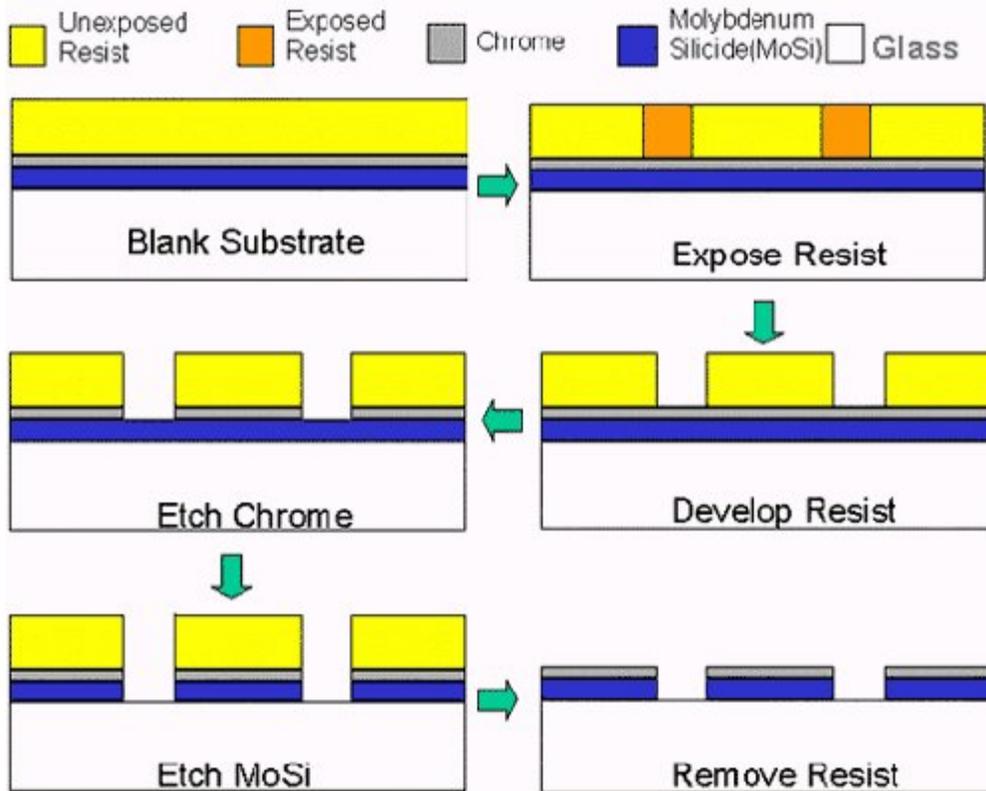




---

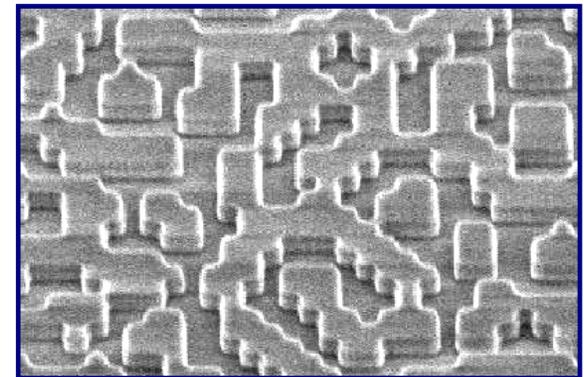
**„Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen sowie Entwurf und Fertigung eines Demonstrators für die beugungsbasierte Fokussierung und Kalibrierung optoelektronischer Sensorsysteme (bb.FoKal)“**

## Herstellungsprozess durch Elektronenstrahl-Lithographie



Holoeye Photonics AG

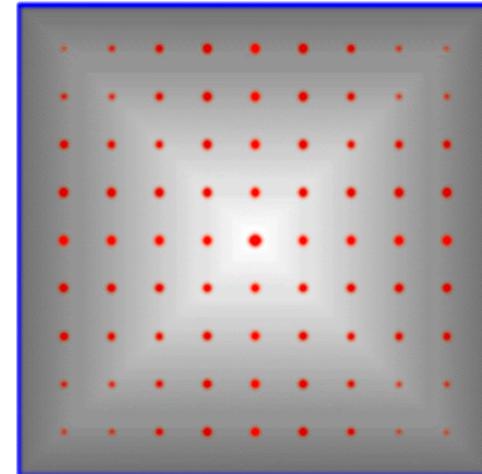
- Quarzglassubstrat mit MoSi- und Cr-beschichten (Cr-Schicht ca. 100 nm)
- Polymer-Resist auftragen, härten  
Dicke: 1-2  $\mu\text{m}$
- Elektronenstrahlbelichtung, Depolymerisierung, Positivverfahren
- Entwicklung, Auflösen des Resists
- Abätzen von Cr- und MoSi-Schicht



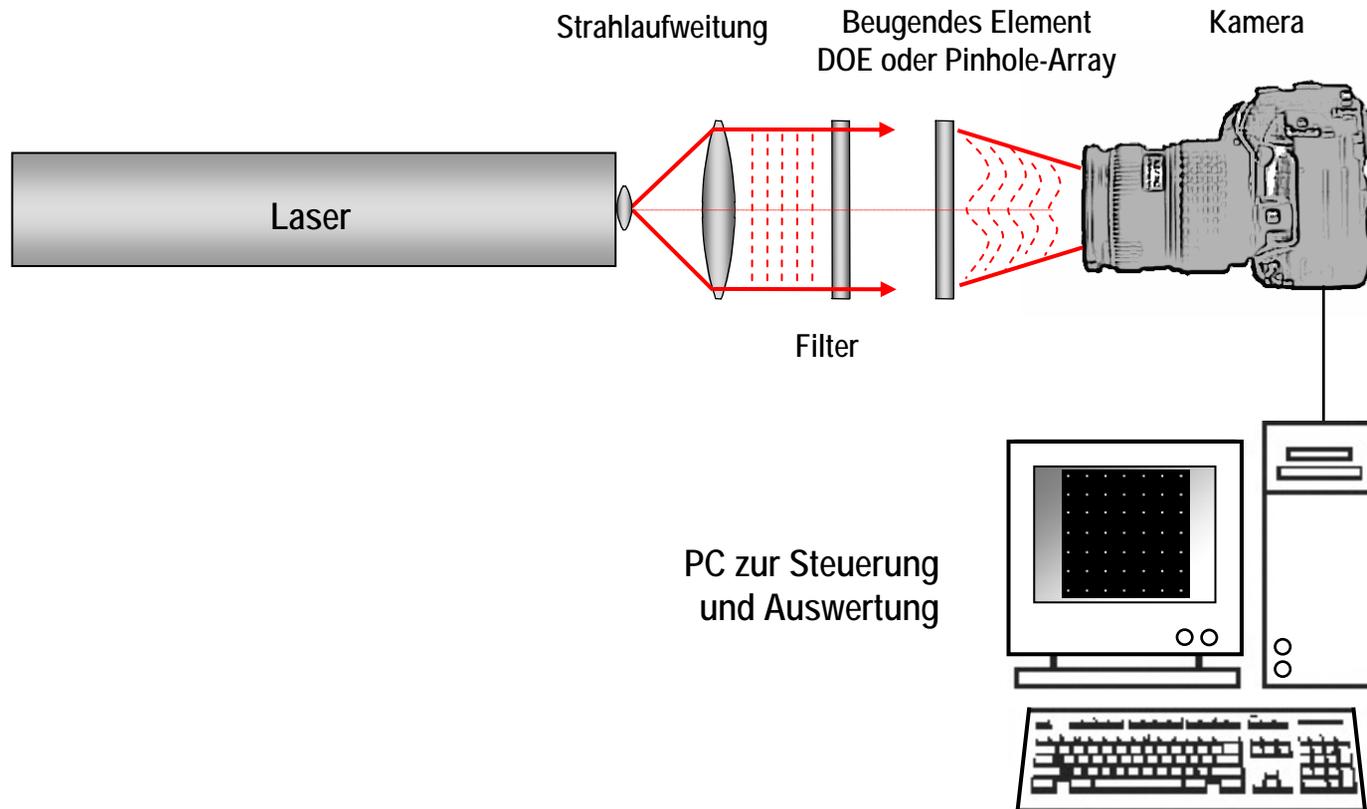
Fertige Binärstruktur

## Zusammenfassung:

- Fertigung mehrerer **Lochblenden** in Metallfolie  
Lochgeometrie wurde optimiert, Lochabstände sind sehr genau ( $1,25 \mu\text{m}$  = Verfahrinkrement),  
Planität Kippfehler (z-Achse „Fokusrichtung“):  
sind relativ unkritisch,  
Achsenausrichtung und Achsensymmetrie ist durch den Mittelpunkt gegeben (ungerade Punktzahl)
- **Synthetisches Hologramm** in Form des **DOE's** der HoloEye Photonics AG kann die Spezifikationsmerkmale erfüllen.
- Aufbau des **Demonstrators** mit den gelieferten und modifizierten Lochblendenarrays und dem DOE der HoloEye Photonics AG ist erfolgt,
- Testversuche mit den Demonstrator waren **erfolgreich**



## Prinzipaufbau der Versuchsanordnung



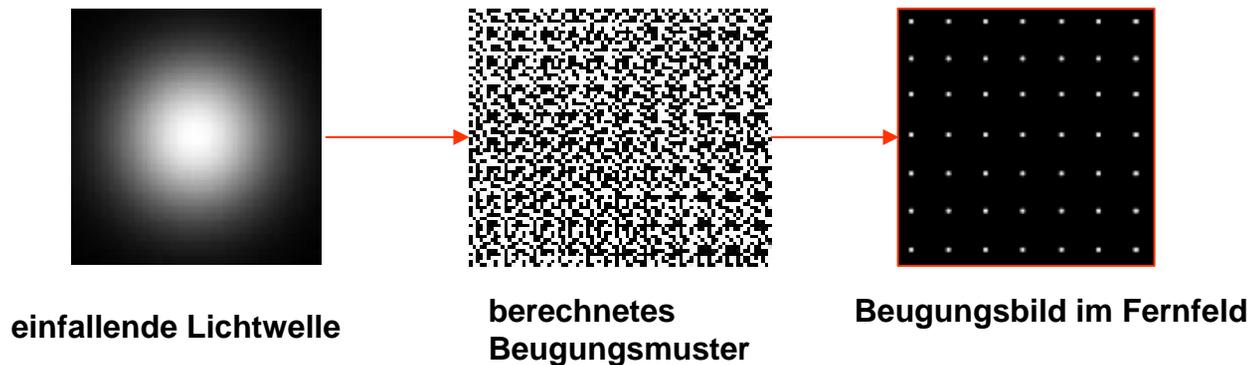


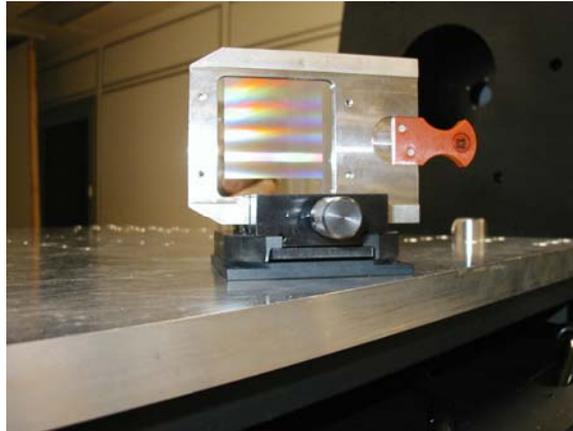
## bb.FoKal - Demonstratoraufbau



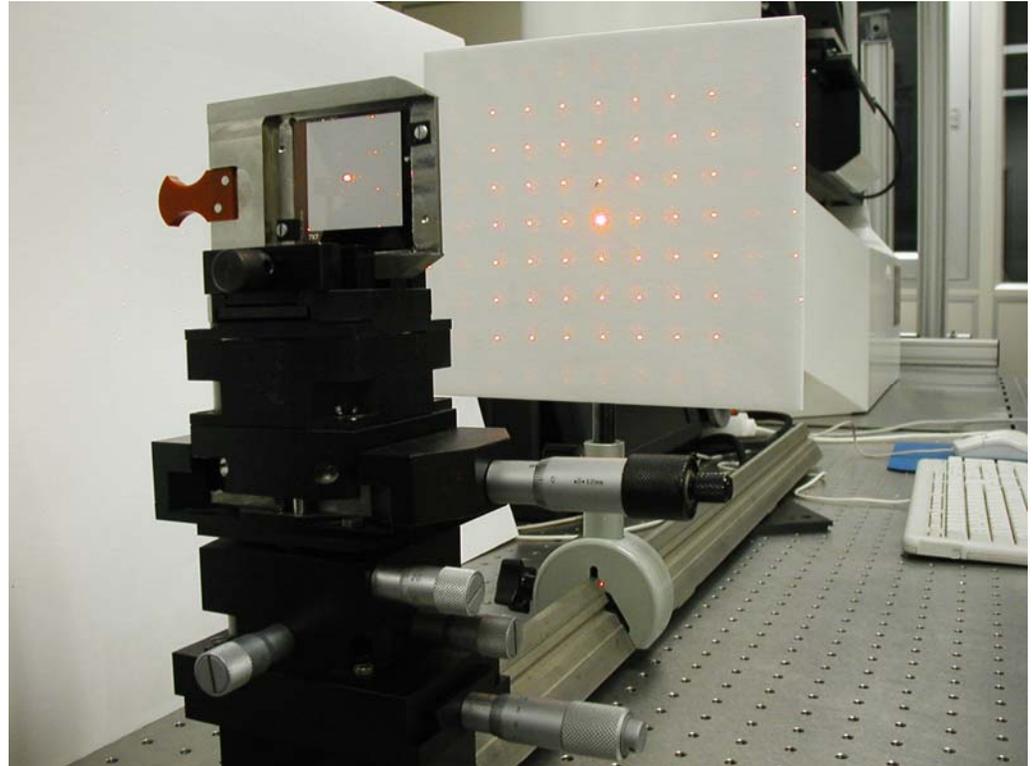
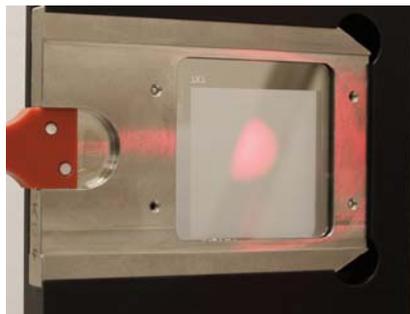
## 2. Diffraktive Optische Elemente (DOE)

<b>Hersteller:</b>	<b>HoloEye Photonics AG</b>
<b>Typ:</b>	<b>7 x 7 Strahlteiler</b>
<b>Material:</b>	<b>Quarz mit 100 nm Chrombeschichtung</b>
<b>Struktur:</b>	<b>1 <math>\mu\text{m}</math> Streifenbreite</b>
<b>Feldgröße:</b>	<b>40 x 40 mm<sup>2</sup></b>
<b>max. Beugungswinkel:</b>	<b>15°, optimiert für 633 nm</b>





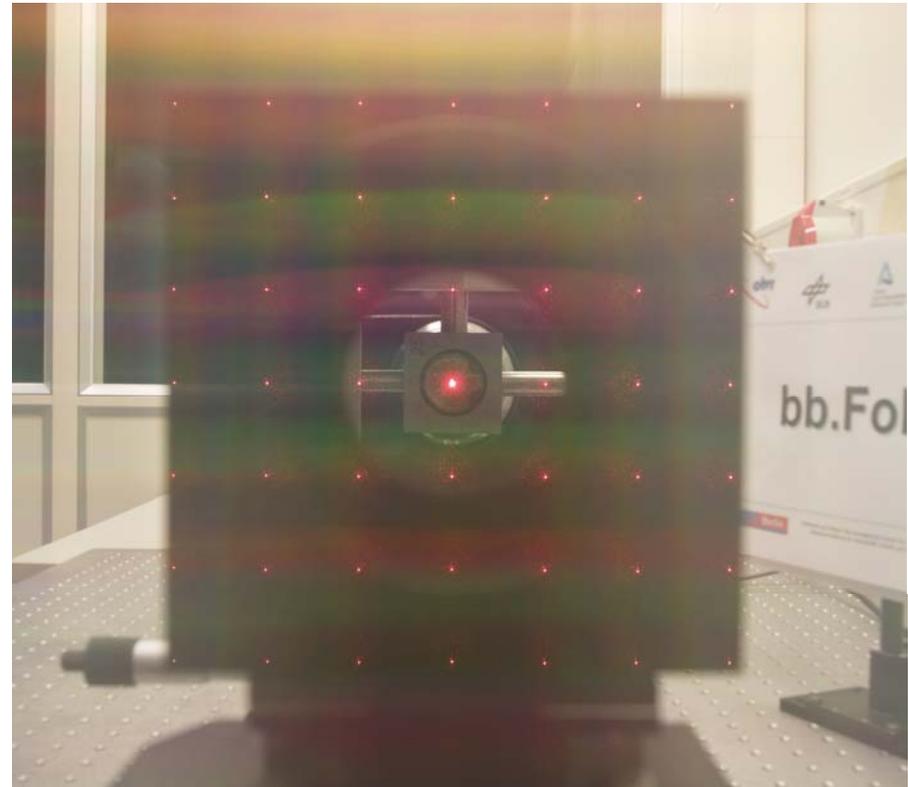
## DOE HoloEye Photonics AG 40 x 40 mm<sup>2</sup> (beamsplitting)



## Kalibrationsaufnahme Olympus E1 in heller Laborumgebung

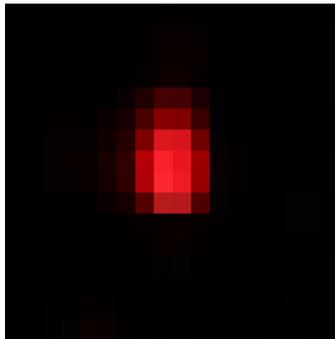
### Vorteile:

- scharfe Abbildung der Struktur (Fernfeld)
- Lage der Bildpunkte unabhängig vom Abstand des DOE
- translationsinvariant in x,y

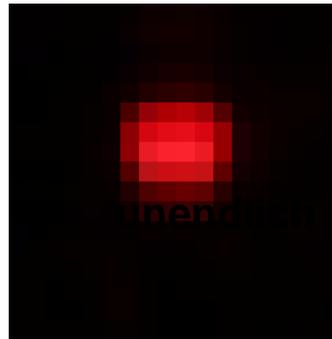


## Fokussierung einer Kamera mit dem DOE

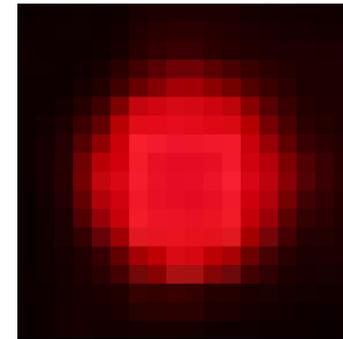
Kamera: Olympus E1,  $f = 14 \text{ mm}$



unendlich



4 m

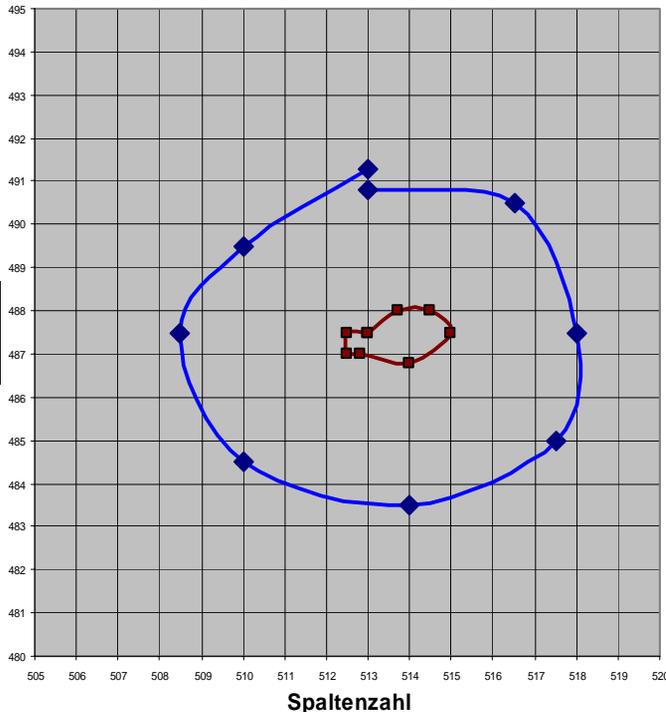


1 m

**Vorteil: Mit einer einzigen Aufnahme werden Punkte im gesamten Bildraum erzeugt, während die Scharfstellung mit dem Kollimator nur punktweise erfolgen kann.**

# Suchen des optischen Mittenpixels – Durchstoßpunkt der opt. Achse

Eine Methode ist die Drehung der Kamera um ihre Längsachse



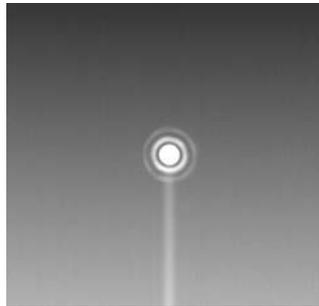
Wenn die optische Achse der Kamera mit der optischen Achse des Versuchsaufbaus übereinstimmt, so beschreibt der ungebeugte Strahl des DOE bei einer Drehung der Kamera um die z-Achse auf dem Sensor einen Punkt.

großer Kreis: Justierung der Kamera mittels Laserreflexion  $\pm 4$  Pixel

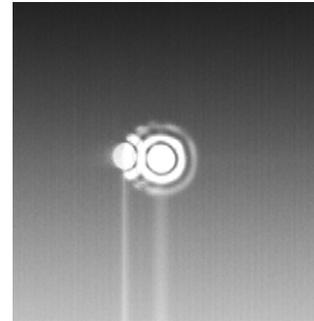
kleiner Kreis: Nach Ausrichtung in den Mittelpunkt  $\pm 1$  Pixel

**Drehung der Kamera im Demonstrator stellt hohen mechanischen Aufwand dar!**

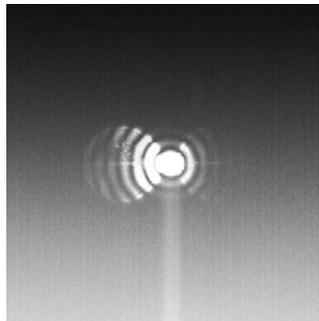
## Ausrichtung der Kamera im Versuchsaufbau



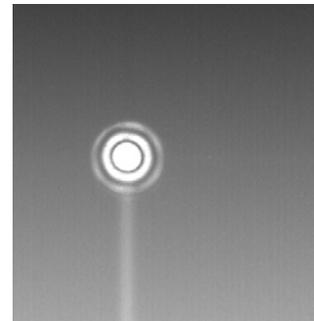
Pinhole vor der  
Kamera justiert



Verdrehung der Kamera  
um senkrechte Achse



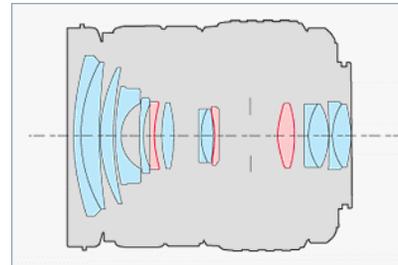
laterale Verschiebung  
des Pinhole



laterale Verschiebung  
des Pinhole

**Mit einem Pinhole allein ist eine exakte Ausrichtung  
der Kamera nicht möglich**

## Justage der Kamera am Demonstrator - Suchen der optischen Achse



Zuiko Digital 14-54 mm; F# = 2,8-3,5

f=14 mm, Blende k=5,6

Belichtungszeit t = 2 s

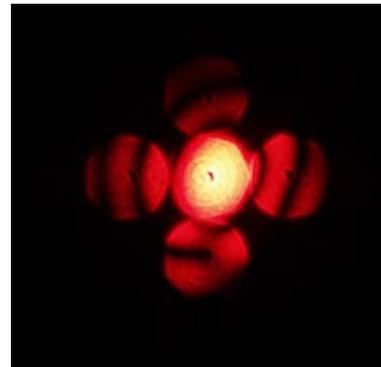
20  $\mu\text{m}$  Pinhole-array

Pix\_x = 1 228



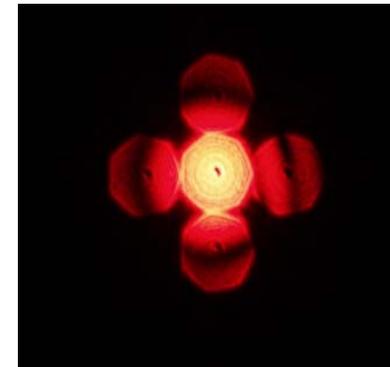
außerhalb der opt. Achse

Pix\_x = 1246



bessere Justierung

Pix\_x = 1272



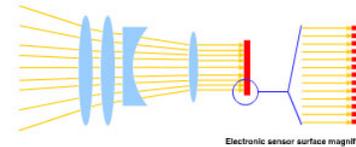
optimale Justierung

Pix\_y=972

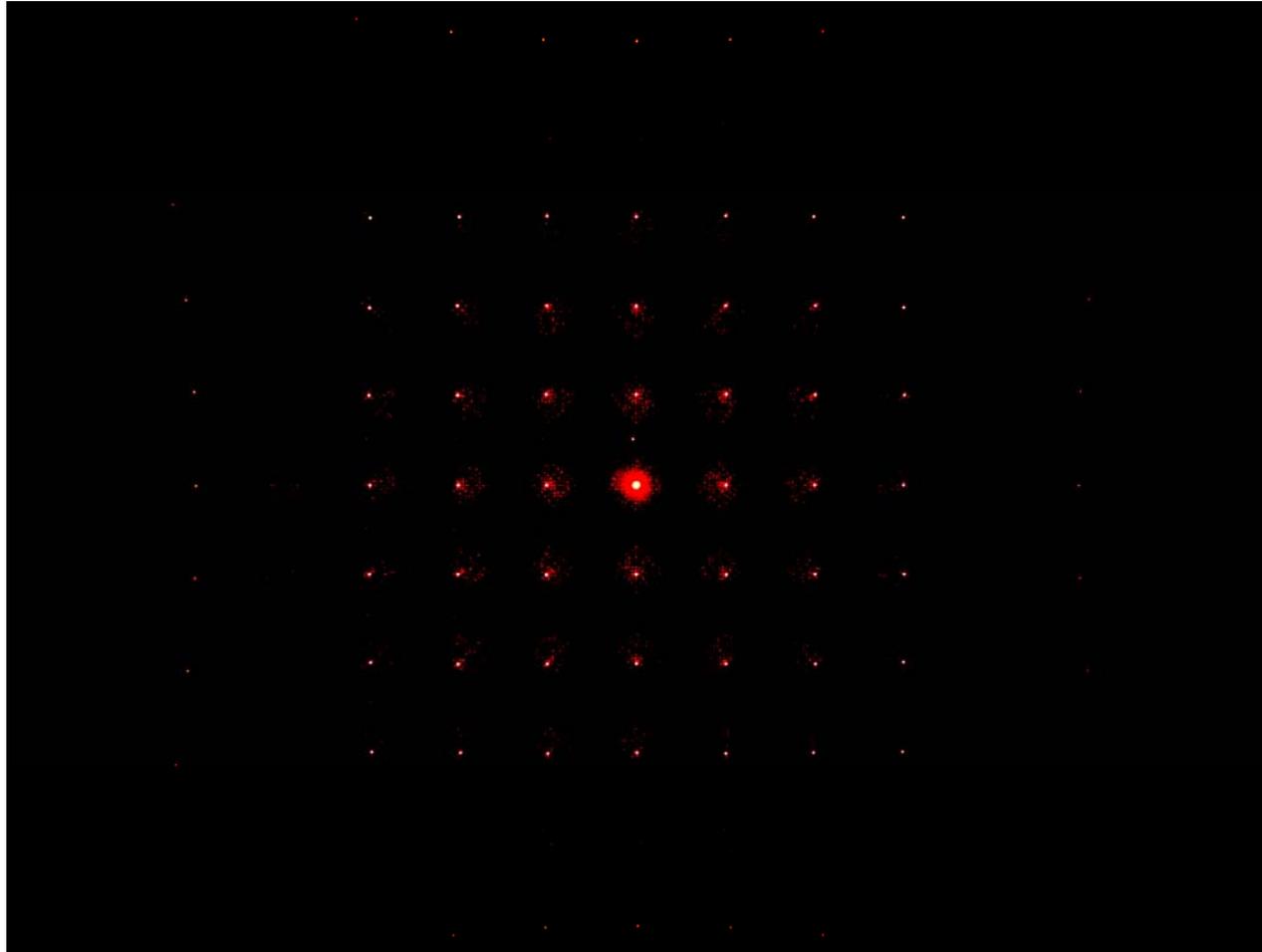
## Digitale Spiegelreflexkamera (Olympus E1)

Sensor  $17,3 \times 13 \text{ mm}^2$     5 Mio Pixel     $6,8 \times 6,8 \mu\text{m}^2$   
steuerbar vom PC        2560 x 1920

Optik bildseitig telezentrisch



## Kalibrationsaufnahme Olympus E1 f = 14 mm



## Wellenlängenabhängigkeit

- Die Beugungswinkel des DOE sind abhängig von der Wellenlänge
- Beugungswinkel sind für die Wellenlänge 633 nm (He-Ne-Laser) berechnet und können für beliebige Wellenlängen angegeben werden.
- Kameraobjektive besitzen chromatische Aberrationen in Längsrichtung - bei fester Fokussierung ist der chromatische Querfehler minimal!

Untersuchungen hierzu wurden mit der Olympus-Kamera am Kameramessplatz bei den Wellenlängen **450 nm, 550 nm und 650 nm** durchgeführt.

Die Queraberrationen lagen in diesem Wellenlängenbereich für Winkel  $\pm 15^\circ$  unter 0,5 Pixel.

## Zusammenfassung

- **Aufbau eines funktionstüchtigen Demonstrators zum experimentellen Nachweis der beugungsbasierten Fokussierung und Kalibration**
- **Durchführung von Kalibrationsaufnahmen mit unterschiedlichen Kamerasystemen**
- **Diffraktive Optische Elemente (DOE) sind gut geeignet, müssen jedoch für verschiedene Kameratypen optimiert werden (Muster, Apertur, Wellenlänge)**
- **Pinhole-arrays eignen sich zur Ausrichtung der Kamera im Messaufbau**
- **Kalibrationsmessungen mit bb.FoKal wurden am Kameramessplatz verifiziert**

# Ergebnisse

## 3. Olympus-Kamera

Einfluss von Belichtungszeit und Blende auf die Kalibration wurde untersucht

Blendeneinfluss (4 und 8) nicht vorhanden

Kalibration von der Belichtungszeit abhängig

(Beugungspunkte zu schwach oder überbelichtet)

## Ergebnisse

Olympus Kamera

1/125, Blende 8

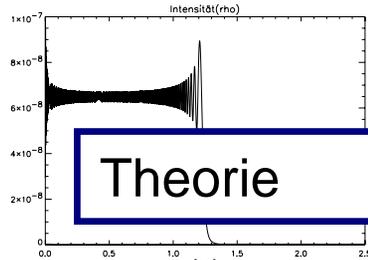
mittlerer absoluter Fehler ( Pixel) horizontal:0,242

mittlerer absoluter Fehler (Pixel) vertikal: 0,502

maximaler Fehler (Pixel) horizontal: 0.605

maximaler Fehler (Pixel) vertikal: 1,72

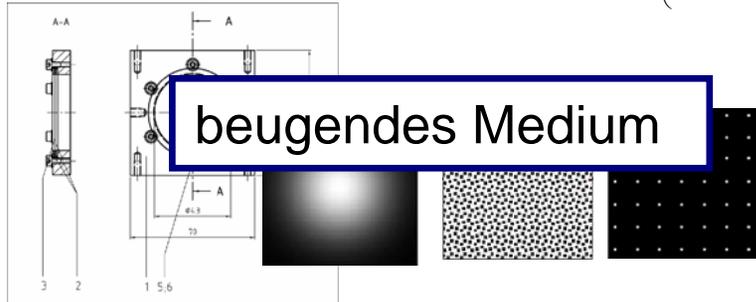
Standardabweichung (Pixel): 0,545



Theorie

$$U_{\lambda}'(x'_m, y'_n) = \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_0^2(k) + y_0^2(k)}{2g}\right) \cdot I_{\lambda} \left( \sqrt{\left(x'_m + \frac{d}{g} \cdot x_0(k)\right)^2 + \left(y'_n + \frac{d}{g} \cdot y_0(k)\right)^2} \right)$$

beugendes Medium



Laboraufbau



- produktnahe Forschungsarbeit
- Umsetzbarkeit
- Handhabbarkeit

Demonstrator

# Projektergebnis

## Demonstrator =

Nachweis, dass ein beugungsbasiertes Verfahren zur Kalibrierung von hoch- und höchstaflösenden Matrixkameras im Unendlichen und im sichtbaren Wellenlängenbereich anwendbar ist.