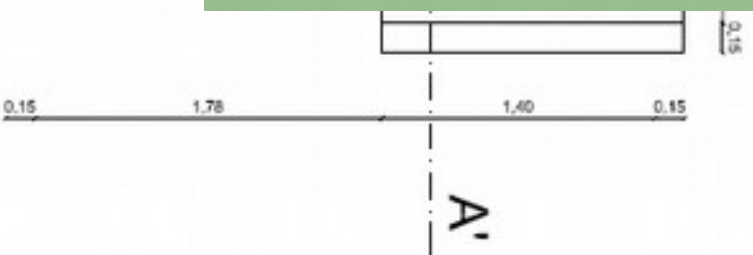
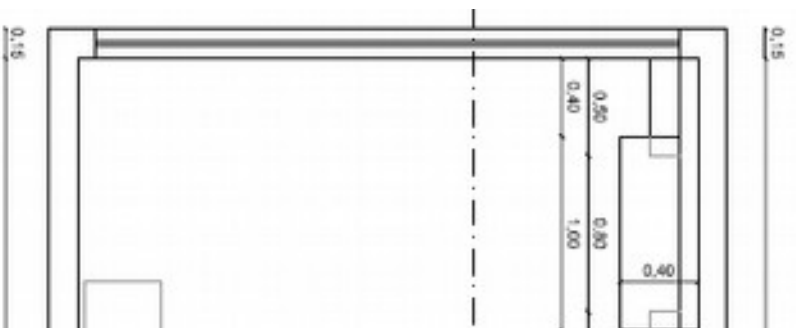
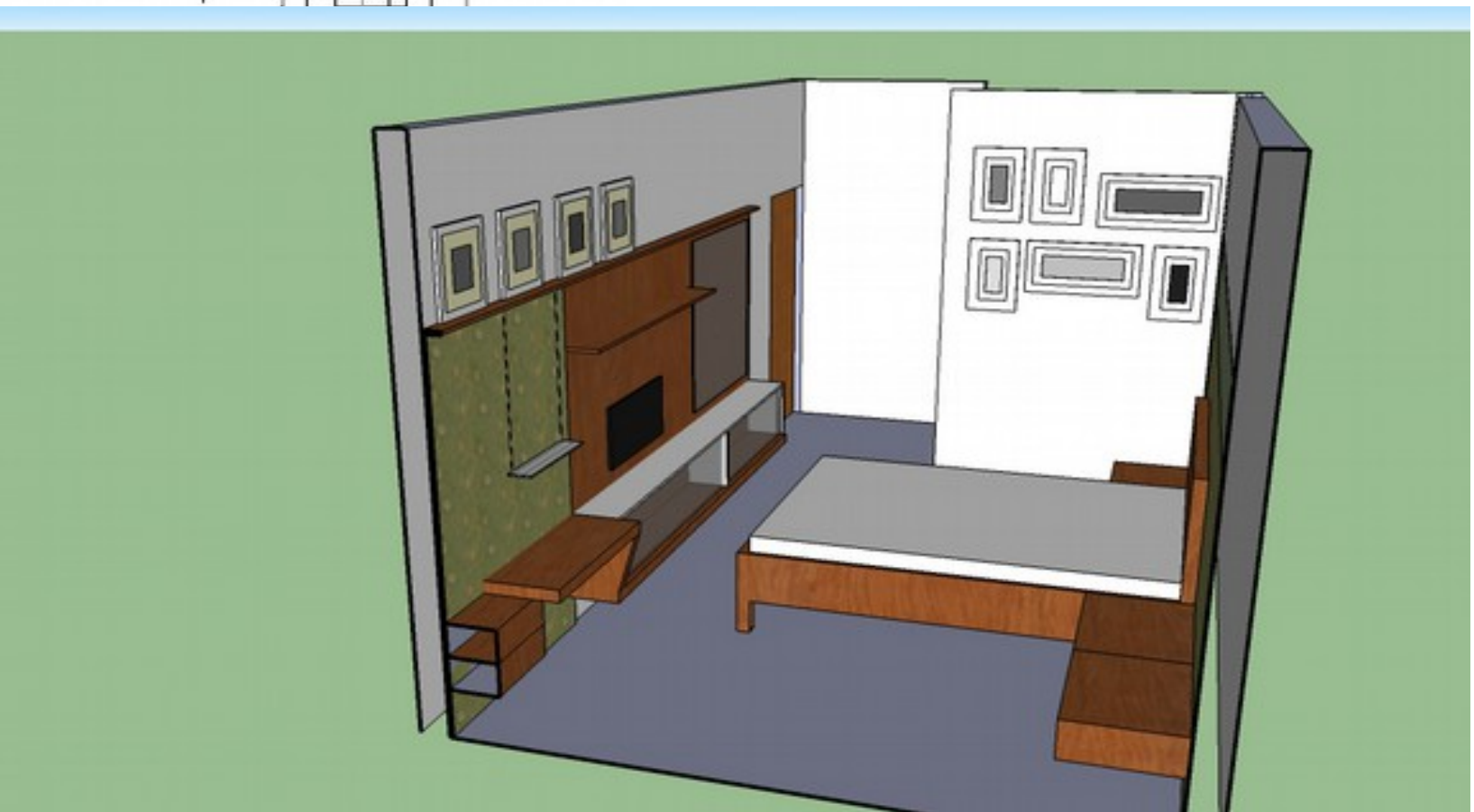


Bildverarbeitungssysteme in der industriellen Anwendung - **3D Erfassung**

T. Haist, C. Kohler WS 2013/14

3D Erfassung in verschiedensten Skalen

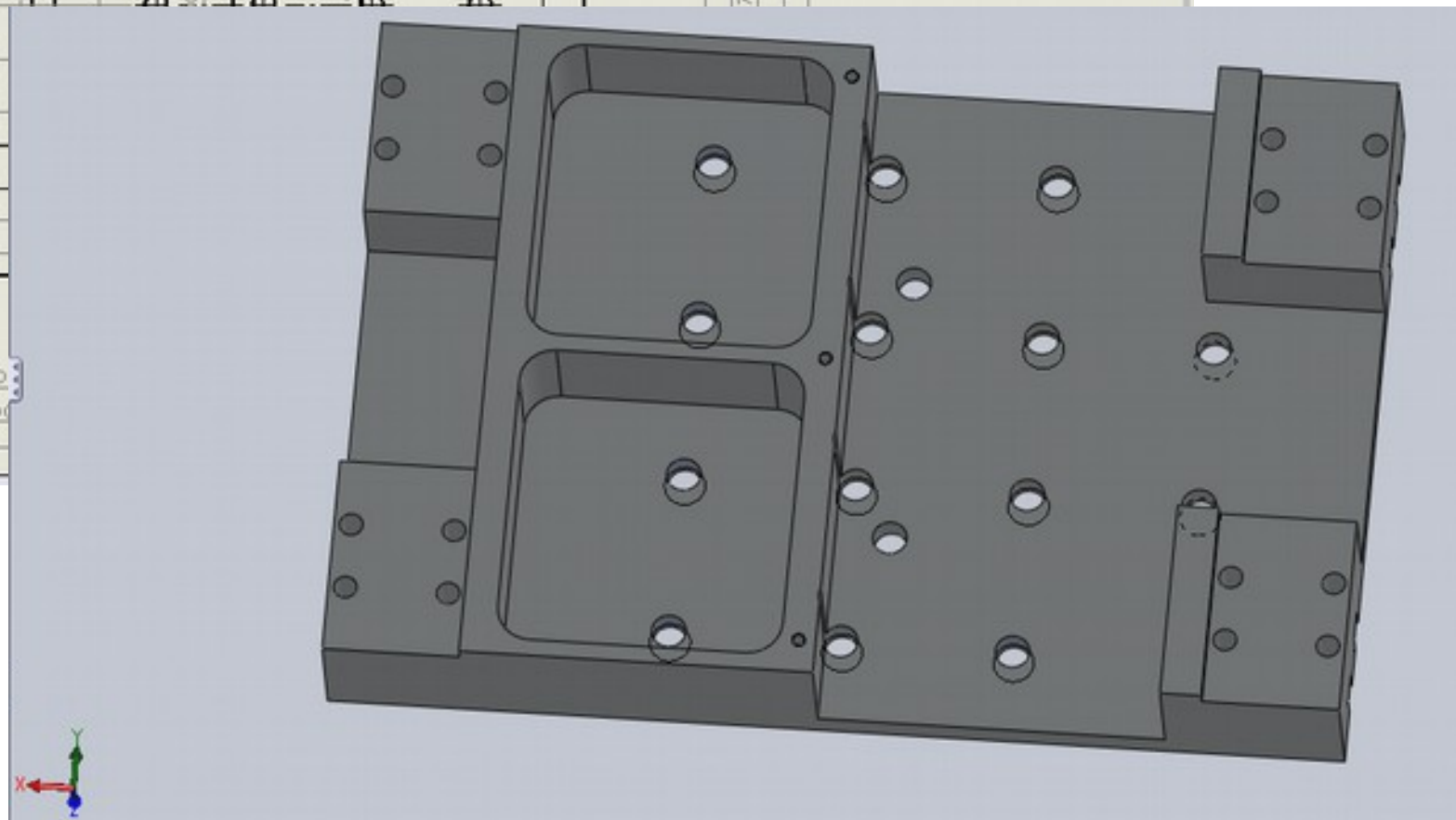
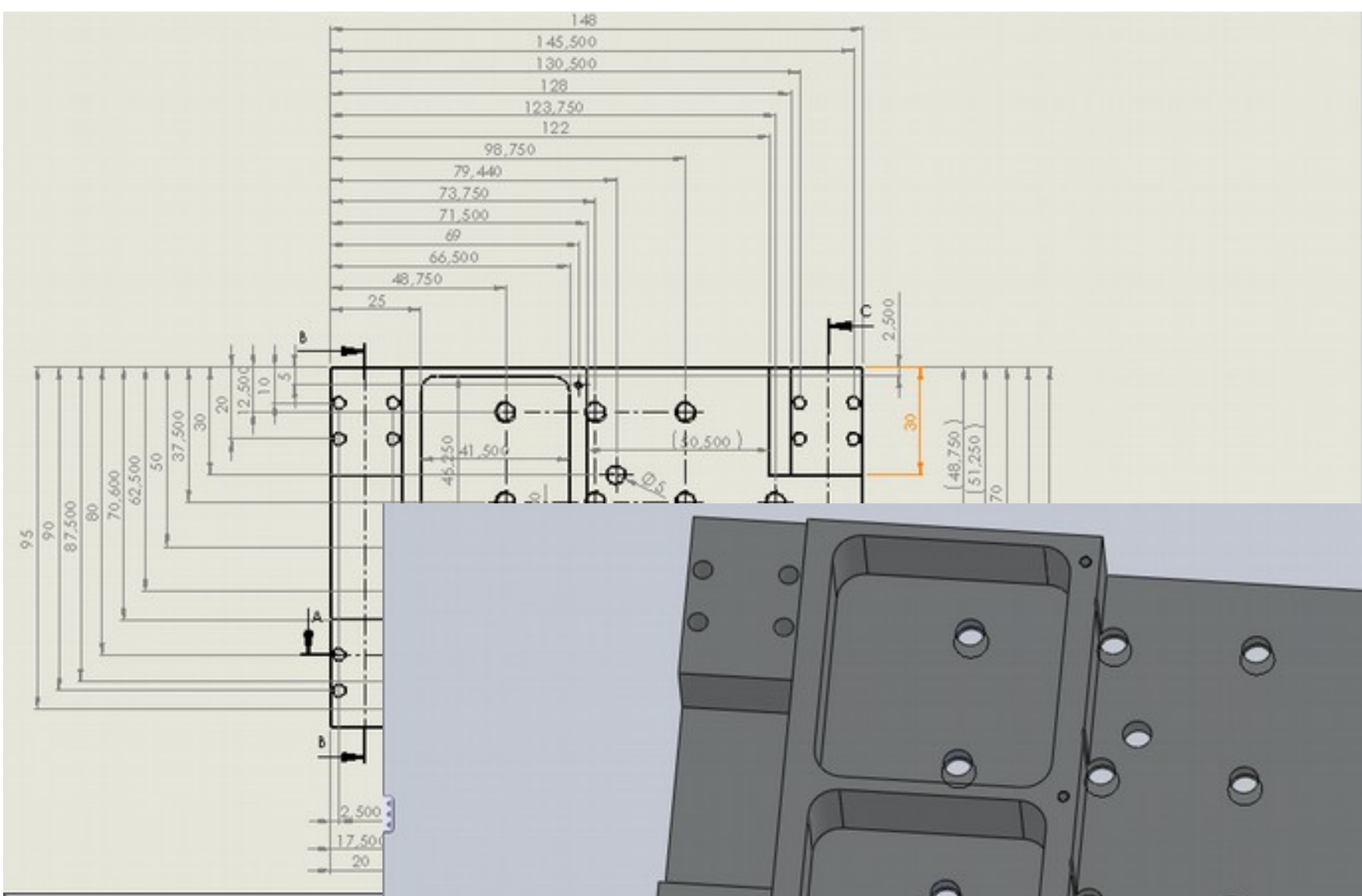


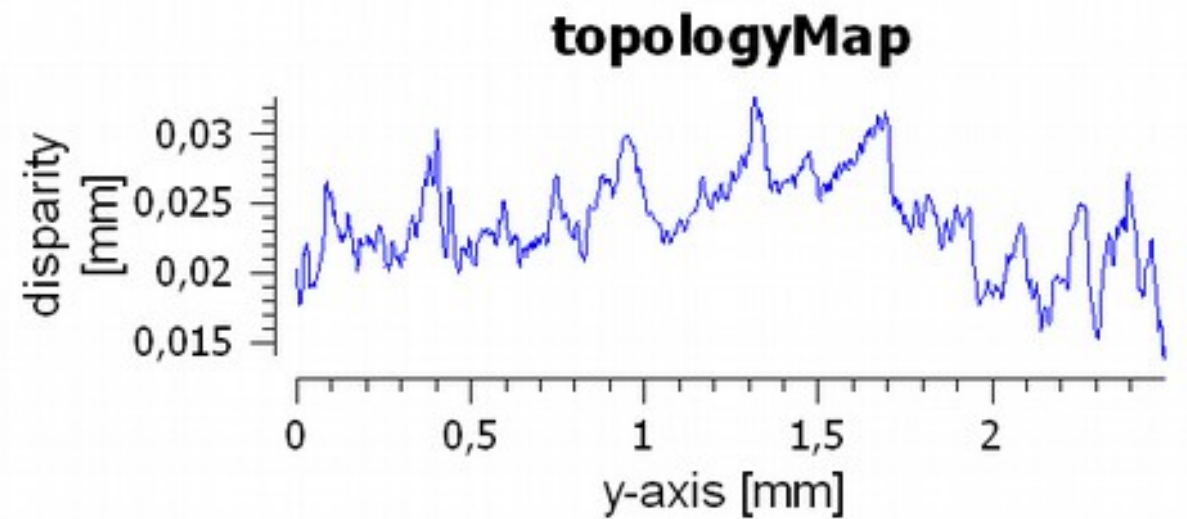
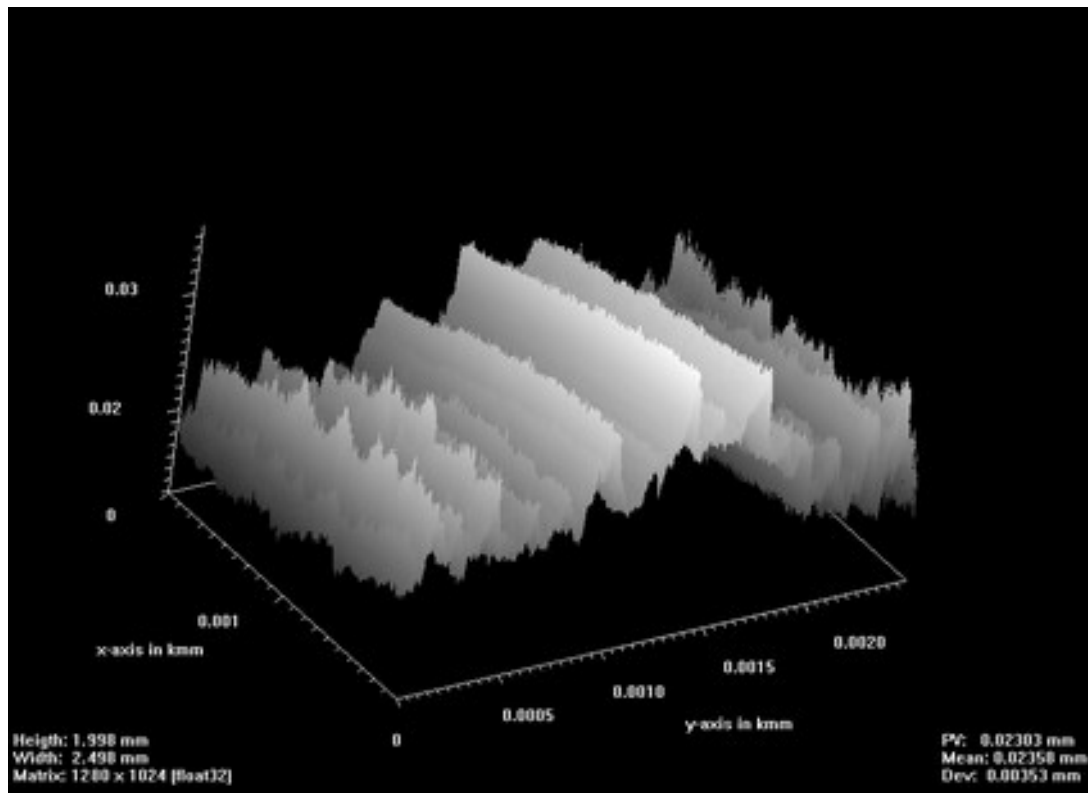


B

A'

Planta Baixa
Esc.: 1-50



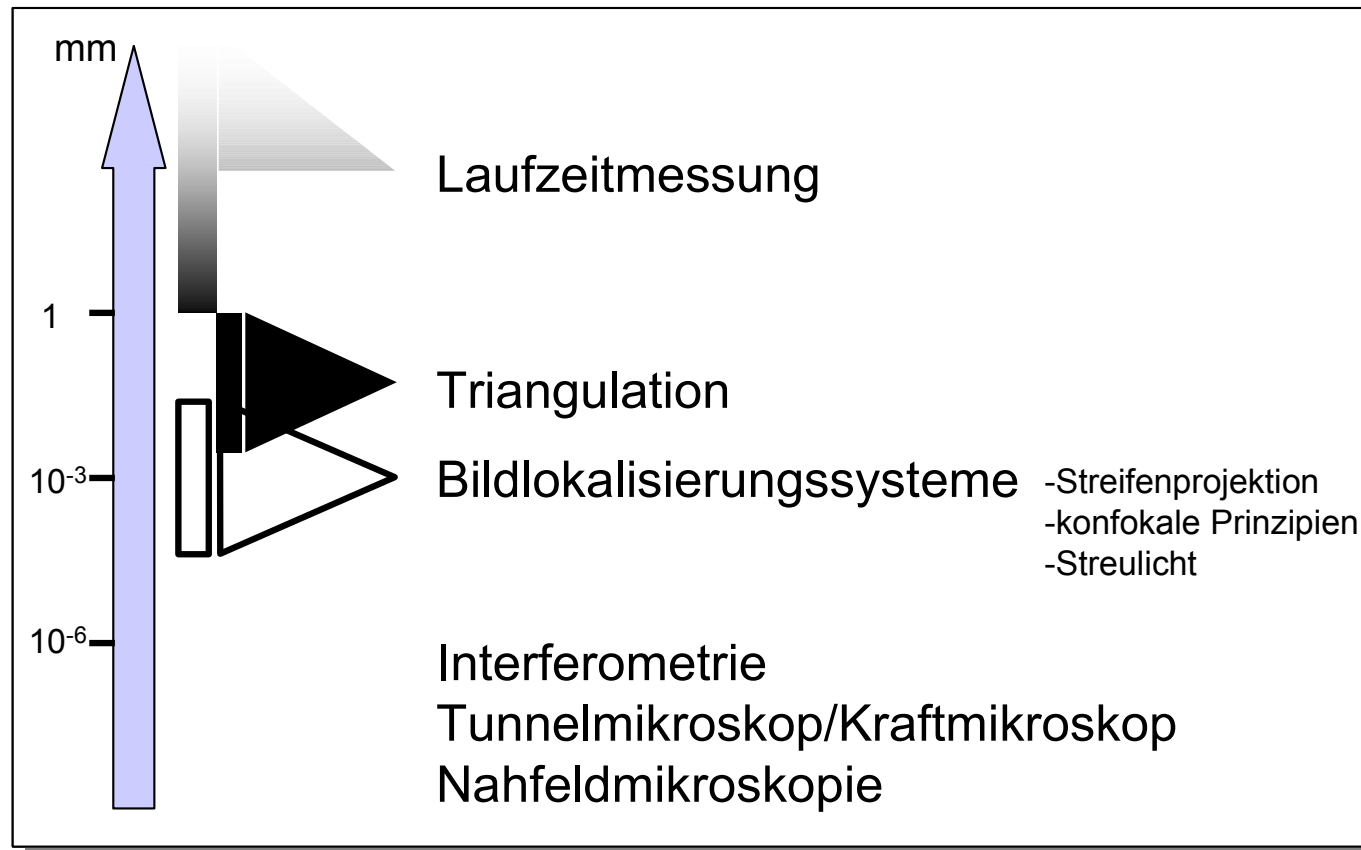


3D Messverfahren

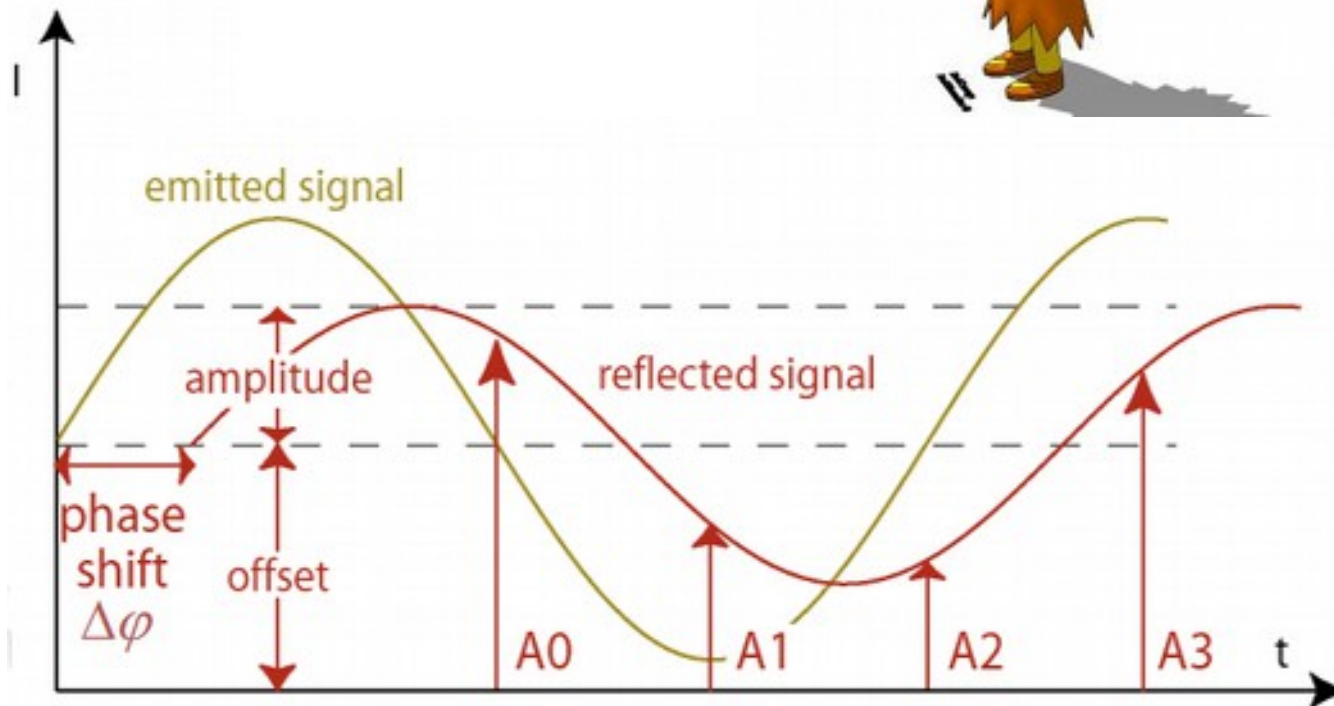
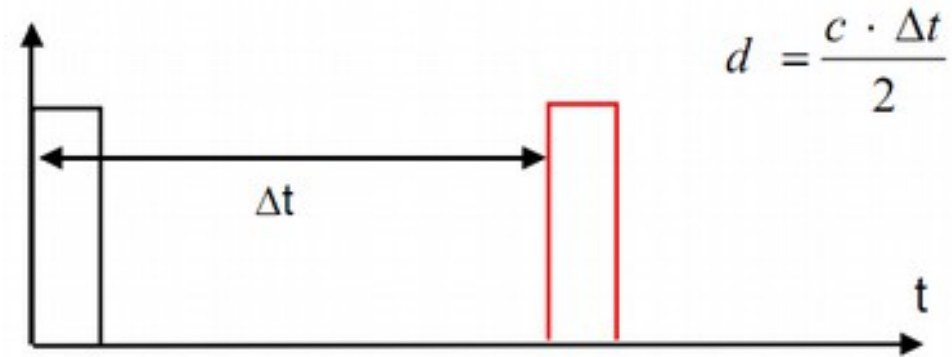
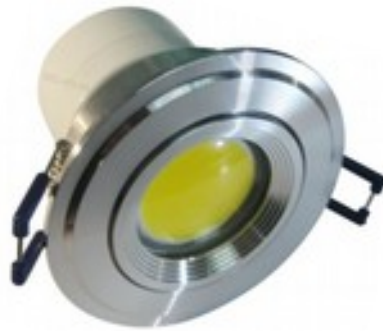
- Laterale und Z-Auflösung sind meist entkoppelt, ein Faktor 10 zwischen Z- (besser) und lateraler (schlechter) Auflösung ist nicht unüblich
- 4 grundlegende Messprinzipien gebräuchlich:
 - **Laufzeitverfahren** (TOF, PMD-Kamera)
 - **Triangulationsbasierte Verfahren** (Photogrammetrie, Lasertriang., Streifenprojektion)
 - **Fokusvariierende Verfahren** (Kontrast basiert, konfokal)
 - **Interferometrische Verfahren** (kurzkohärente- / Weißlicht-Interferometrie)

Prinzipien zur 3D Erfassung

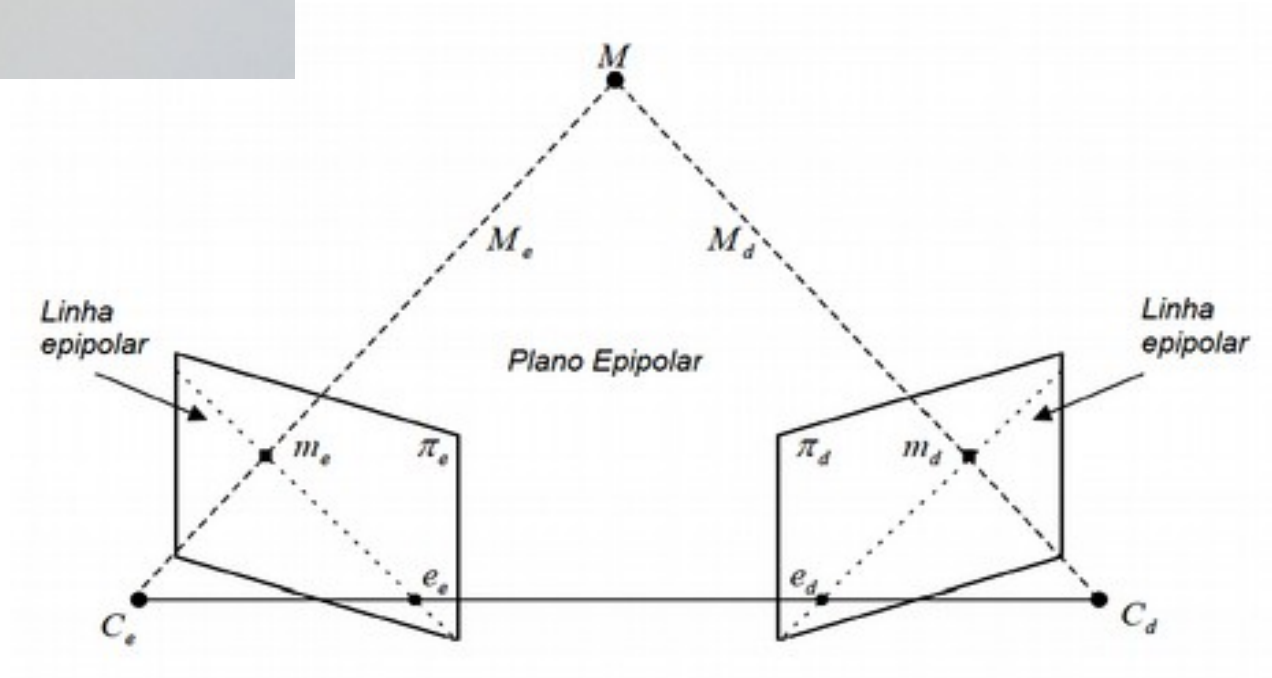
- Laufzeitverfahren (Time Of Flight)
- Triangulation
- Fokusverfahren
- Interferometrie



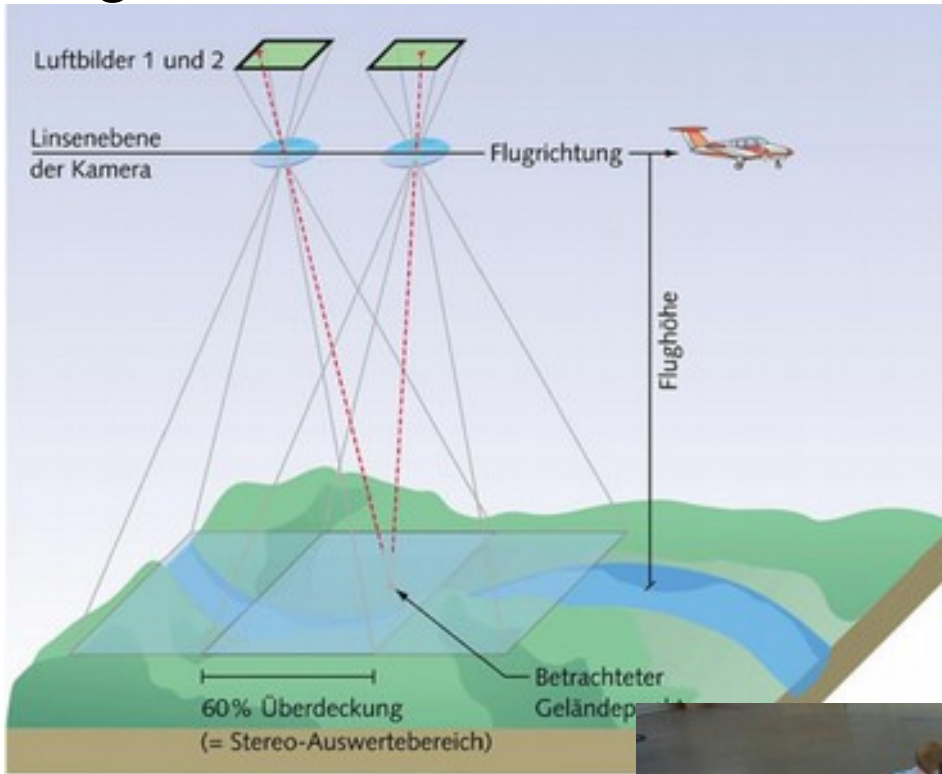
Time of flight



Photogrammetrie



Photogrammetrie

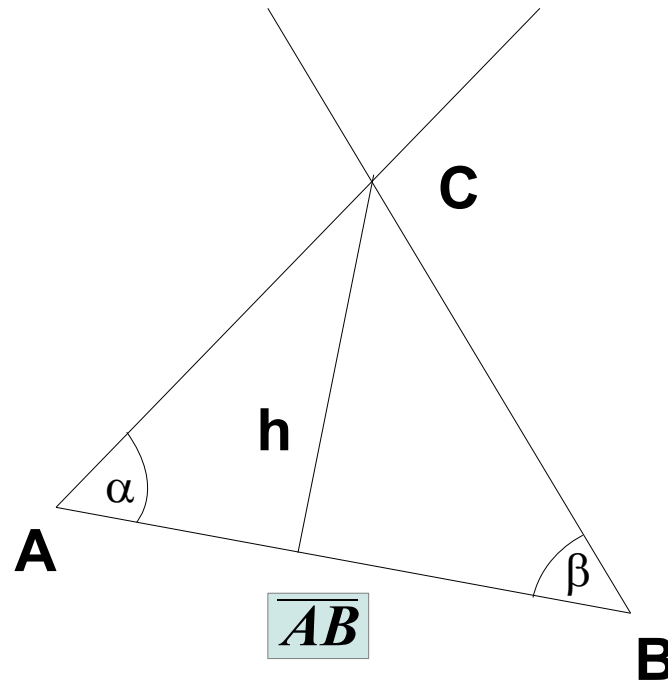


Triangulation

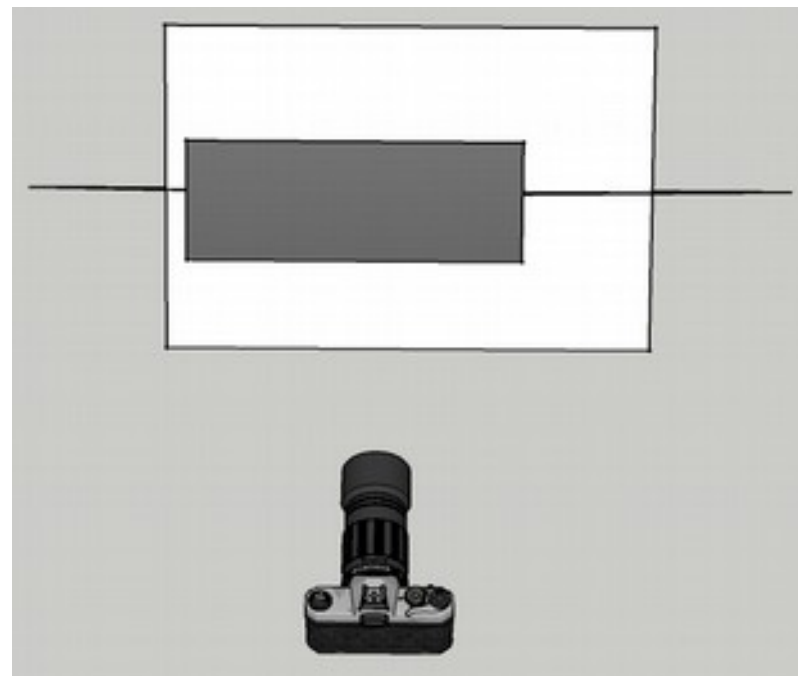
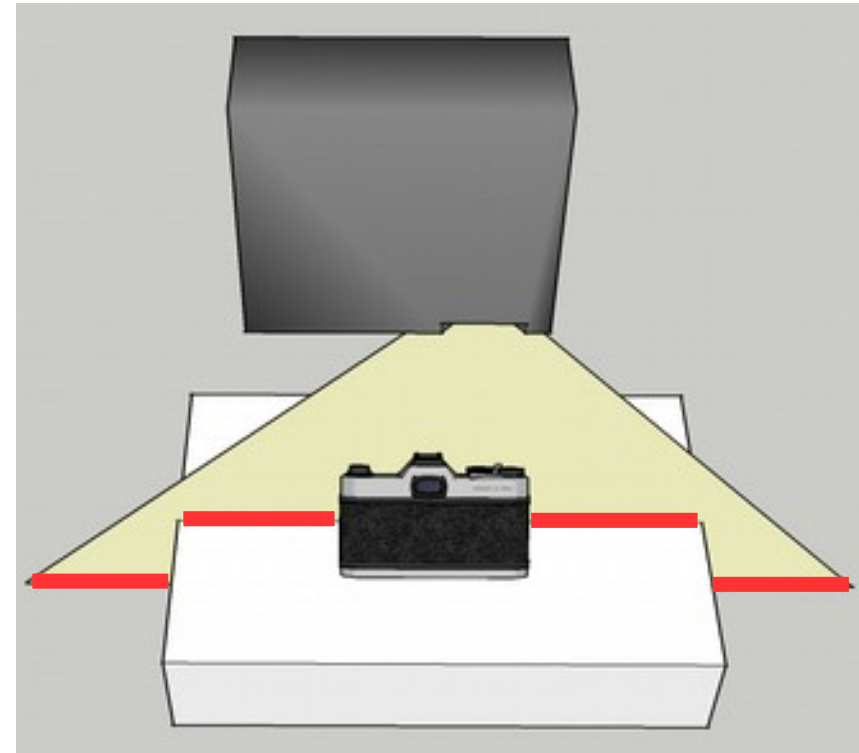
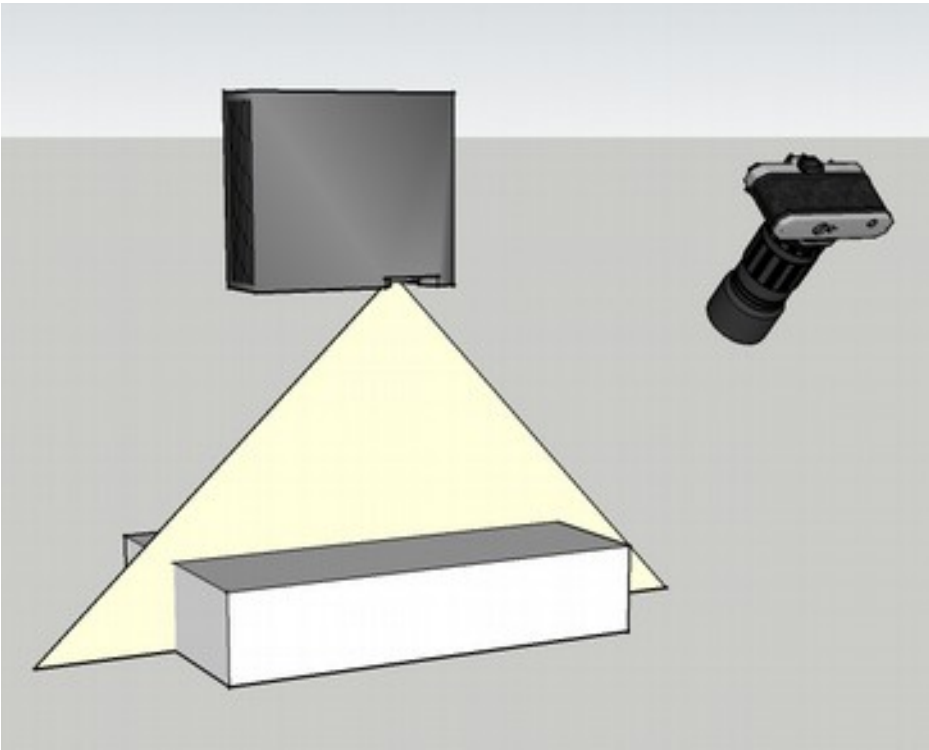
- Zur Bestimmung größer Längen (Landvermessung) ist es günstiger Winkel anstatt Längen zu verwenden
- Durch zwei Winkel und die Länge einer Dreiecksseite ist ein Dreieck vollständig bestimmt

geg: $\overline{AB}$, α , β

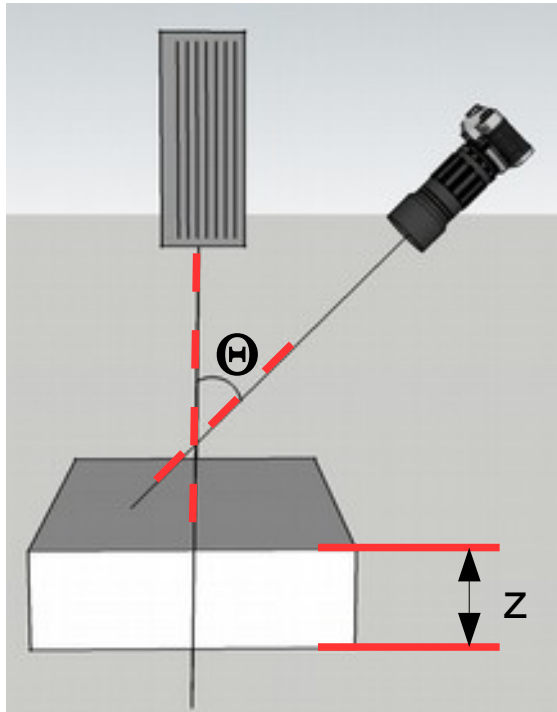
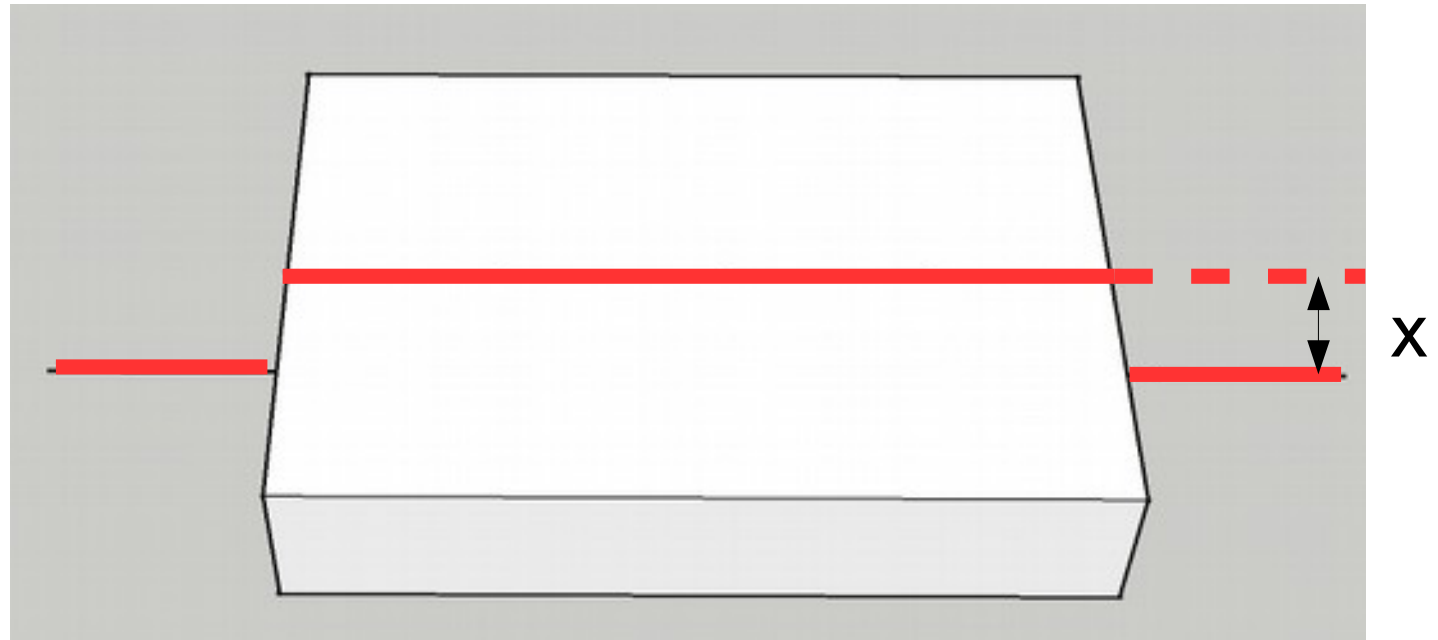
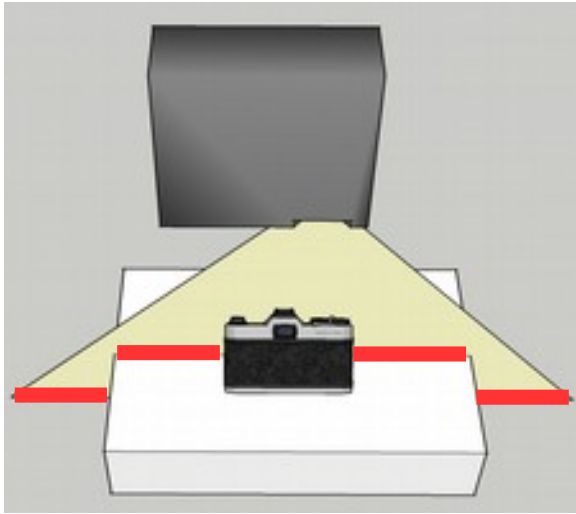
ges: h



Triangulation (Laser / Lichtschnitt)

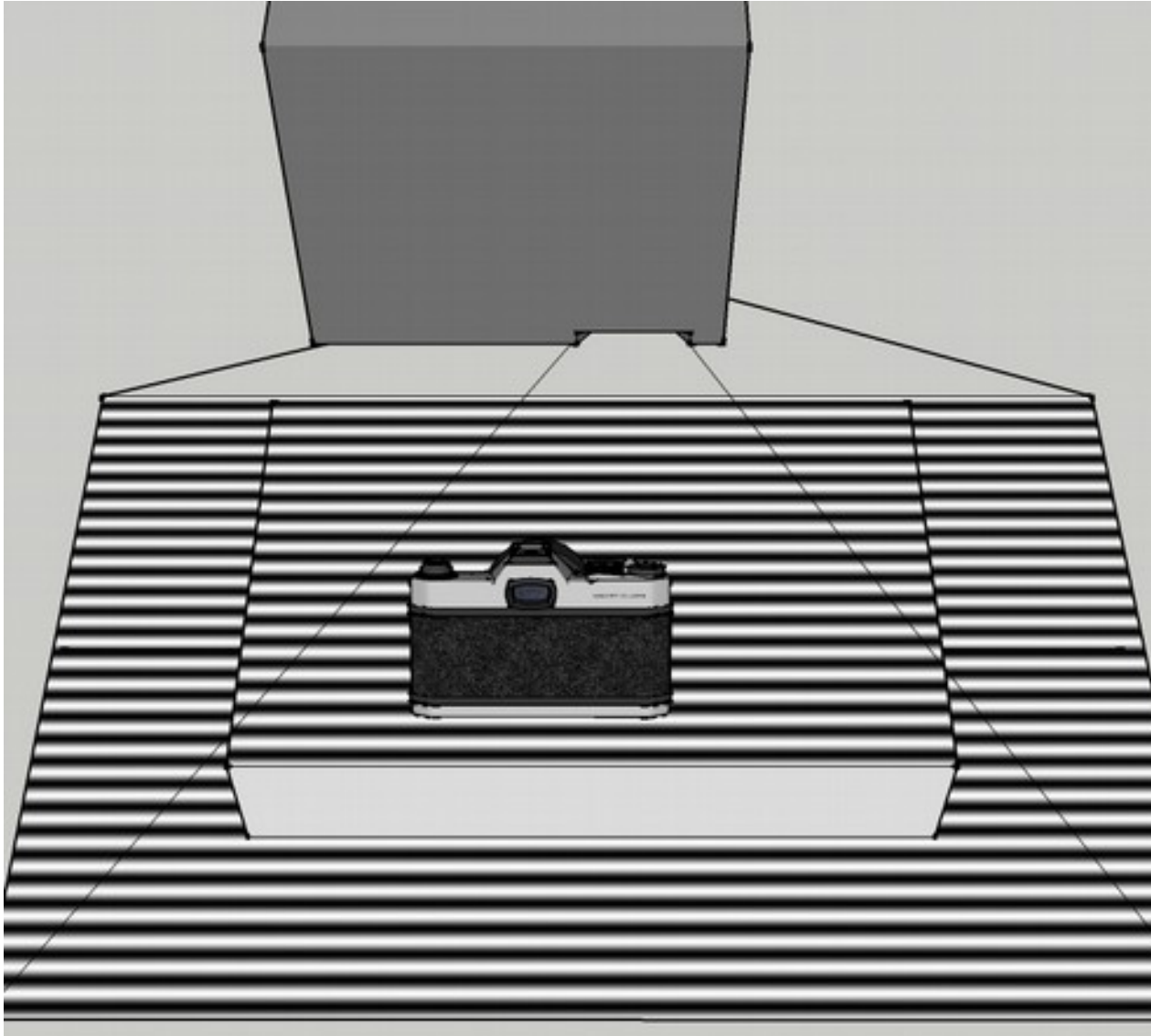


Triangulation (Laser / Lichtschnitt)



$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\sin \theta}$$

Triangulation (Streifenprojektion)



$$\lambda_{syn} = \frac{p}{\tan \theta}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{p} \lambda_{syn}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \lambda_{syn}$$

Triangulation (Streifenprojektion)



$$\lambda_{syn} = \frac{p}{\tan \theta}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{p} \lambda_{syn}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \lambda_{syn}$$

Streifenprojektion - Phasenbestimmung

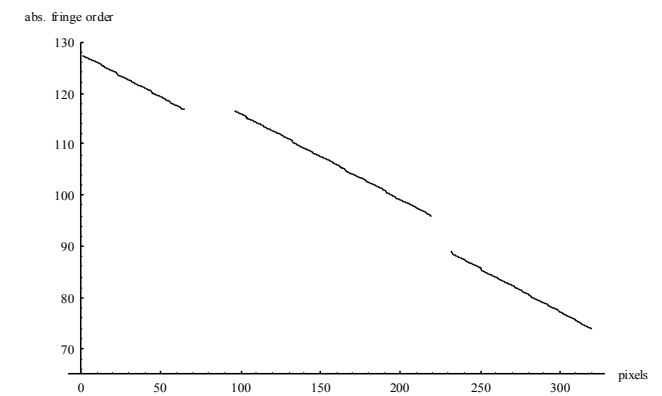
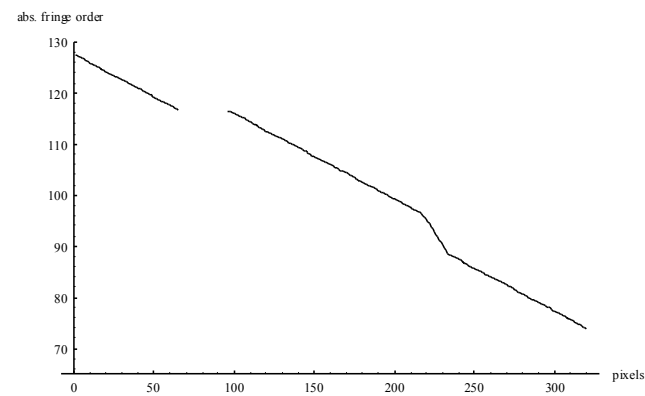
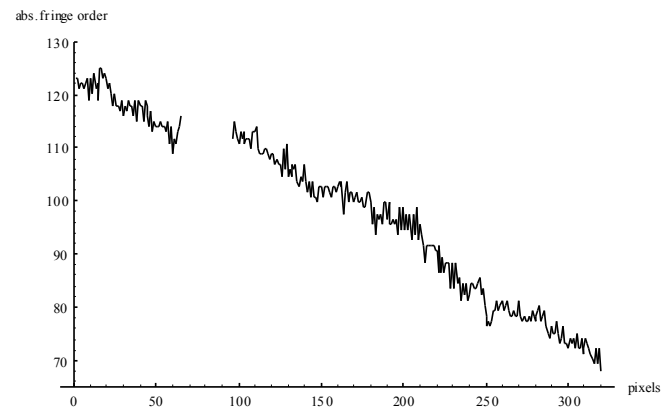
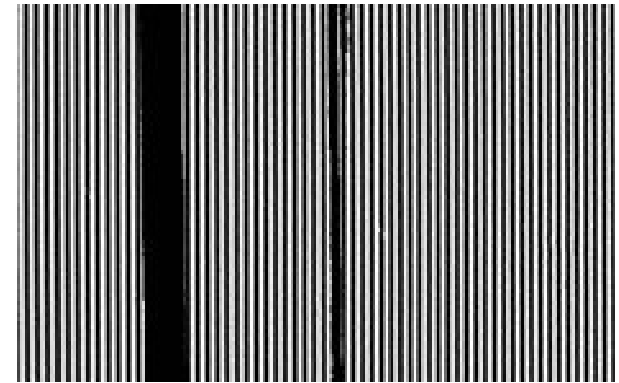
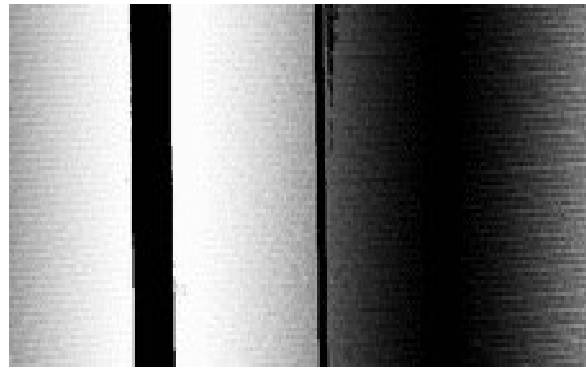
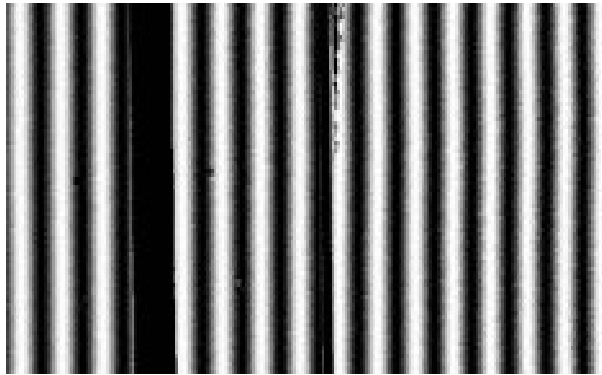
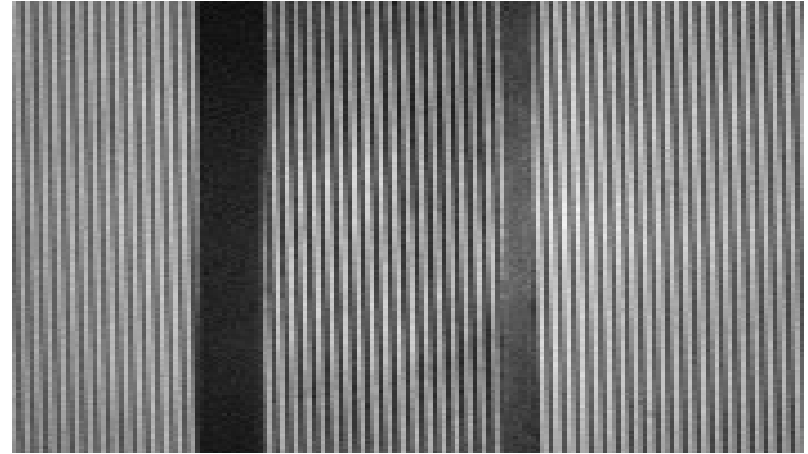
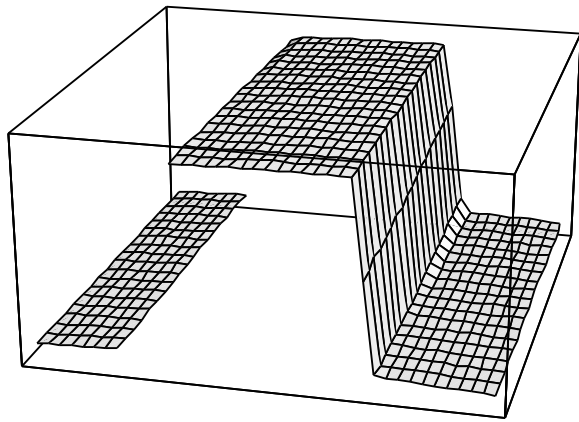
- Es werden bei der Streifenprojektion die aus der Interferometrie bekannten Techniken zur Bestimmung der lokalen Phase eingesetzt:
 - Fouriertransform (Takeda, Carrierfringes, ...)
 - Phasenschiebung (3 – n Bilder)
- Zur Bestimmung der Streifenordnung gibt es mehrere Möglichkeiten:
 - Numerische Verstetigung (phase unwrapping)
 - Mehrwellenlängentechniken (s. Heterodyn Verfahren der Interferometrie)
 - Kombination mit absolut kodierten Mustern (z.B. Gray-Code)

Streifenprojektion - Phasenschiebung

- Ab minimal drei Bildern können Phasenschiebetechniken angewendet werden
- Üblicherweise werden 4, 5 oder mehr Bilder verwendet
- Beispiel Phasenberechnung für 4 Bilder (Carré-Algorithmus)

$$\Phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)} \right)$$

Streifenprojektion - Streifendichte

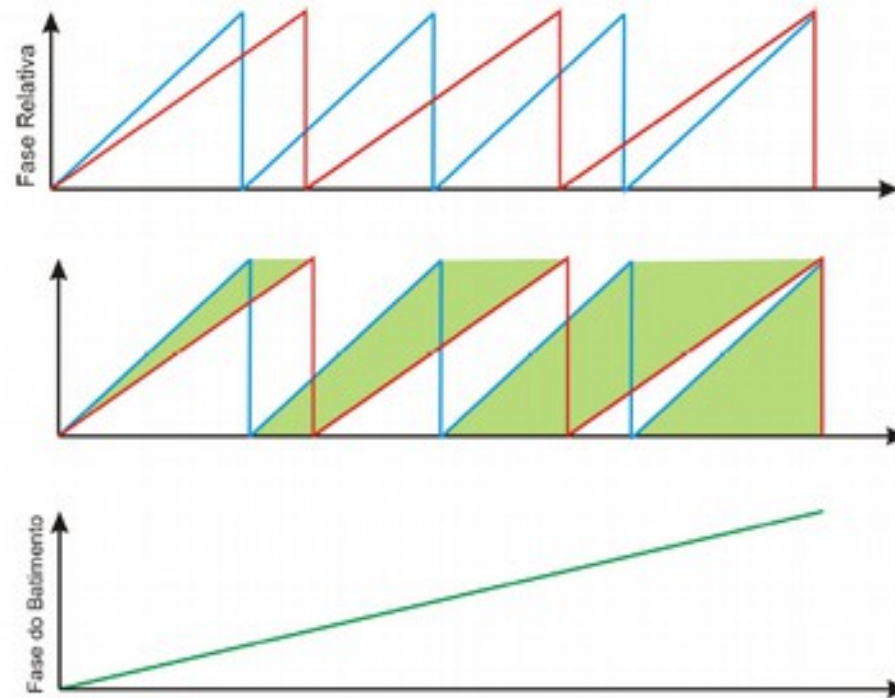


Streifenprojektion - Zweiwellenlängen

Beleuchtung mit zwei Wellenlängen, es entsteht eine synthetische Wellenlänge mit größerem Eindeutigkeitsbereich:

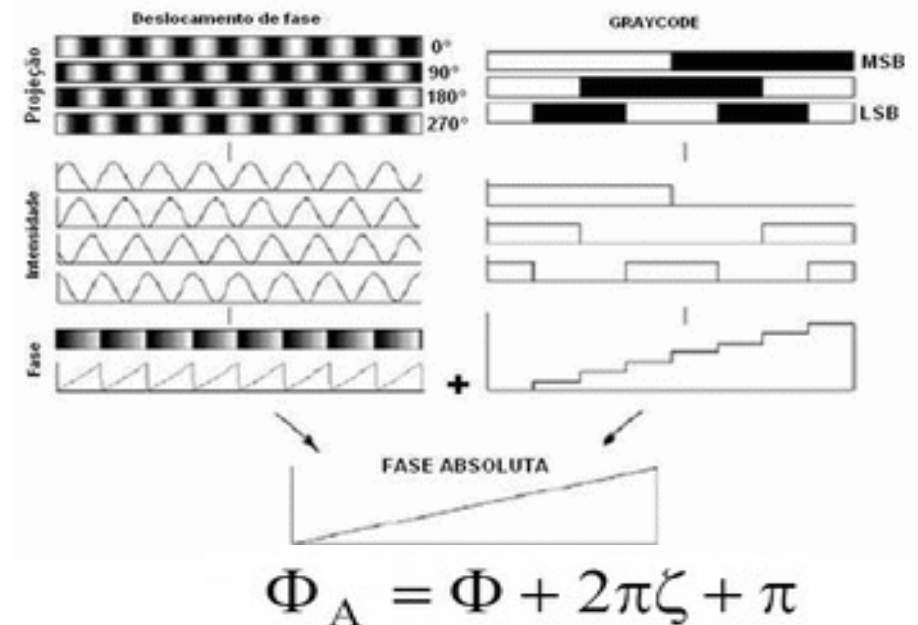
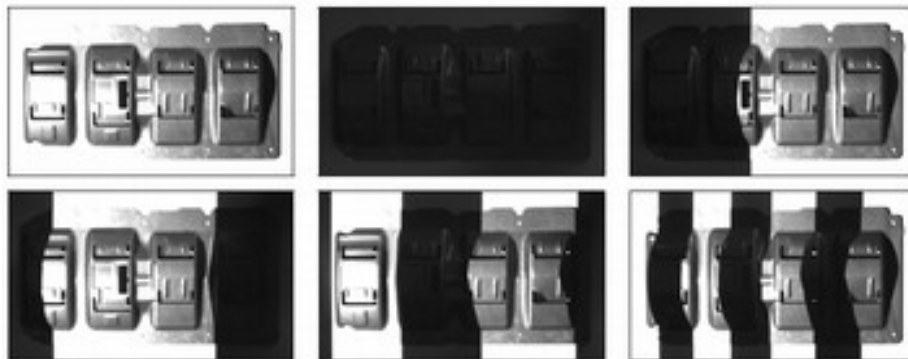
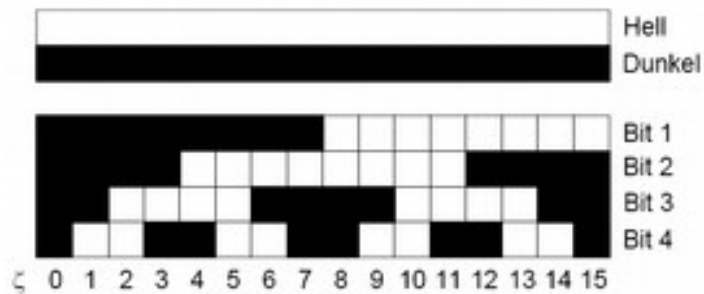
$$\lambda_{syn} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

Unwrapping
innerhalb des
vergrößerten
Eindeutigkeitsbe-
reichs möglich



Streifenprojektion - Graycode

Unwrapping durch eine Kombination eines absolut kodierten binären Codes (z.B. Gray-Code) mit den „analogen“ Cosinusstreifenmustern



Triangulation (Streifenprojektion)

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\sin \theta}$$

$$\lambda_{syn} = \frac{p}{\tan \theta}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{p} \lambda_{syn}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \lambda_{syn}$$

Beispiel 1:

Lasertriangulationssensor, Detektionsgenauigkeit 1px, Pixelpitch (5μm), Abstand 1m, Triangulationswinkel 7°.

Erreichbare Z-Auflösung?

ca. 40μm

Beispiel 2:

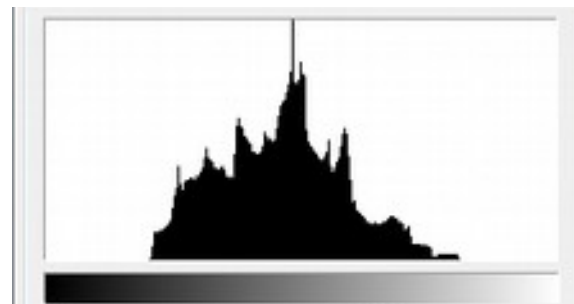
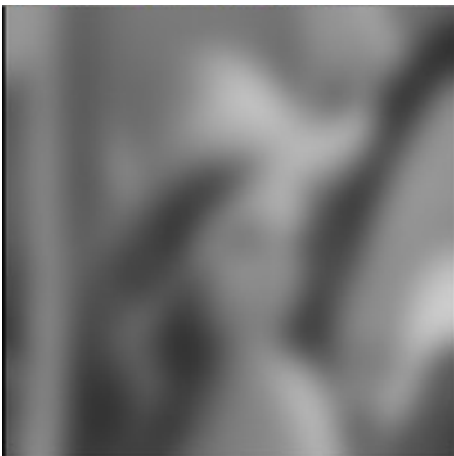
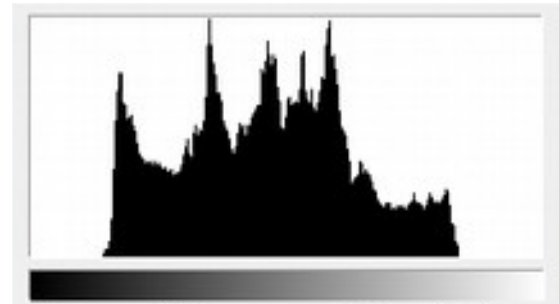
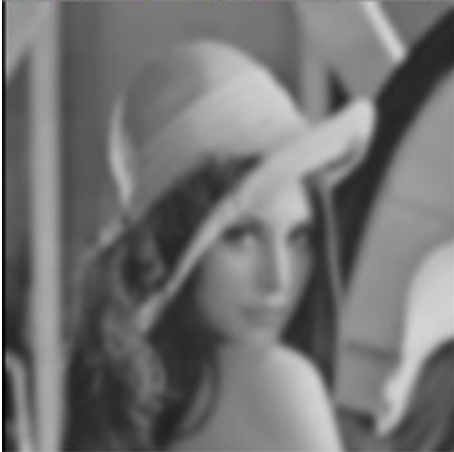
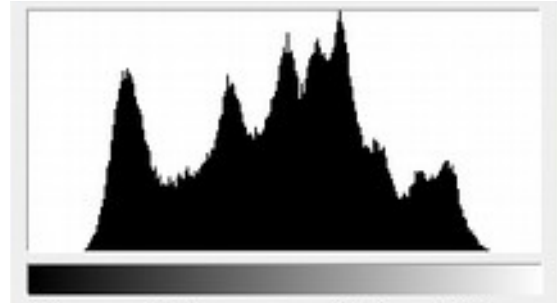
Streifenprojektionsaufbau (Phasendetektion), Phasendetektionsgenauigkeit $\lambda/200$, Periode auf Objekt 4,5mm. Erreichbare Z-Auflösung?

ca. 22,5μm

Zur Erinnerung:

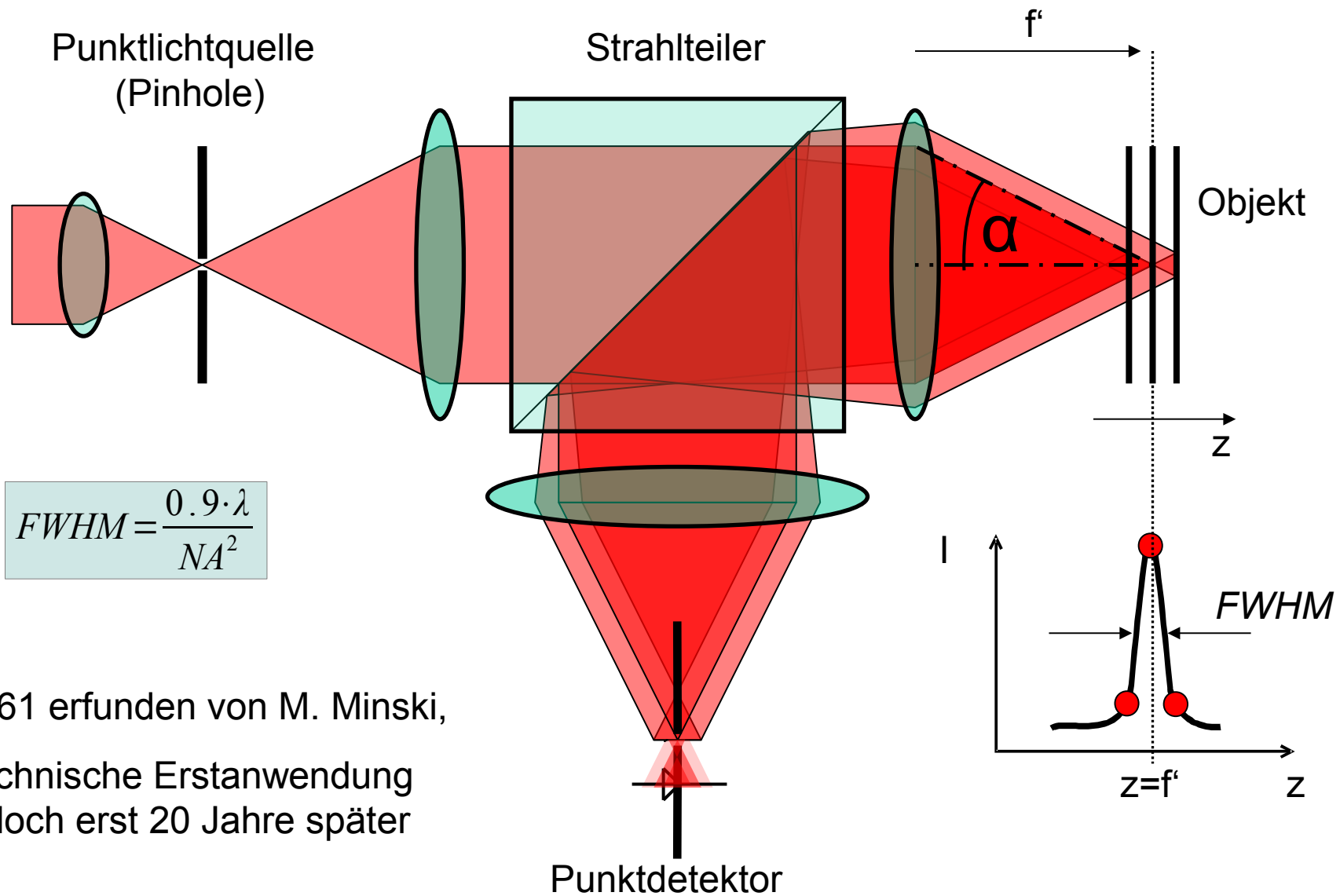
laterale Auflösung (1MPx, 300mm Feld) → ca. 300μm

Fokusverfahren - Kontrastautofokus



- Je stärker ein Bild defokussiert ist, desto „schmäler“ ist das dazugehörige Histogramm → breitestes Histogramm in der Fokusebene
- Nachteil des Kontrastautofokus: das zu messende Objekt muss strukturiert sein

Fokusverfahren – konfokale Mikroskopie



„2-stufiges“ Verfahren:

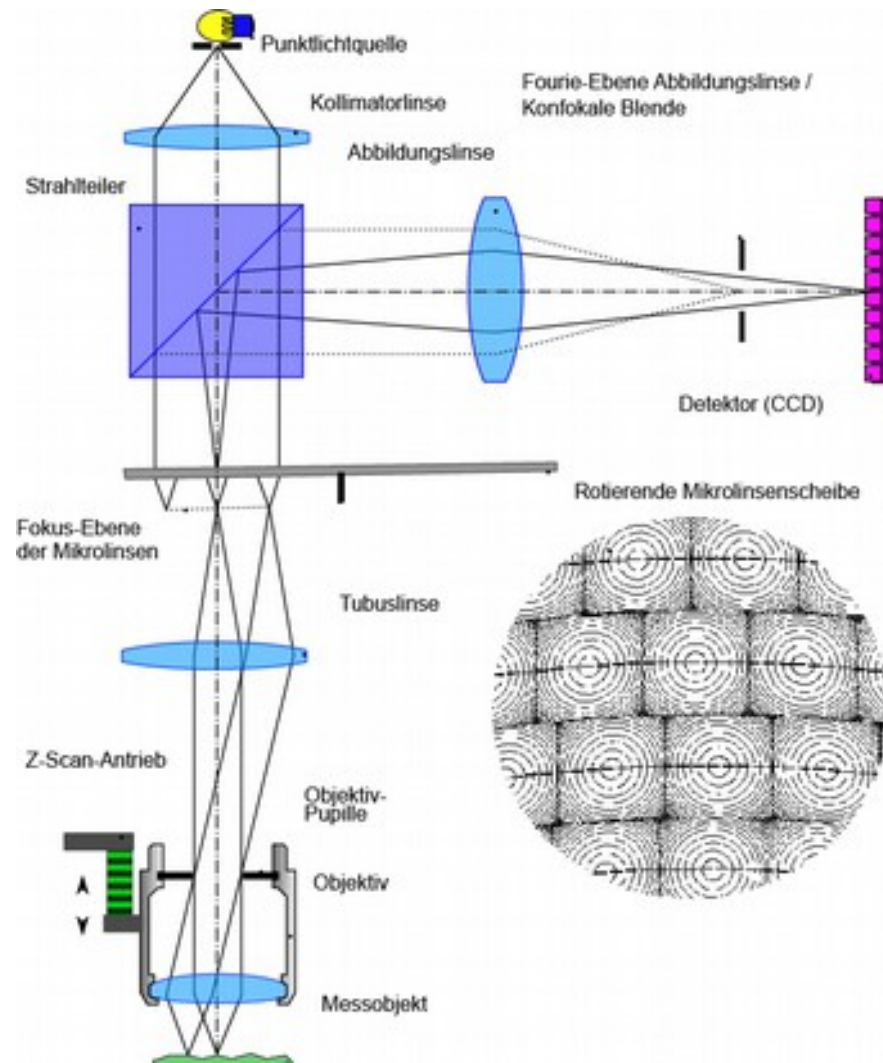
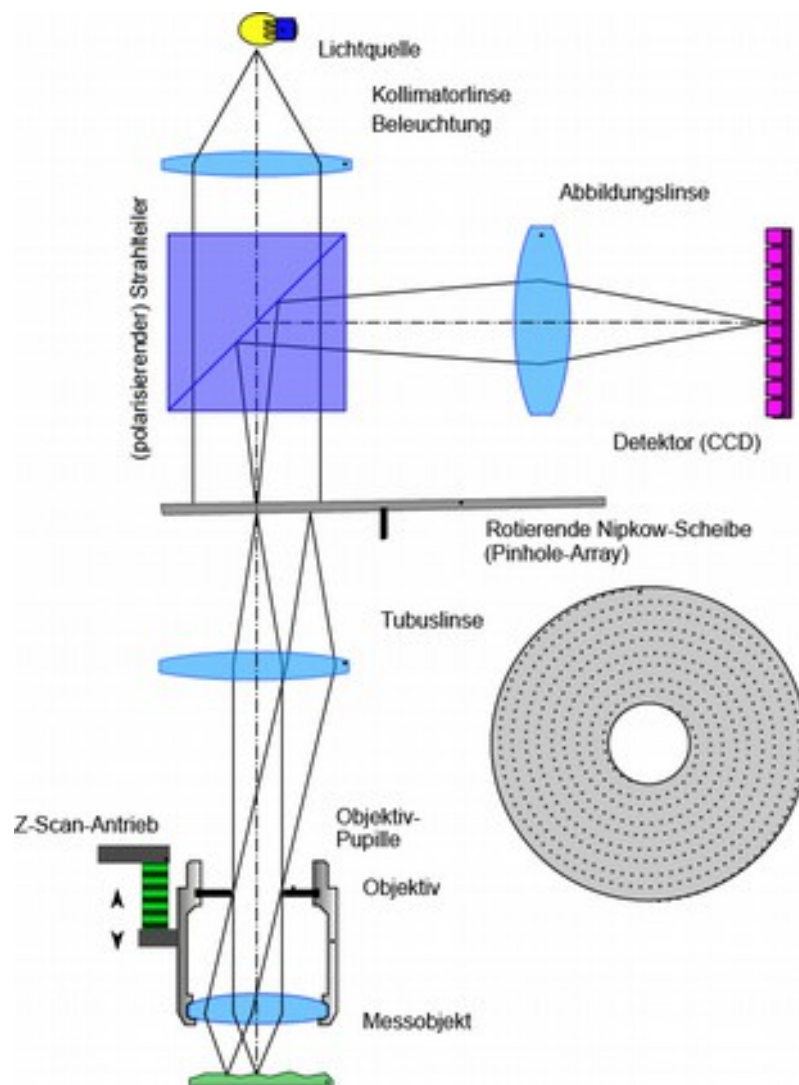
- Punktlichtquelle wird auf das Objekt abgebildet
- Objektpunkt wird auf Detektor durch Detektionslochblende abgebildet

Im Gegensatz zum Kontrastautofokus können auch unstrukturierte Oberflächen gemessen werden

Flächige Messungen durch Verwendung einer „Nipkow“-Scheibe oder einer Mikrolinsenscheibe (MLA) möglich

Fokusverfahren – konfokale Mikroskopie

Flächige Messungen durch Verwendung einer „Nipkow“-Scheibe oder einer Mikrolinsenscheibe (MLA) möglich



Fokusverfahren – konfokale Mikroskopie

- Z Auflösung ist von der NA abhängig
- Erreichbare Z Auflösung für Objektive ca. 1/20 FWHM:

$$FWHM = 0,9 \frac{\lambda}{NA}$$

5x (NA = 0,15), 20x (NA = 0,5), 50x (NA = 0,8)

1µm

0,095µm

0,04µm

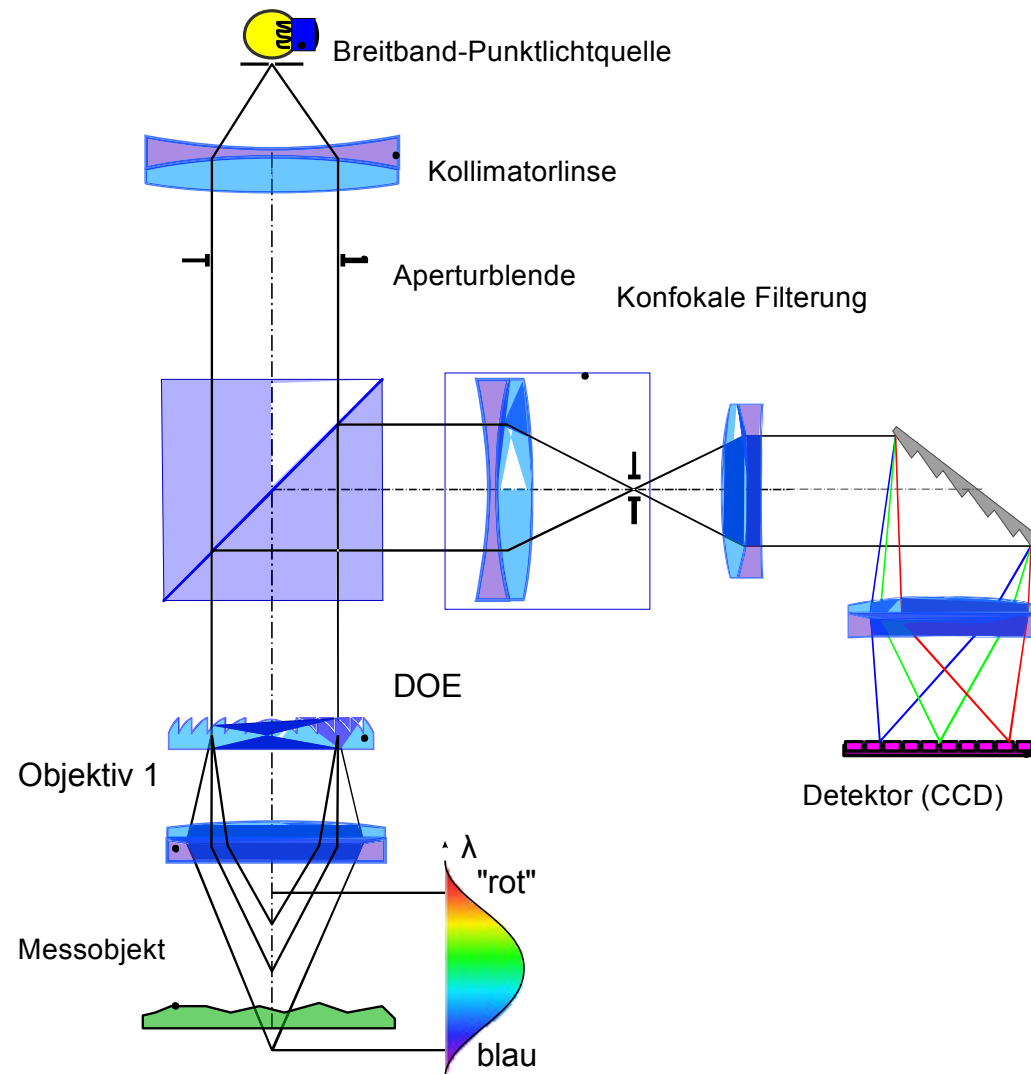
Laterale Auflösung ~ $1,22 \frac{\lambda}{NA}$

4µm

1,3µm

0,8µm

Chromatisch konfokales Verfahren



(Weisslicht-)interferometrie

Weisslichtinterferometrie (WLI) ist Sonderform der Interferometrie, bei der eine breitbandige Lichtquelle verwendet wird

Signalauswertung muss angepasst werden
(Interferenzkontrastmodulation durch Kohärenzlänge)

Kohärenzlänge einer Lichtquelle:

mit:

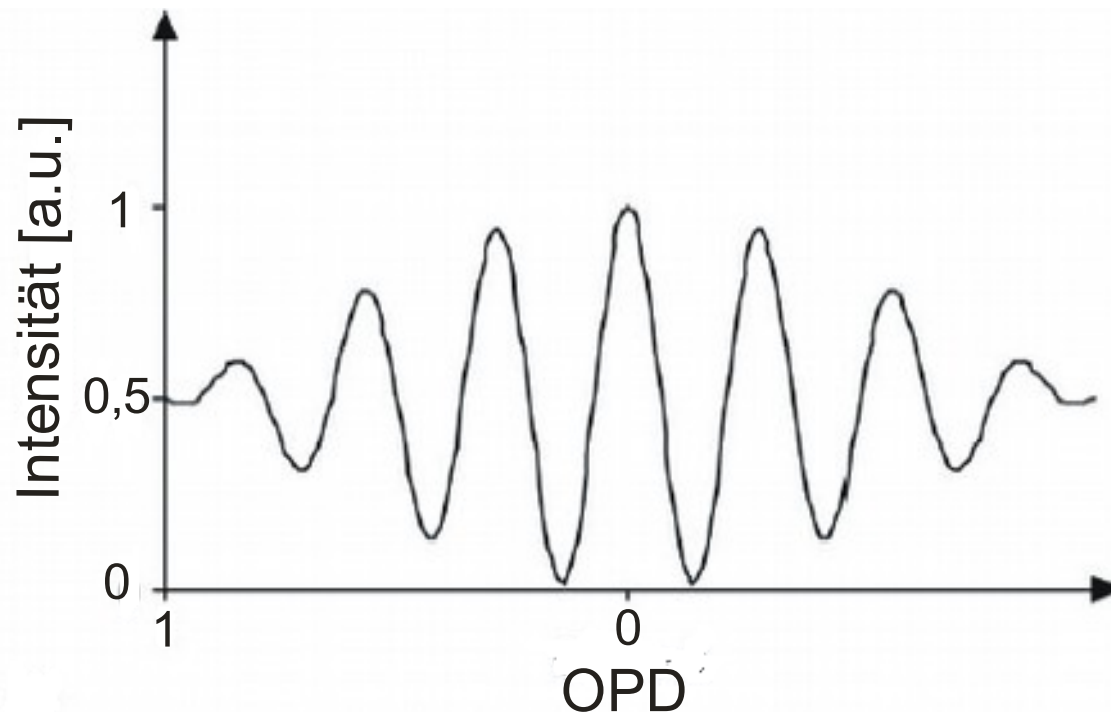
$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

λ Wellenlänge

$\Delta\lambda$ spektrale Bandbreite

(Weisslicht-)interferometrie

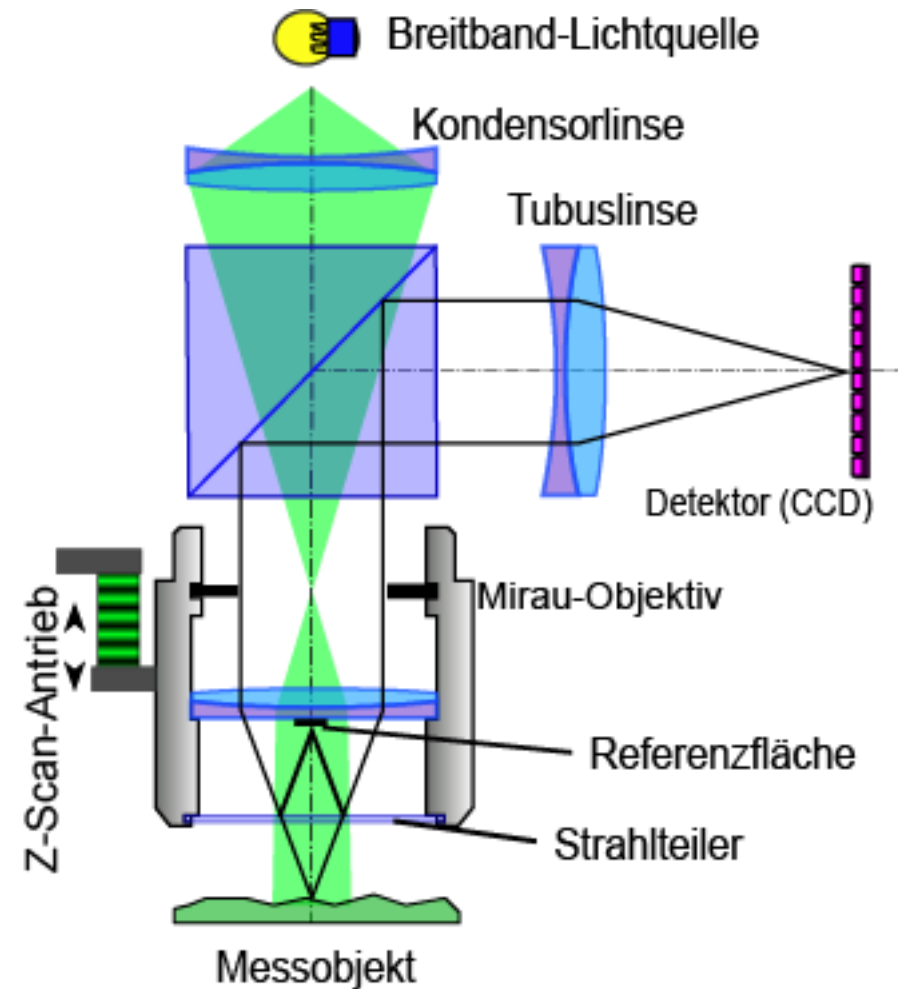
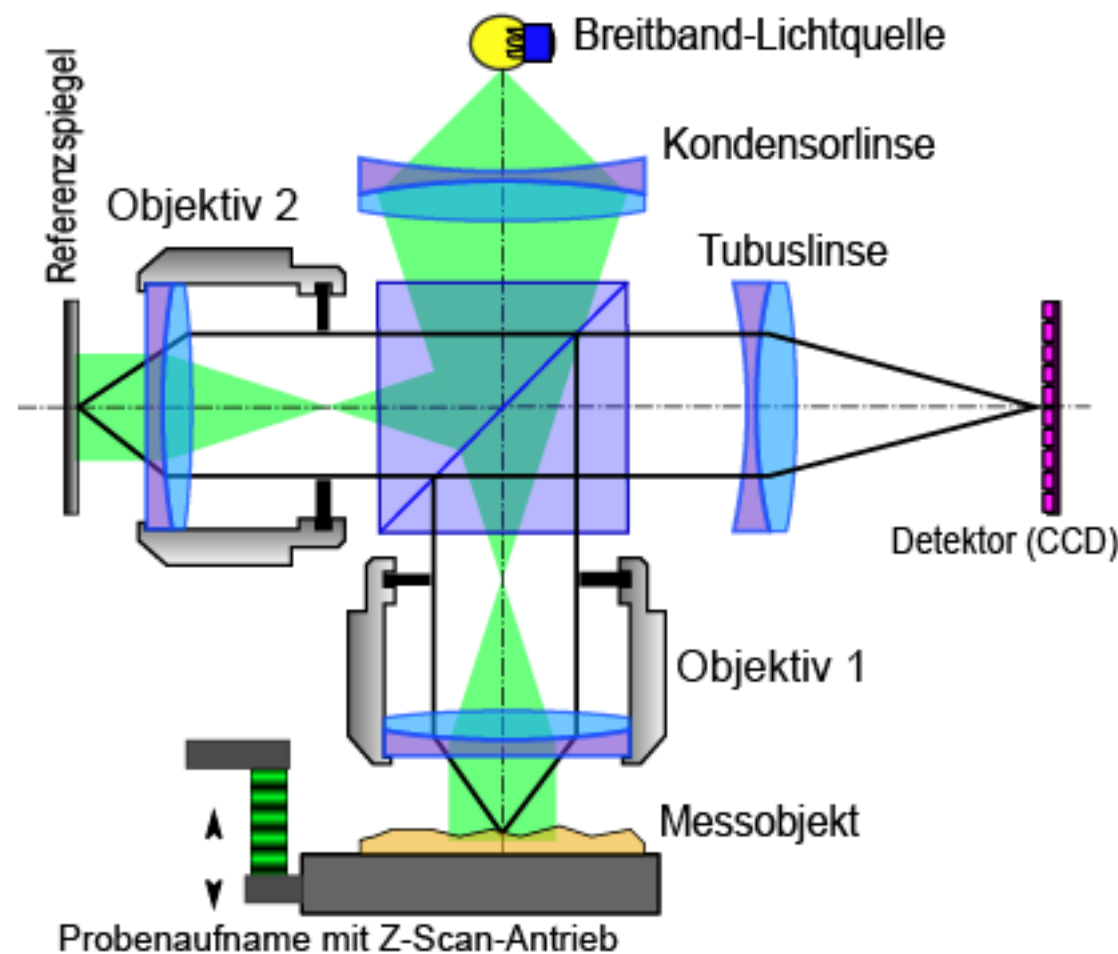
- Interferenzsignal ist zusätzlich mit „Einhüllender“ multipliziert
- Zur Höhenwertbestimmung kann allein (i.A.) der Maximalwert der Einhüllenden bestimmt werden oder es kann die Phase am Ort des Einhüllendenmaximums ermittelt werden



(Weisslicht-)interferometrie

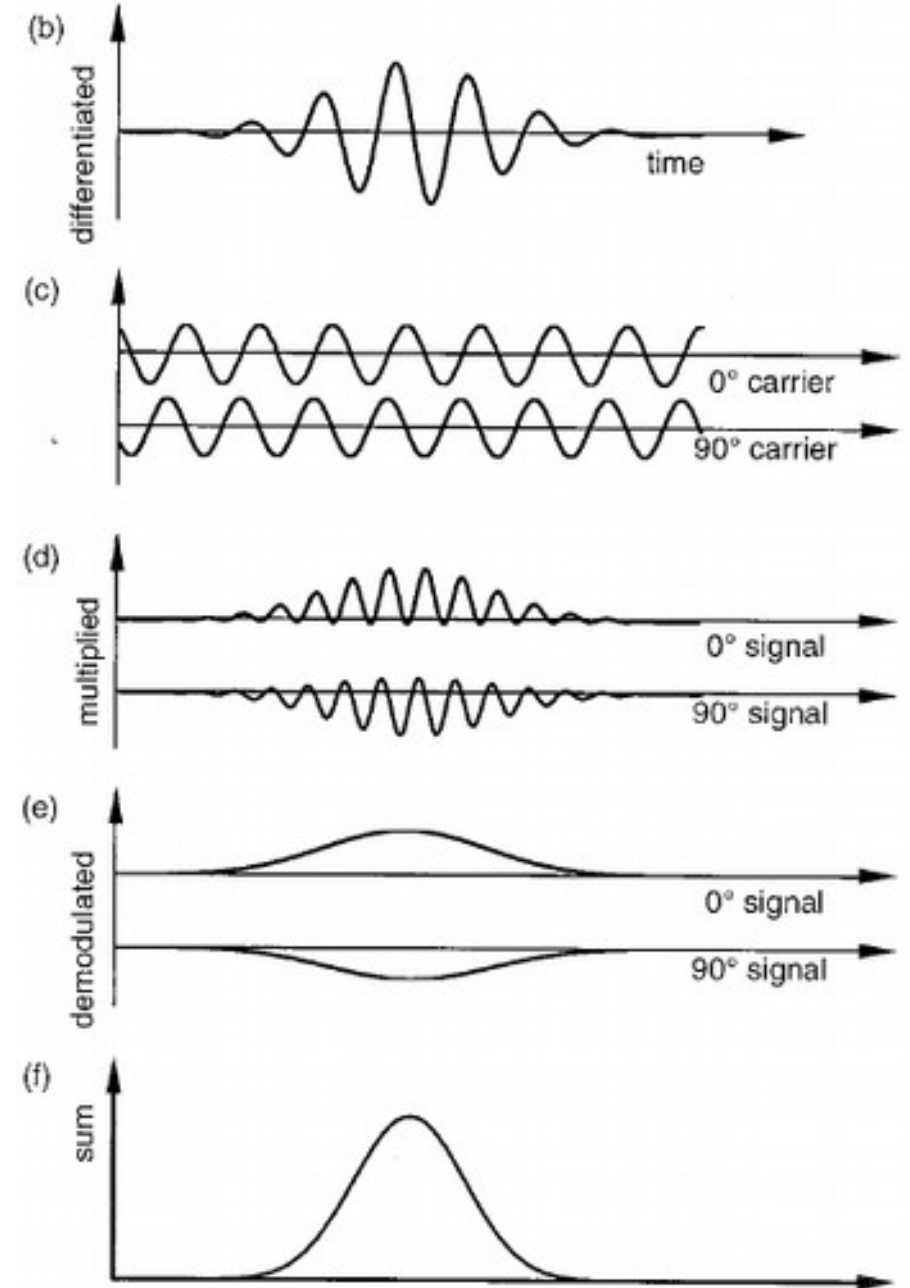
Zwei Varianten der WLI sind gebräuchlich:

- Linnik
- Mirau



(Weisslicht-)interferometrie

Bestimmung der
Einhüllenden durch
versch.
Demodulationstechniken
(„Lock-In Detektion“,
Hilbert-Transformation,
Wavelet-
Transformation, ...)



(Weisslicht-)interferometrie

- Erreichbare Z-Auflösung ist **unabhängig** von der **NA**
- Z-Auflösung wird durch die Breite des Wavelets bestimmt. Diese ergibt sich näherungsweise aus der Kohärenzlänge
- Erreichbare Z-Auflösung (reine Peak-Detektion ca. **1/20 FWHM**, Phasenauswertung ca. **$\lambda/200$**).
Glühlicht $\lambda = 550\text{nm}$, $\Delta\lambda = 120\text{nm}$

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \rightarrow FWHM = 1/2 L$$

$$\Delta z = 0,06\mu\text{m}$$

$$\Delta z = 0,006\mu\text{m}$$

Triangulationssysteme

- **Auflösung** hängt vom **Winkel** und von der Positionsdetektion (Detektorrauschen, Pixelpitch) ab
- Single-Shot Systeme mit reduzierter Auflösung (lateral) und Robustheit möglich
- Je nach Hardware (feste Transmissionsgitter, Projektor) und Anforderungen unterschiedliche Bilderanzahlen pro Z notwendig
- Messvolumen durch **Tiefenschärfe** begrenzt
- Funktionieren i.A. Nur auf rauen = **streuenden Oberflächen** (bei Streifenprojektion Ort der Streifen ist die Oberfläche)

Fokusverfahren

- reine Autofokusverfahren benötigen Strukturierte Oberfläche
- **Auflösung (z) hängt** von der **numerischen Apertur (NA)** (damit meist von der Vergrößerung) des Objektives **ab**
- Zahl der benötigten Bilder pro Δz hängt von der NA ab (mind. 5 Bilder pro Halbwertsbreite)
- Oneshot Verfahren durch chromatische Aufspaltung möglich (Farbkamera, Linien- / Punktmessung mit Spektrometer)

Weisslichtinterferometrie

- Z Auflösung ist **unabhängig** von der **NA**
- **Höchste Auflösung** (mit Auswertung der Phasenlage) nur auf glatten Oberflächen möglich
- Benötigte Bilderzahl pro Δz ist immer gleich
- Oneshot Verfahren für max. Linienmessung möglich

Neben den Form messenden Verfahren gibt es noch eine große Anzahl an Verformung messenden Verfahren

- **Deflektometrie** (Gradienten, glatte Oberflächen)
- **Interferometrie** (Form, glatte Oberflächen)
- **Speckle-Interferometrie** (Verschiebung und Verformung)
- **Holografie** (Form, Verformung und Verschiebung)
- **Sharegraphie** (Verformung)