D-Bildgebung und Objekterfassung

9.1 Grundlagen / Triangulation

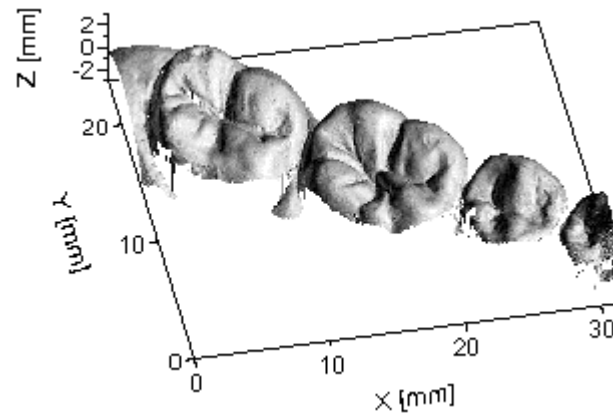
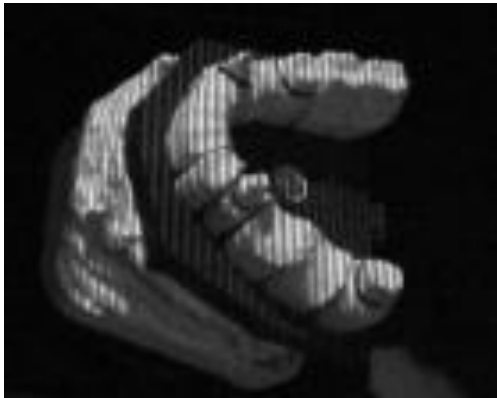
9.2 Stereo-Sehen und Stereo-Mikroskope

9.3 Optische Vermessung von 3D-Objekten

9.4 3D-Visualisierungsmethoden

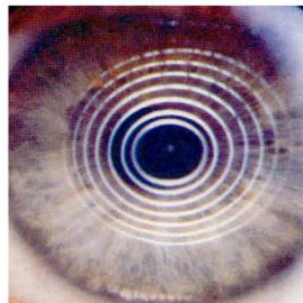
Quantitative 3D-Information über Oberflächen ist in vielen Gebieten der Medizintechnik wichtig:

Zahntechnik



Quelle: <http://www.ww-dental.de/materialien-cad-cam.html>

Ophtalmologie



Einige optische Methoden zur 3D-Vermessung von Oberflächen haben wir bereits kennengelernt:

- SNOM (3d-scanneds Verfahren) → ergibt automatisch Oberflächenprofil
- Konfokales Mikroskop → z-Scan erlaubt Höhenprofil-Erfassung
- OCT – Interferenz-Signal von Oberfläche
- Holographie – Rekonstruktion der 3D-Lichtverteilung

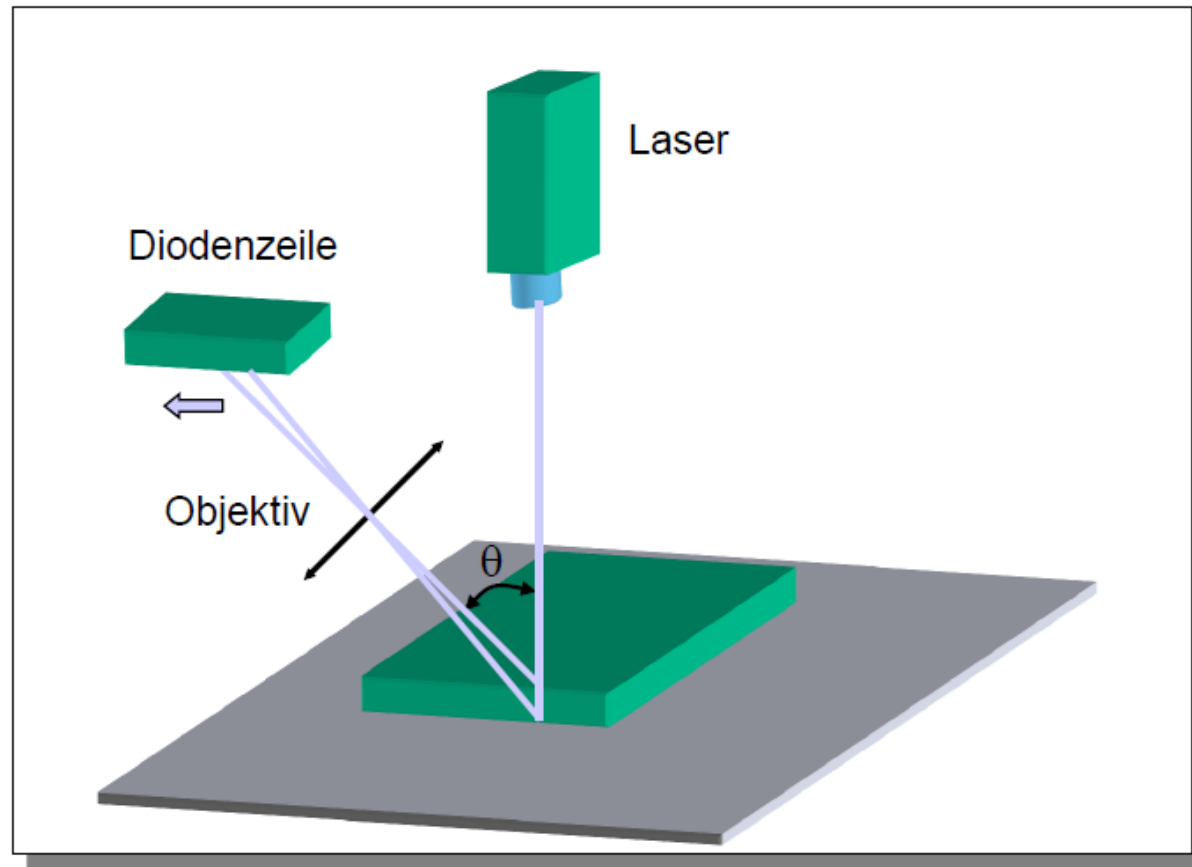
→ Hohe Auflösung (30nm-100nm), aber sehr aufwändig

Wie kann man makroskopische Oberflächen vermessen ?

Anwendungen:

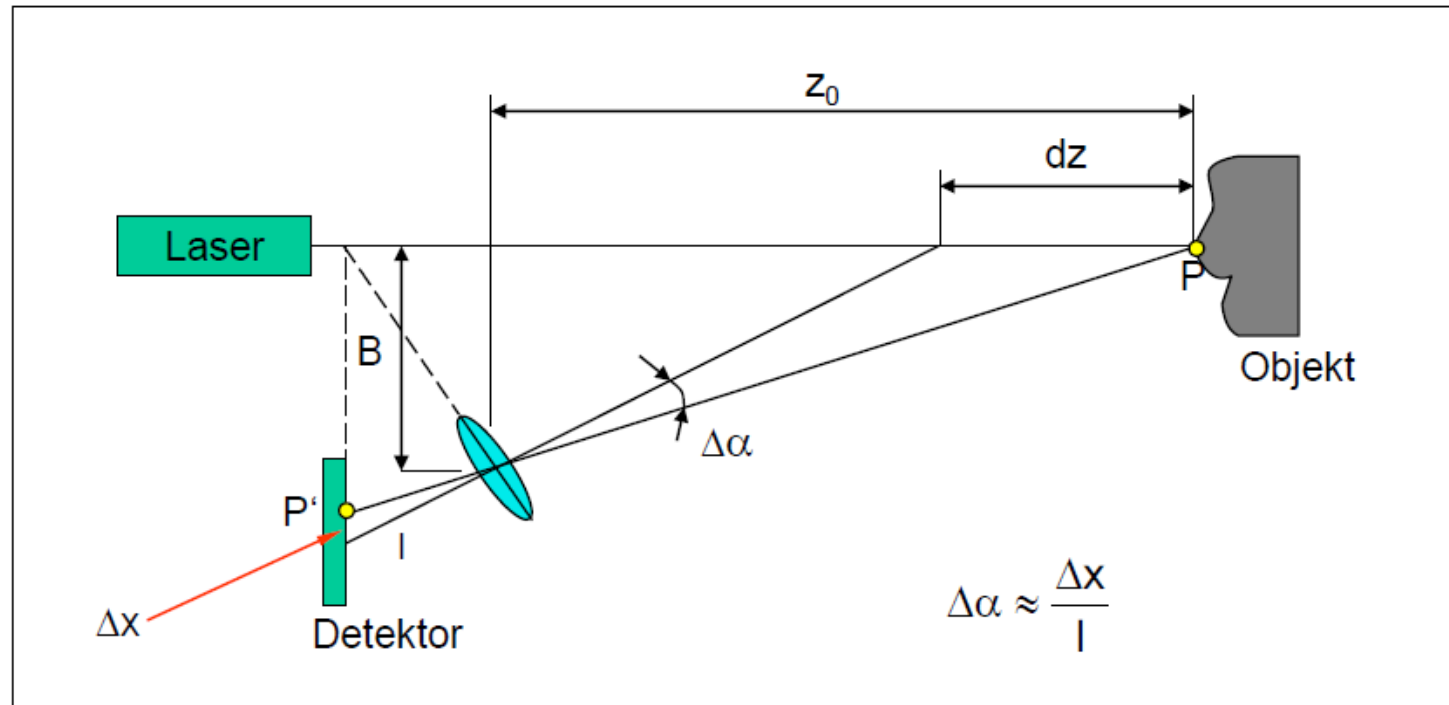
- Zahngeometrie zur Anpassung von Kronen, Implantaten
- Ohr-Geometrie zur Anpassung von Hörgeräten
- Körperteile zur Anpassung von Prothesen
- Knochen zur Anpassung von Implantaten

Prinzip:



Messung der Abweichung des Lichtpunktes eines gestreuten Laserstrahls auf einer Sensorzeile bei Änderung der Höhe des Auftreffpunktes

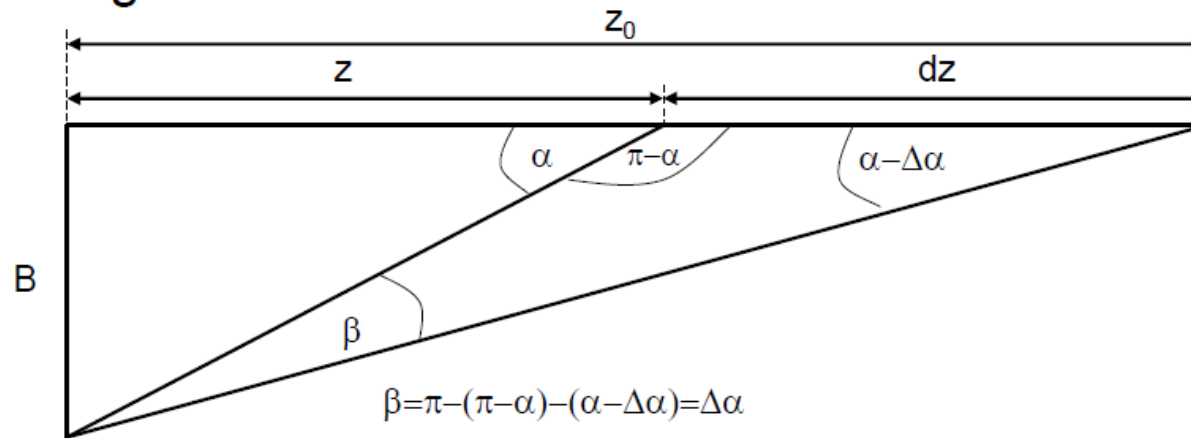
Triangulation: mathematische Näherung (Modell)



$$\Delta z = \frac{\Delta\alpha \cdot z_0^2}{B}$$

Vgl. (9.2)

Herleitung:



es gilt: wenn α klein, dann $\tan \alpha \approx \alpha = \frac{B}{z}$

Ableitung: $\frac{\partial \alpha}{\partial z} = -\frac{B}{z^2}$

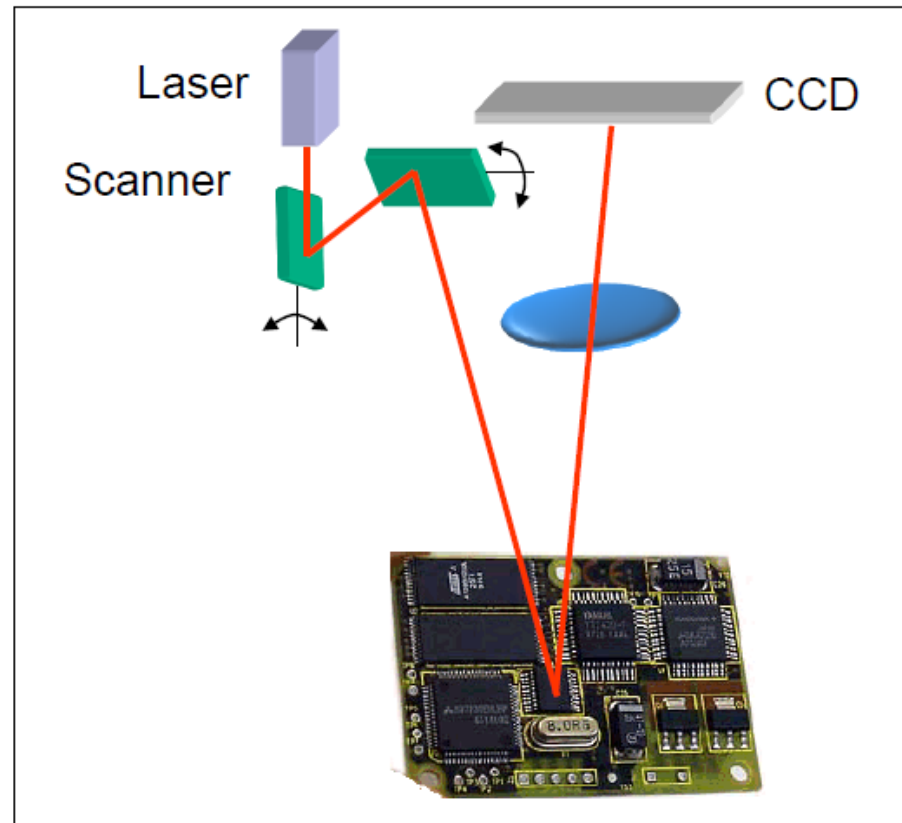
$$\rightarrow \Delta\alpha = -\frac{B}{z^2} dz \quad \rightarrow dz = -\frac{z^2}{B} \Delta\alpha$$

Annahme: dz klein $\rightarrow z=z_0$: $dz = -\frac{z_0^2}{B} \Delta\alpha$

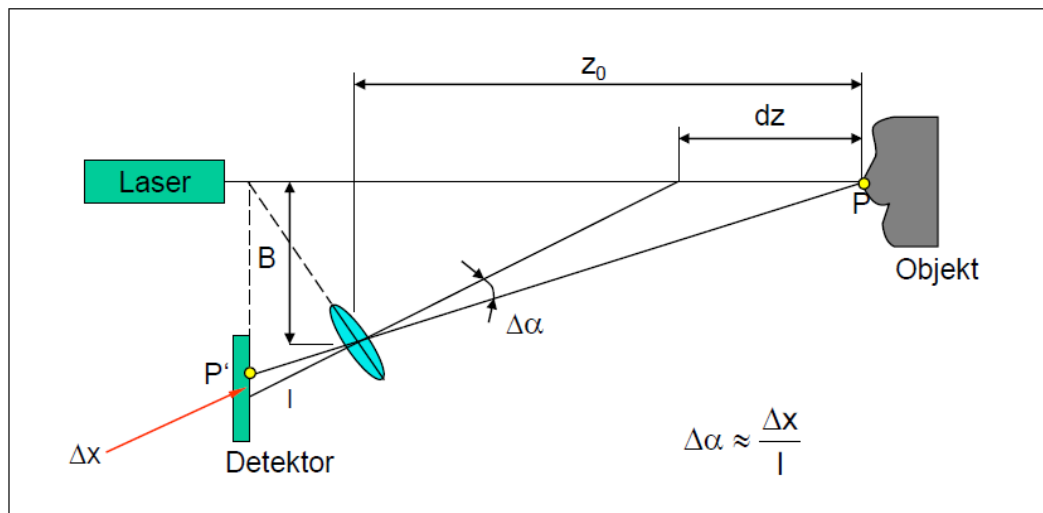
Triangulationssensoren zur Konturvermessung

Varianten:

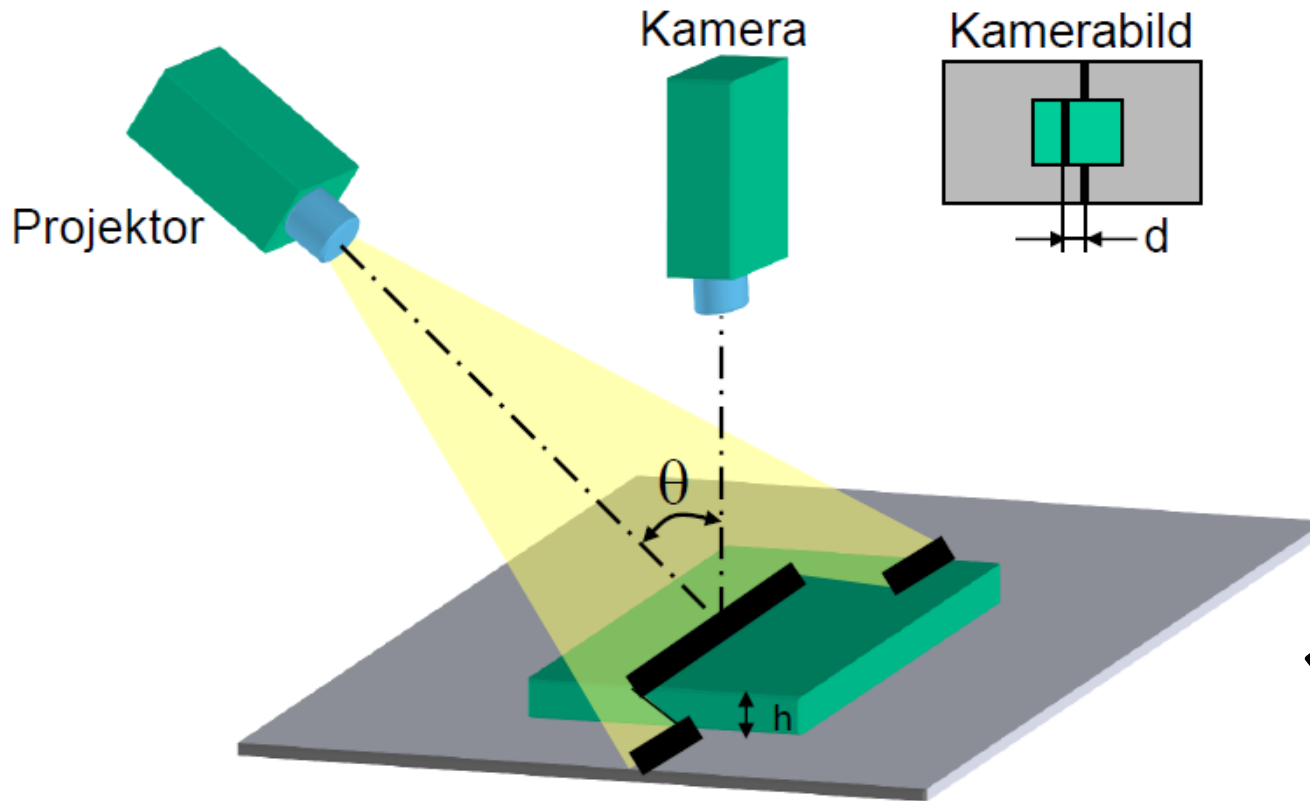
- Relativbewegung von Objekt und Sensor
- Triangulationssensor mit bewegten Spiegeln (Scanner) oder Polygonspiegel



Lichtschranke

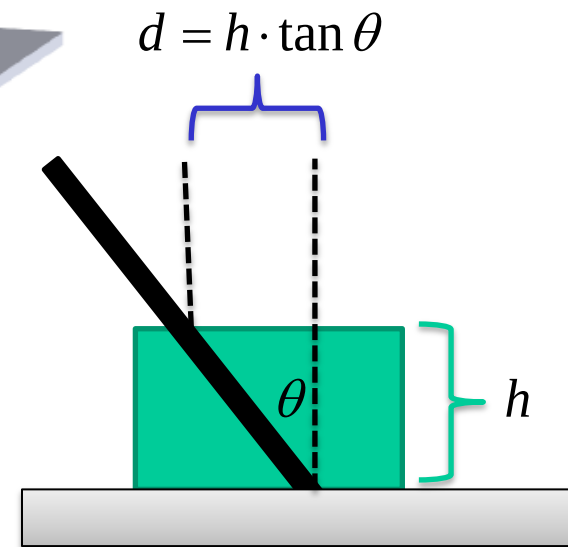


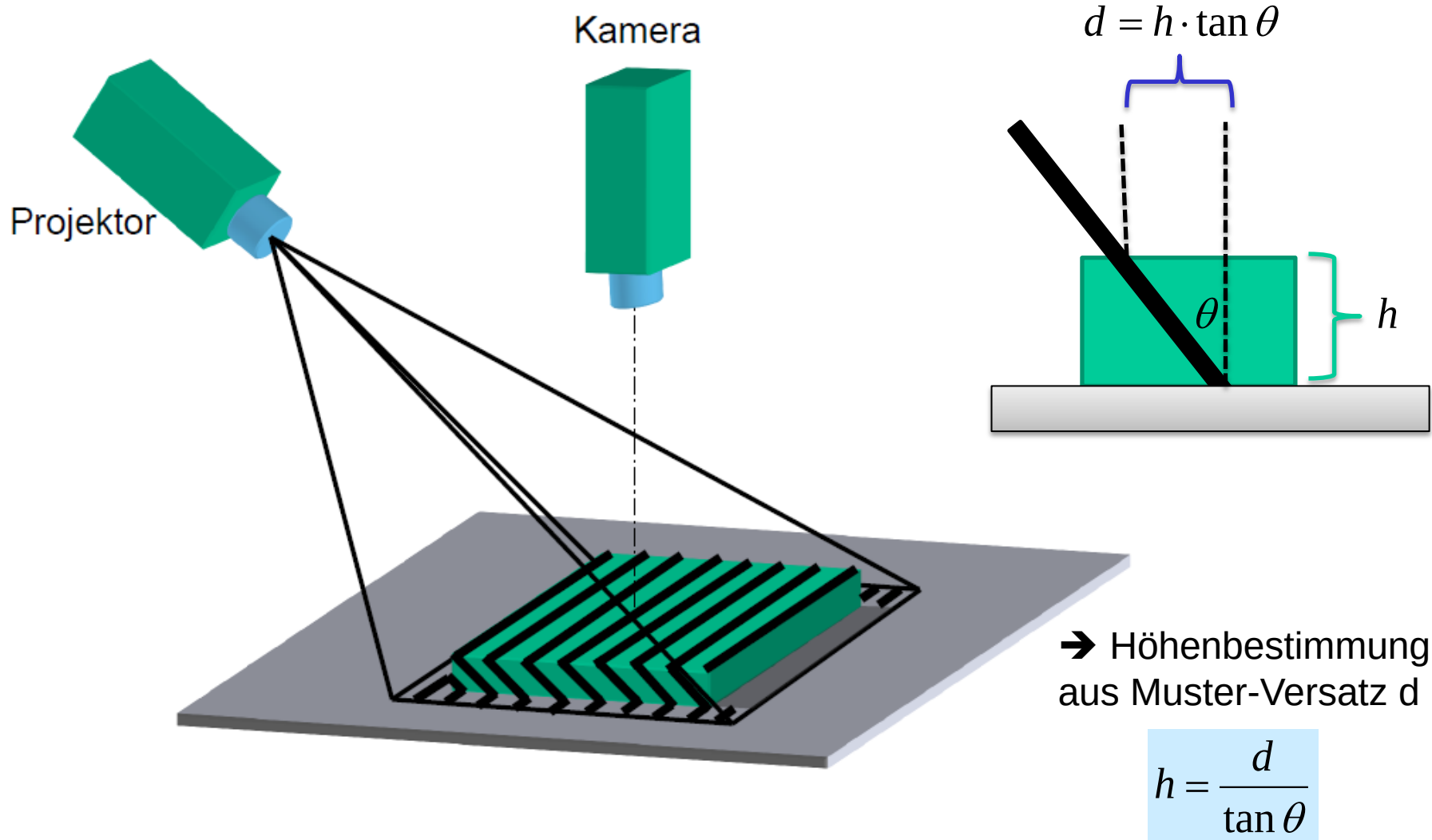
Quelle: Sick

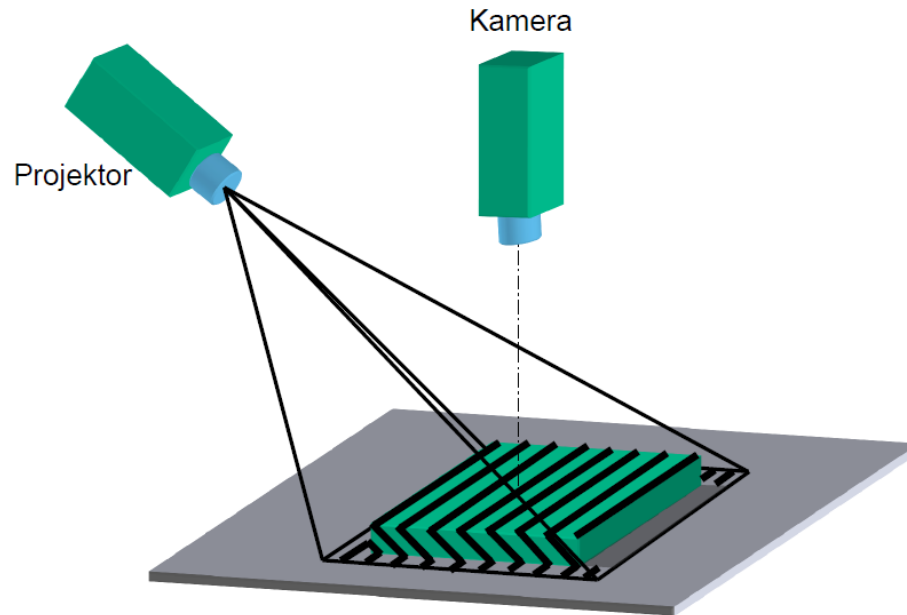


→ Höhenbestimmung
aus Linien-Versatz d

$$h = \frac{d}{\tan \theta} \quad (9.5)$$





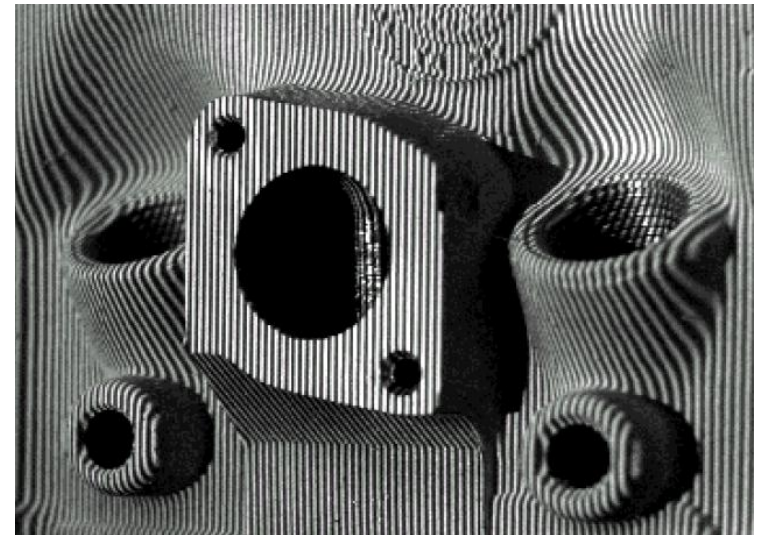


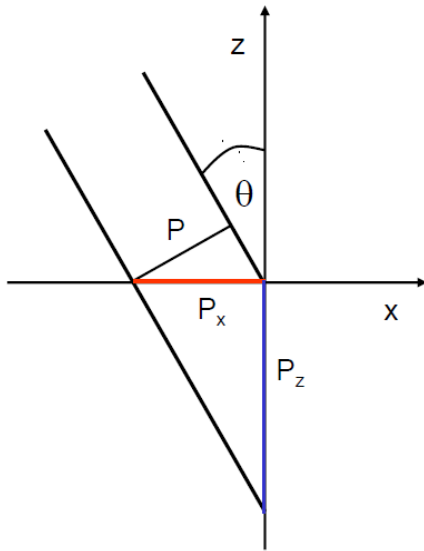
Problem:

Bei komplexeren und ausgedehnten Oberflächen ist θ nicht konstant

Lösung:

θ aus der Höhenberechnung eliminieren





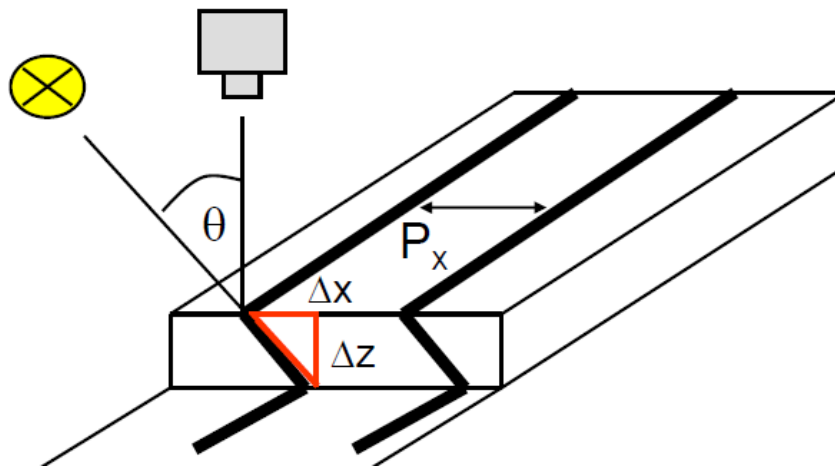
Projektion eines Streifenmusters mit konstanter Periode P .

$$P_x = \frac{P}{\cos \theta}$$

$$P_z = \frac{P_x}{\tan \theta} = \lambda_{\text{syn}}$$

→ θ ist aus der projizierten Periode berechenbar

→ Streifenversatz liefert Höhendifferenz



$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\tan \theta} = \frac{\Delta x}{P_x} \cdot \lambda_{\text{syn}}$$

Problem: Streifenzuordnung
„Fringe-Counting-Problem“

Lösung:

- Streifencodierung
Gray-Code
- Absolutmessung
(synthetische Wellenlängen)

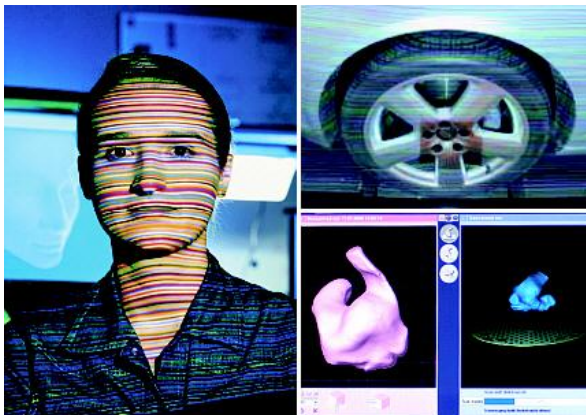
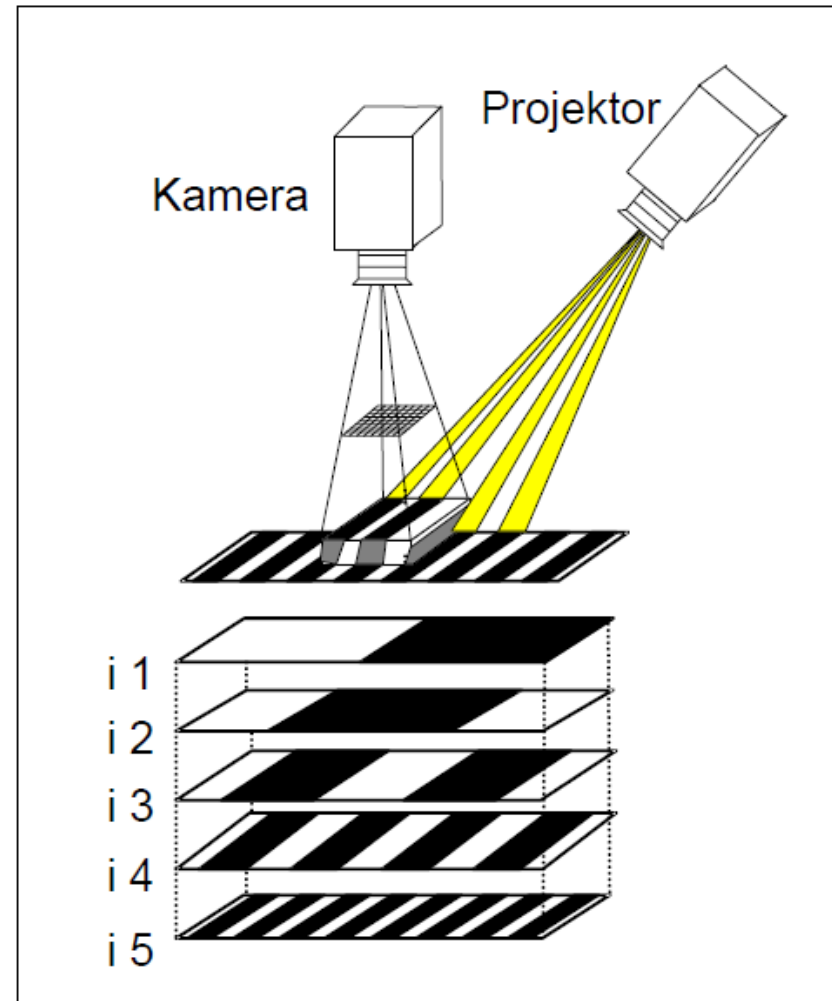


Bild: Siemens



- 9. 3D-Bildgebung und Objekterfassung**
 - 9.1 Grundlagen / Triangulation**
 - 9.2 Stereo-Sehen und Stereo-Mikroskope**
 - 9.3 Optische Vermessung von 3D-Objekten**
 - 9.4 3D-Visualisierungsmethoden**

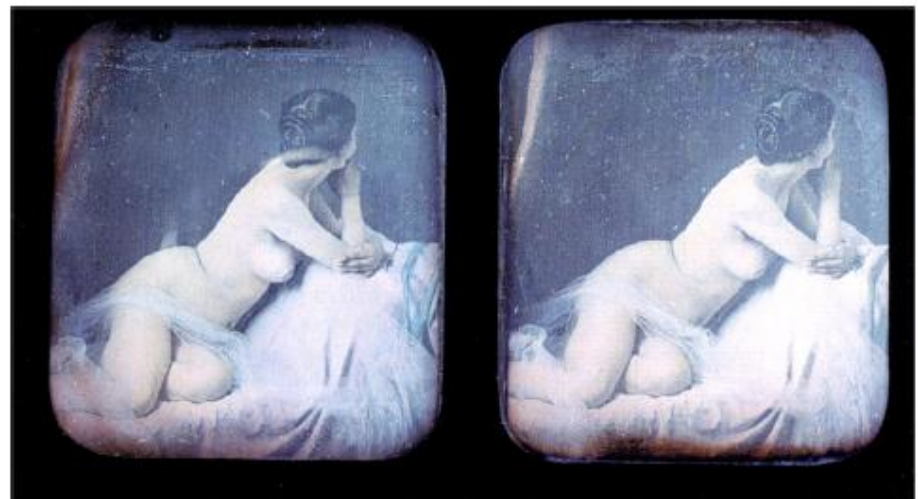
Problem:

Datenspeicherung auf 2d-Medien (z.B. Fotografie)

3d-Daten liegen über Messverfahren vor

➔ Wie kann aus den Daten wieder ein sichtbares 3d-Bild erzeugt werden ?

Prinzip: Rechtes und linkes Auge müssen unterschiedliche Bilder „sehen“



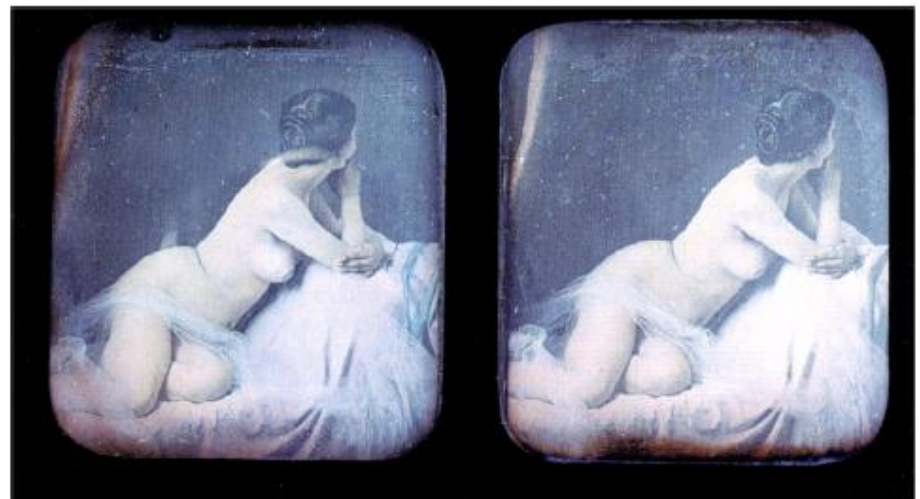
Einfache 3D-Bildgebung



Stereofotoapparat, Carl Zeiss Jena, 1880



Stereoflektoskop, Voigtländer Nr. 65946



Zeiss - Cinemizer

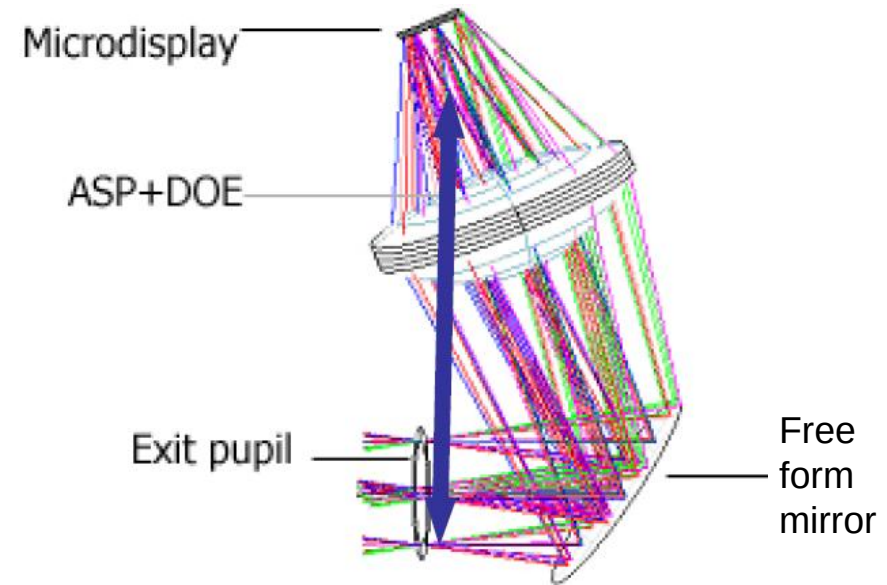
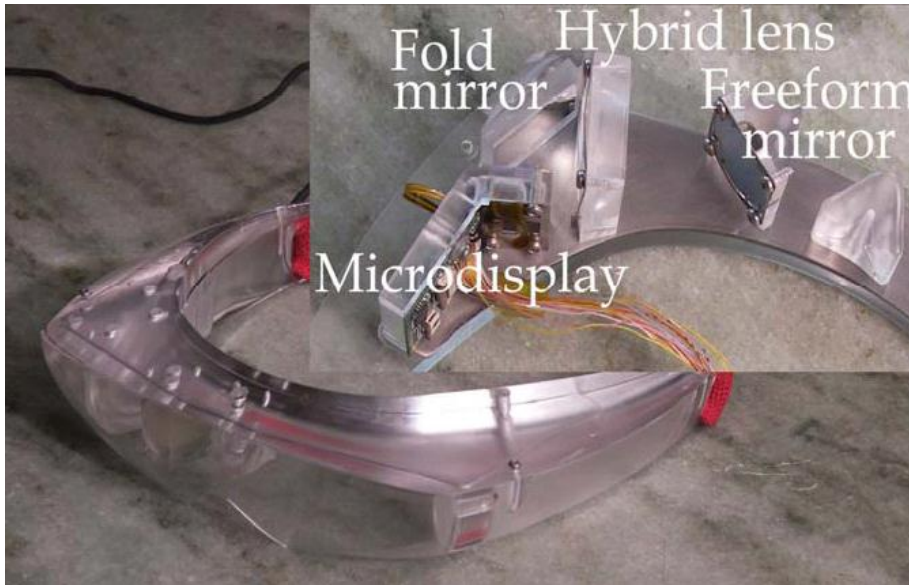
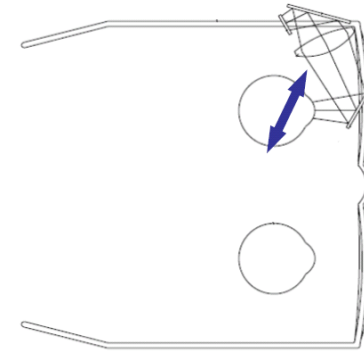
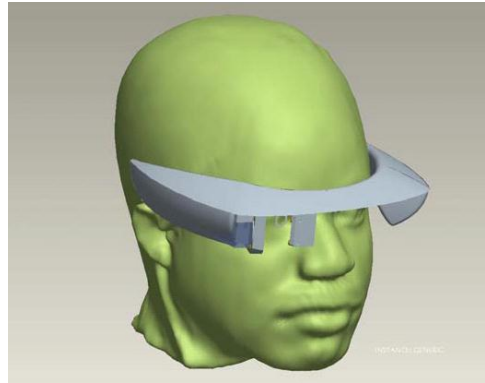


K. Thompson et al.,
The Coming Generation of Head-worn Displays (HWDs), OSA Annual Meeting 2009

Head-Worn Displays

Design-Problem:

- Wenig Platz
- Komplexe Geometrie
- ➔ Freiformflächen

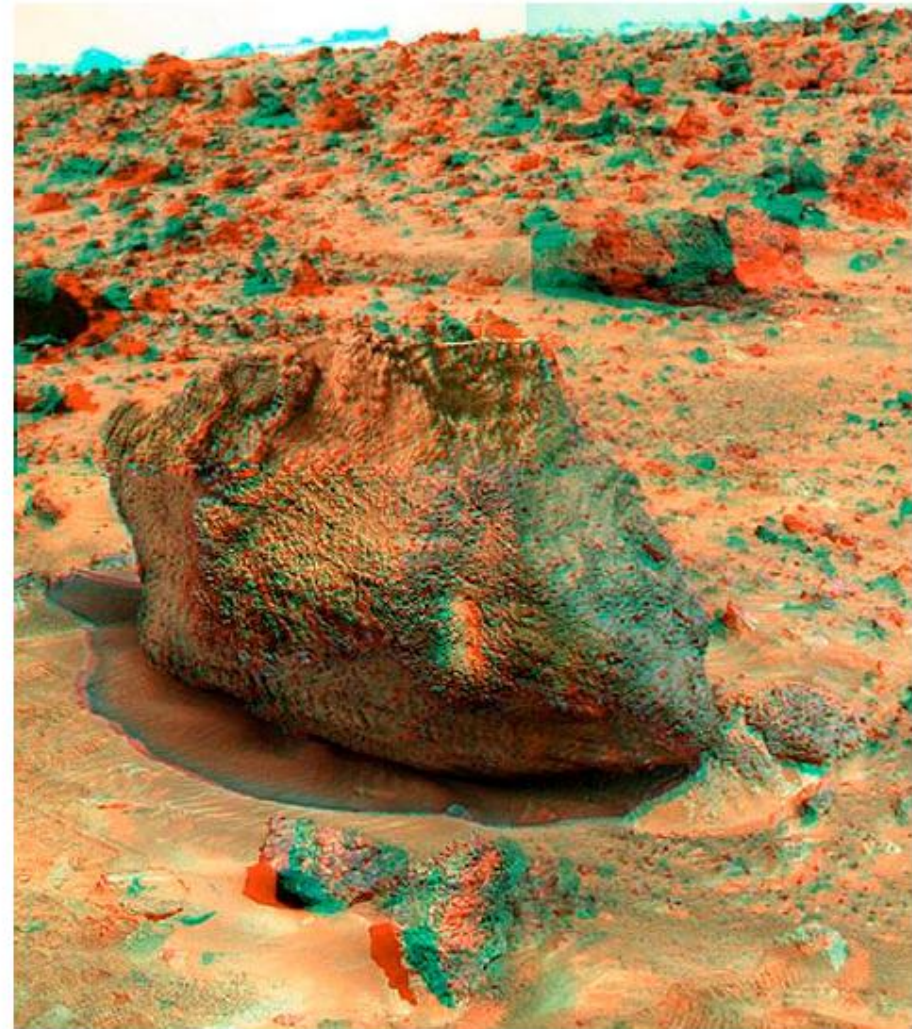


O. Cakmakci, J. Rolland,
Design and fabrication of a dual-element off-axis near-eye optical magnifier, Opt. Lett. 32 (2007), 1363-1365

Anaglyphe eines der Mars-Oberfläche

Anaglyphenverfahren:

- **1853** Wilhelm Rollmann (1821-1890)
- stereoskopische Halbbilder werden in Komplementärfarben eingefärbt (z.B. rot-grün, rot-blau)
- Überlagerung & Betrachtung mit Farbfilterbrille
- Rest erledigt Gehirn



© <http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Anaglyphs?uselang=de>

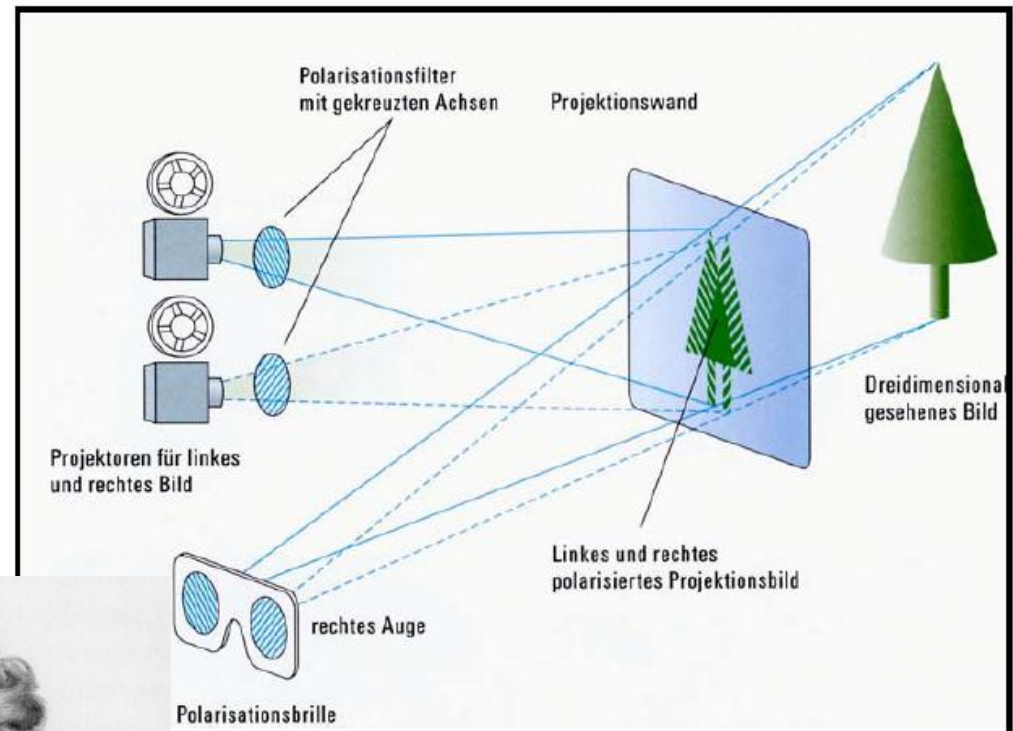
Halbbilder über Polarisation



3D-Kino:

Heute meist über Polarisation:

- linear
- zirkular



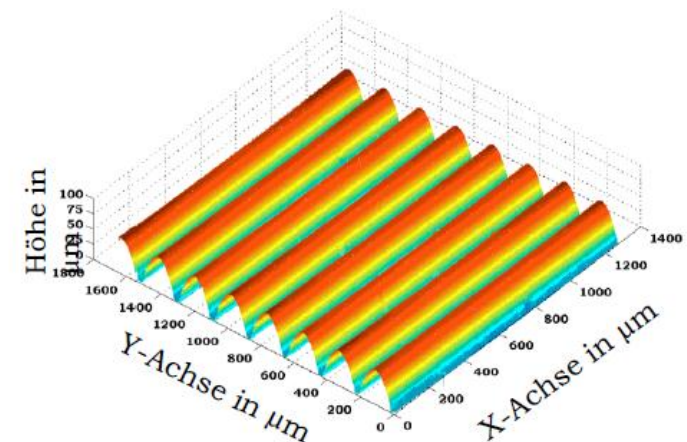
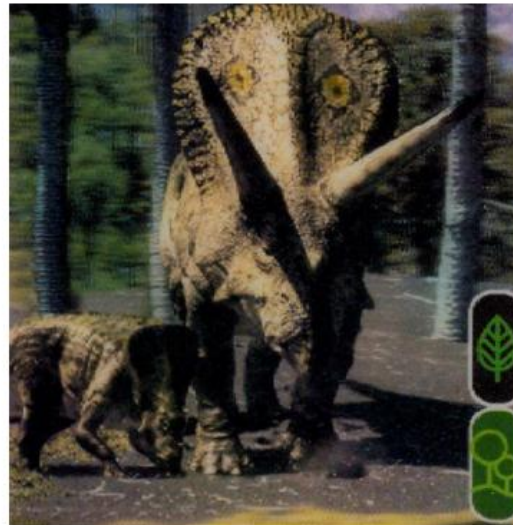
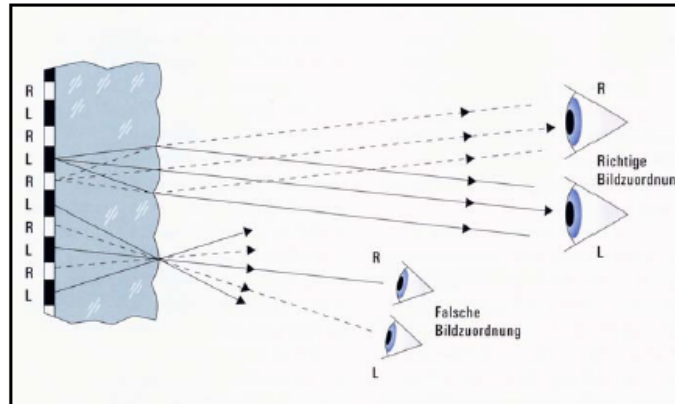
Schutterbrille:



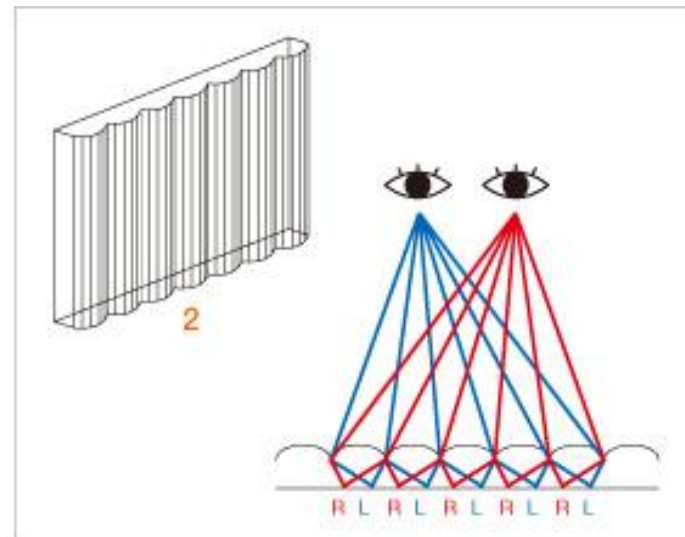
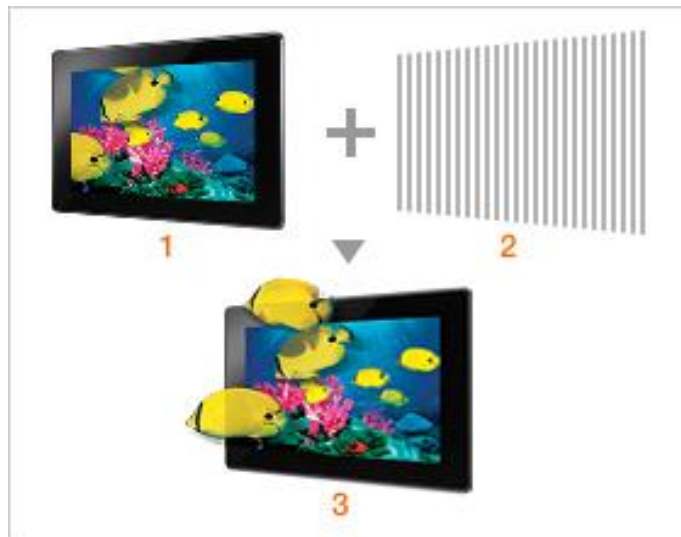
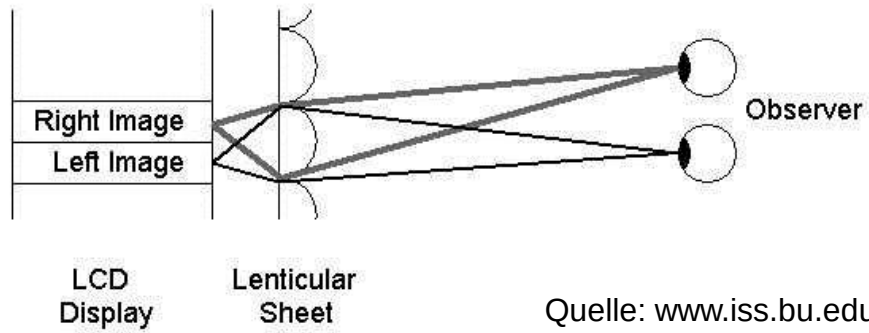
3D mit bloßem Auge: **autostereoskopische Bilder**

Linsenrasterverfahren

- **1896** A. Berthier
- Parallax-Stereogramm
- stereoskopische Halbbilder werden in Liniensystem zerlegt
- Vorschaltung eines geeigneten Rasters



Beispiel: Lentikular-Monitor



Quelle: www.fujifilm.com