

# Deflektometrie

Ein Verfahren der optischen 3D Messtechnik zur Oberflächenrekonstruktion mit nm Präzision durch Auswertung von Strahlablenkung



---

Annemarie Holleczek

Scheinseminar Optische Lithographie – Anwendungen, Grenzen, Perspektiven

# Inhalt

- Hinführung zum Thema
- Die PMD Messtechnik
  - Messprinzip
  - Ausgewähltes Problem und dessen Lösung
  - Messbeispiel
  - Besonderheiten
  - Grenzen und Limitierungen
- Technische Umsetzung
- Bezugnahme auf Optische Lithographie (Mikrodeflektometrie)
- Fazit

Annemarie Holleczeck – Deflektometrie

Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



- **Hinführung zum Thema**
- Die PMD Messtechnik
  - Messprinzip
  - Ausgewähltes Problem und dessen Lösung
  - Messbeispiel
  - Besonderheiten
  - Grenzen und Limitierungen
- Technische Umsetzung
- Bezugnahme auf Optische Lithographie (Mikrodeflektometrie)
- Fazit

Annemarie Holleczek – Deflektometrie  
Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# Hinführung

- Was wird vermessen?

Spiegelnde Freiformflächen

- Höhe
- Form
- in einem *weiten Krümmungsbereich*
- mit *hoher Winkeldynamik*

Problematik: Spiegelnde Flächen sind „*unsichtbar*“



# Hinführung

- Zwei mögliche Lösungsansätze der Probleme:
  - Interferometrie (Standardmethode)
    - Interferometer (z.B. Fiszeau Interferometer)  
Mögliche Probleme an zu geneigten Oberflächen:
      - Interferenzstreifen zu eng
      - Nicht genügend Licht wird in die Beobachtungsoptik reflektiert  
Mögliche Lösung: Kompensationsoptiken
    - Computergenerierte Hologramme
  - ⇒ Es sei für unsere Anwendung zu unflexibel
  - Deflektometrie  
Deflektion, (lat. deflectere) Strahlablenkung

Annemarie Holleczek – Deflektometrie

Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# Hinführung

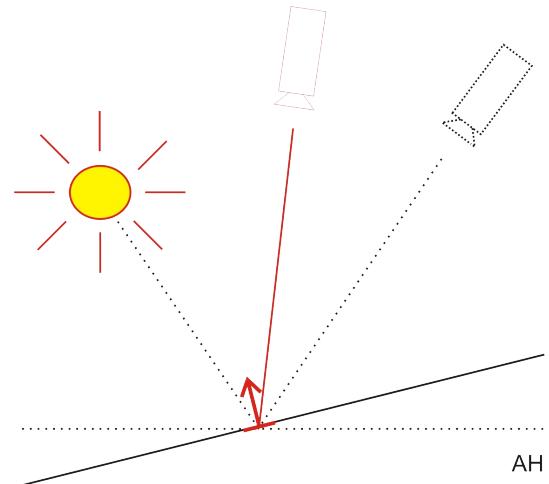
- Zwei mögliche Lösungsansätze der Probleme:
    - Interferometrie (Standardmethode)
      - Interferometer (z.B. Fiszeau Interferometer)  
Mögliche Probleme an zu geneigten Oberflächen:
        - Interferenzstreifen zu eng
        - Nicht genügend Licht wird in die Beobachtungsoptik reflektiertMögliche Lösung: Kompensationsoptiken
      - Computergenerierte Hologramme
- ⇒ Es sei für unsere Anwendung zu unflexibel

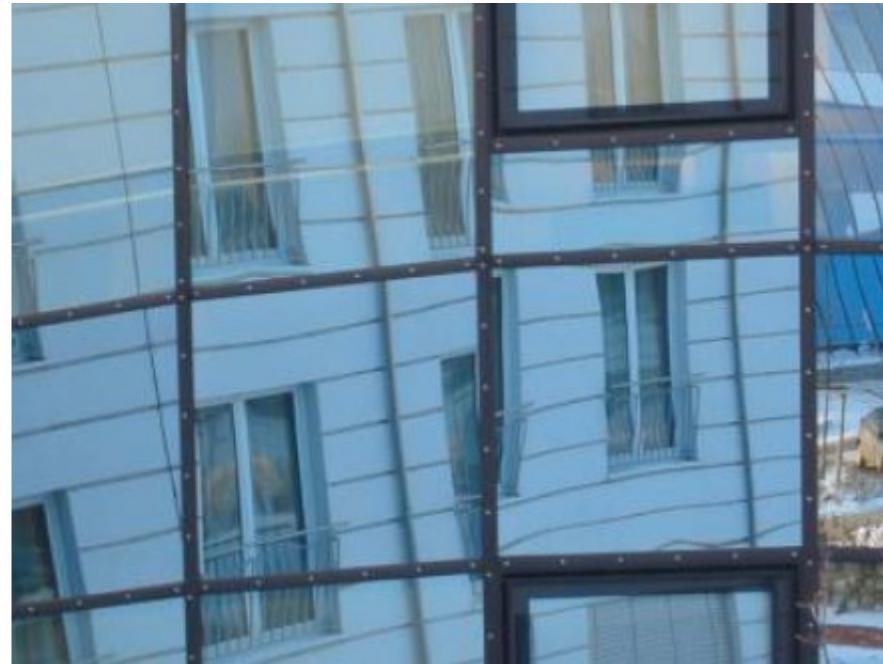
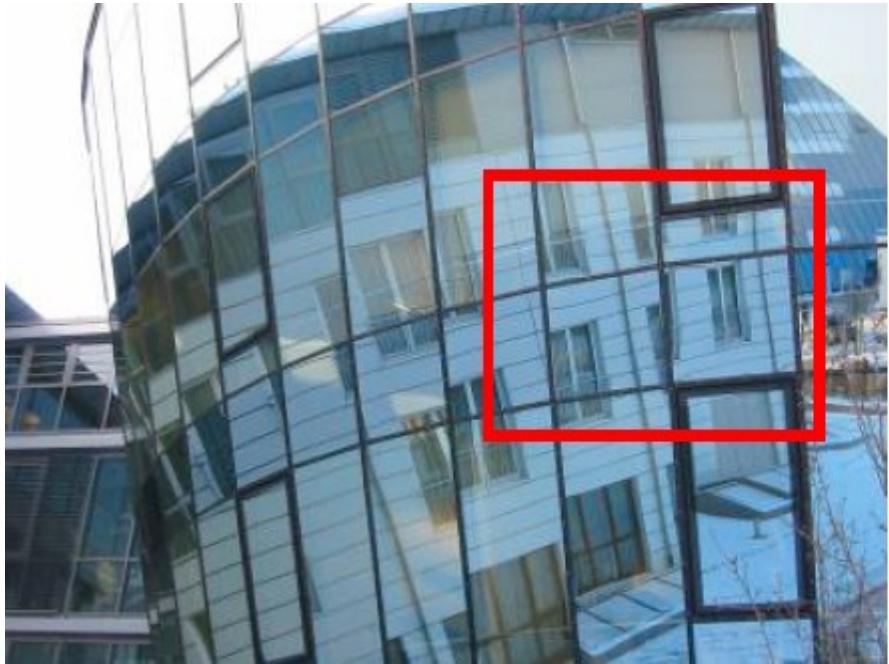
- Deflektometrie  
Deflektion, (lat. deflectere) Strahlablenkung



# Hinführung

- Wie wird gemessen?
  - Deflektometrie:  
Messung der Ablenkung von  
Lichtstrahlen
  - Beschaffenheit der Lichtquelle ist  
bekannt
  - Zu messendes Objekt ist ‚Teil des  
Abbildungssystems‘
  - Beobachtung der Lichtquelle über das  
Objekt
  - Rückschluss durch diese Messung auf  
die Ursache der Ablenkung





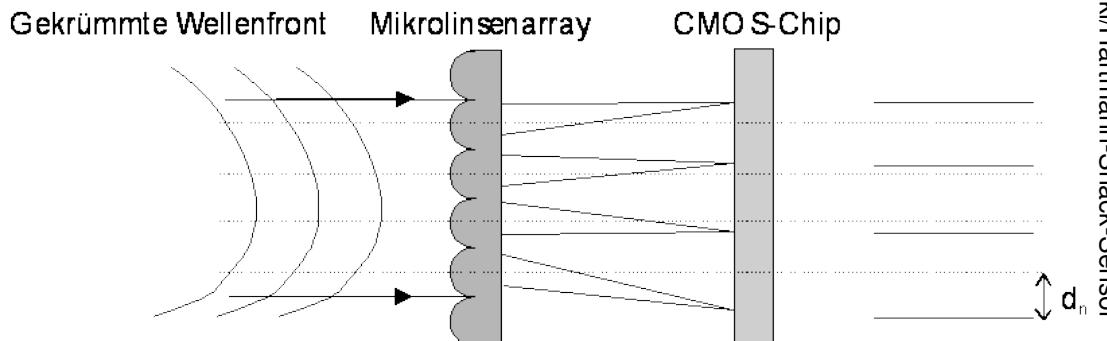
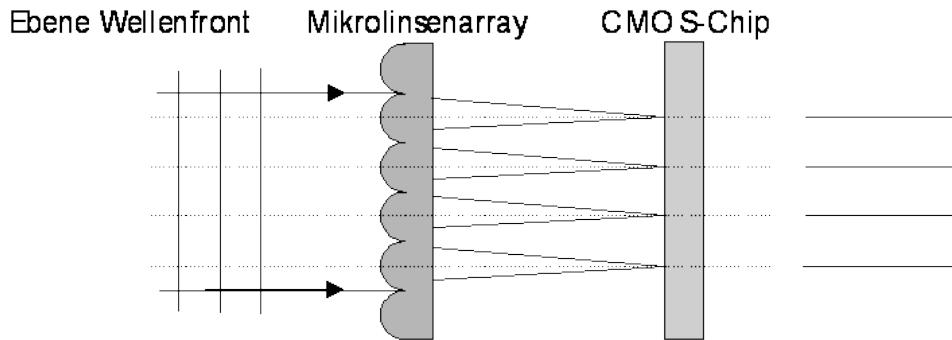
[Quelle 3]

Annemarie Holleczeck – Deflektometrie  
Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# Hinführung

- Etabliertes Beispiel für Deflektion:  
Shack-Hartmann Sensor



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hartmann-Shack-Sensor>

Annemarie Holleczeck – Deflektometrie

Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



- Hinführung zum Thema
- **Die PMD Messtechnik**
  - **Messprinzip**
  - **Ausgewähltes Problem und dessen Lösung**
  - **Messbeispiel**
  - **Besonderheiten**
  - **Grenzen und Limitierungen**
- Technische Umsetzung
- Bezugnahme auf Optische Lithographie (Mikrodeflektometrie)
- Fazit

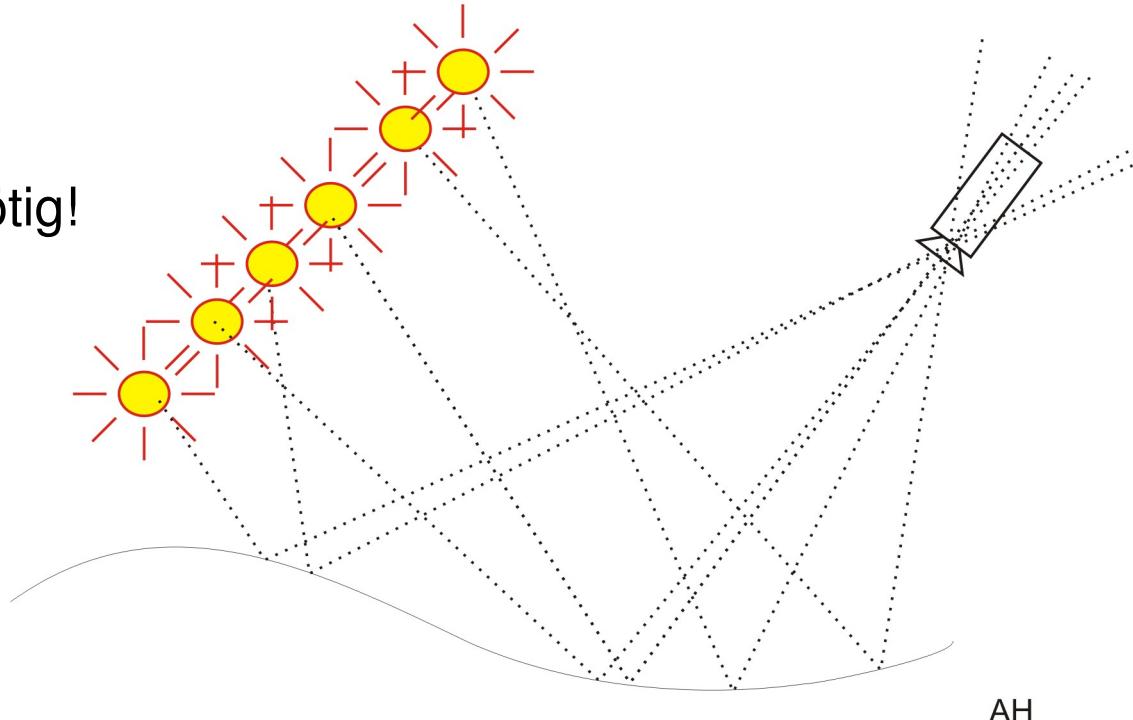


# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Schema

⇒ Großflächige

Beleuchtung nötig!

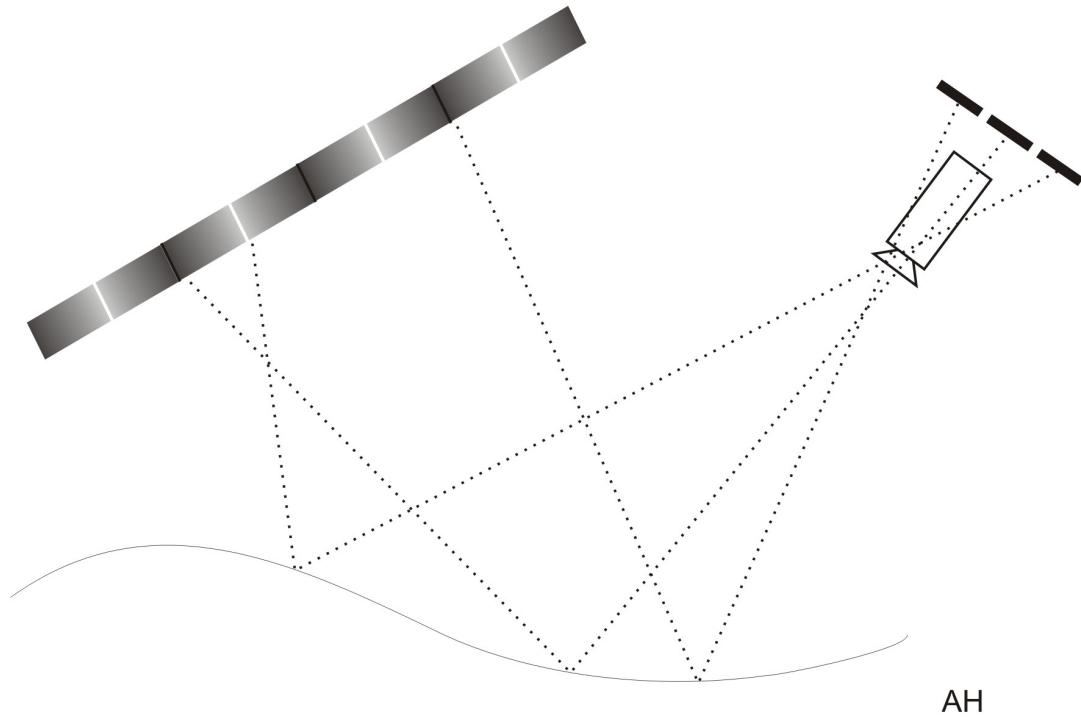


# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Schema : Kodierung der Schirmkoordinate

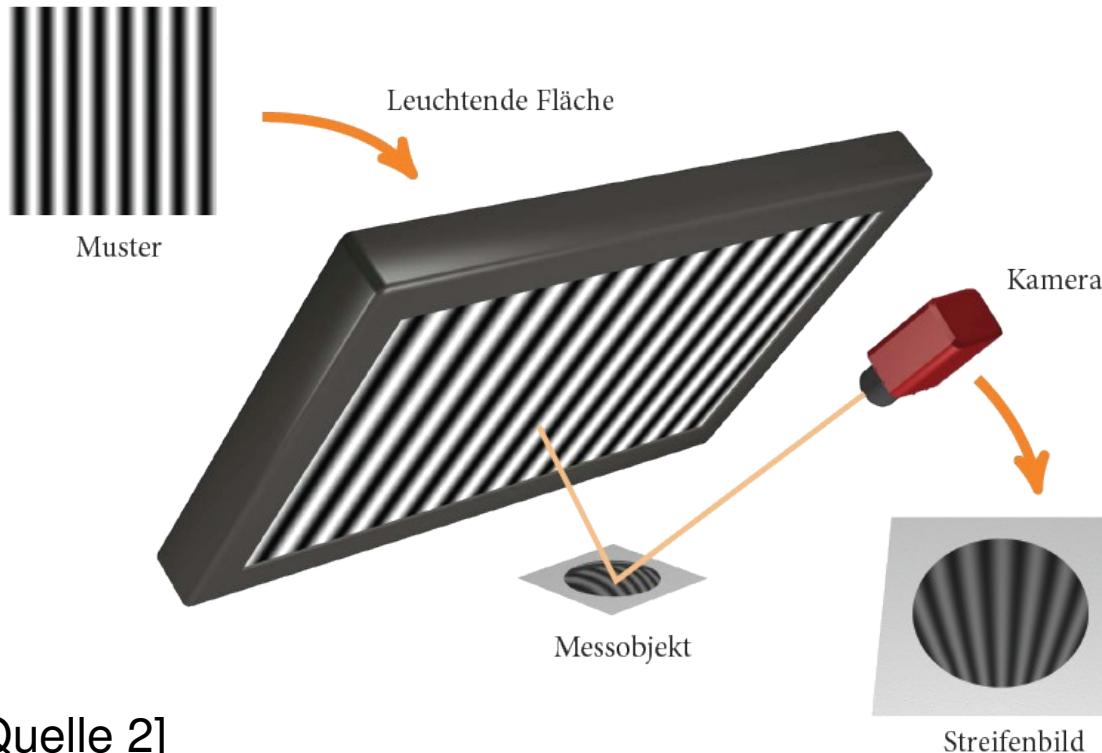
⇒ Auf welchen  
Mattscheibenort  
schauen wir?

⇒ Rekonstruktion  
des Sichtstrahls



# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Schema: resultierender Aufbau



[Quelle 2]

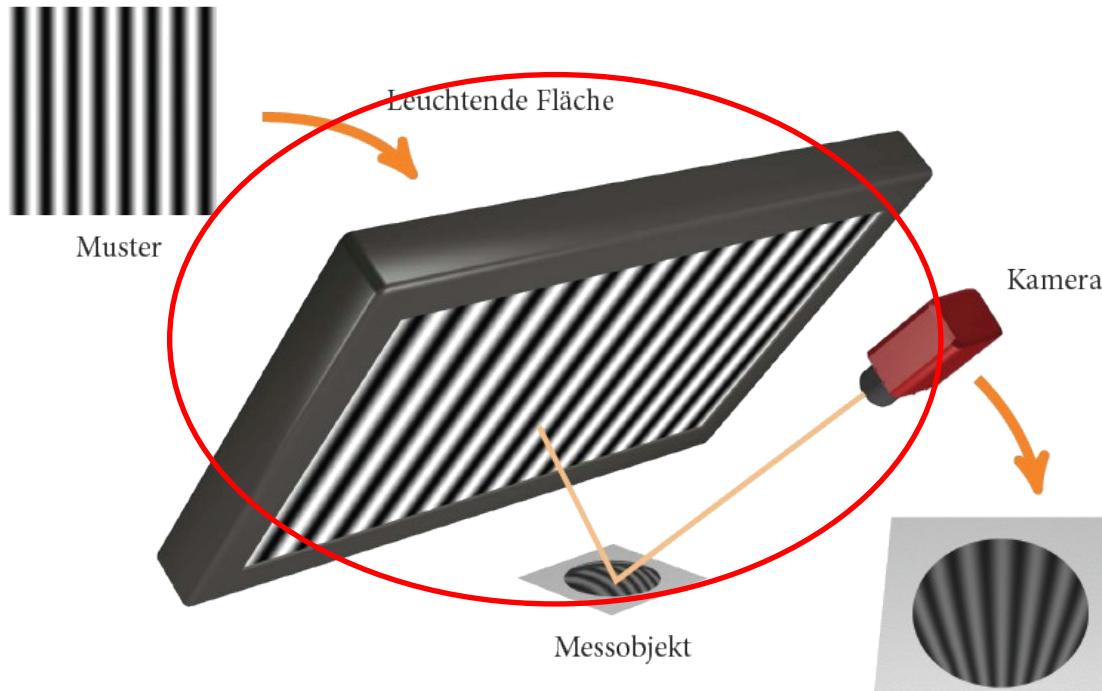
Annemarie Holleczeck – Deflektometrie

Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Schema: resultierender Aufbau



[Quelle 2]

Annemarie Holleczeck – Deflektometrie

Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



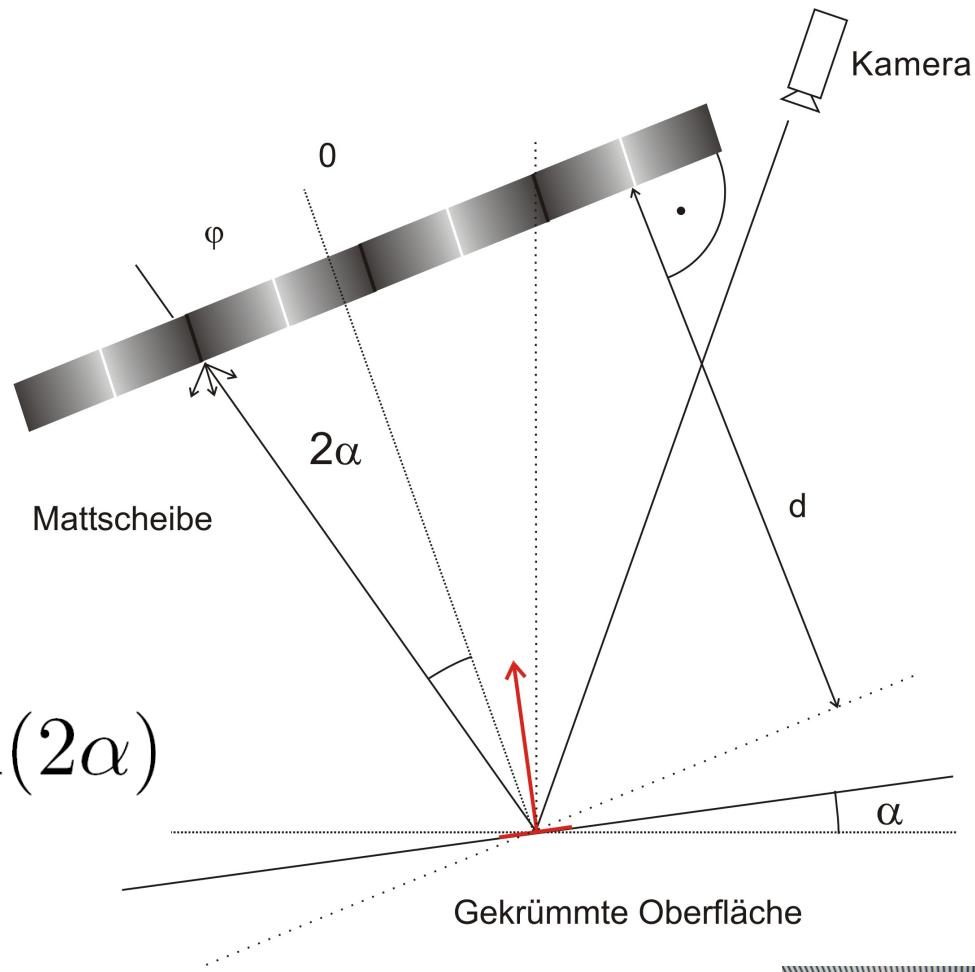
# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Bestimmung der Messgröße:  
Herleitung

p: Streifenbreite

d: Abstand Mattscheibe  
Oberfläche

$$\varphi \approx \frac{2\pi}{p} \cdot d \cdot \tan(2\alpha)$$



# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Detektion der Messgröße
  - Gesucht: Phase
  - Gegeben: Intensität im Pixel des CCD
    - Projektion von N Bildern mit verschobener Phase

$$I_S = I_0[1 + K \cdot \cos(\phi - \phi_S)] \quad \phi = \arctan \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}$$

wobei

$I_S$ : gemessene Intensität

4-Shift-Algorithmus

$I_0$ : mittlere Intensität

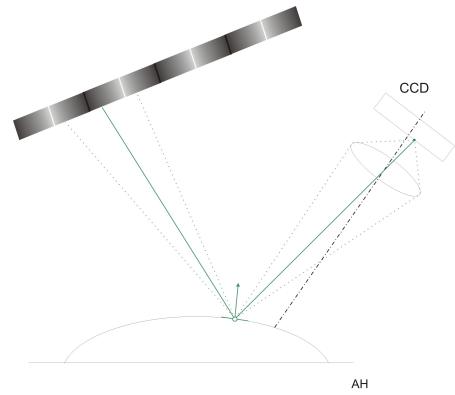
K: Kontrast

$\phi_S$ : Phasenoffset



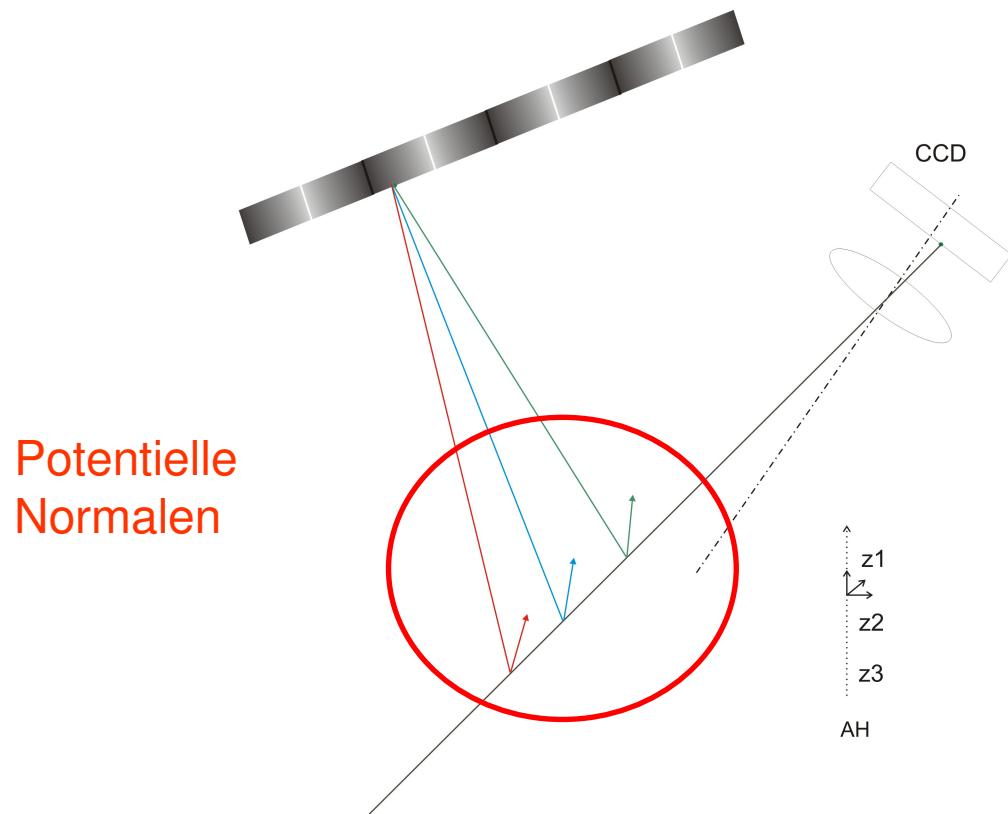
# PMD Messtechnik - Messprinzip

- Warum Projektion eines sinus-Musters?
  - Kodierung der Ortskoordinate des Schirms
  - Unscharfe Abbildung ändert Phase nicht (nur am Kontrast)
- Warum Phasenshift?
  - Ermittlung des Mattscheibenorts
  - Feinere Auflösung möglich als von Detektorrasterung vorgegeben
- Warum zwei Frequenzen
  - Erhöhung des Eindeutigkeitsbereichs (mit Phase [0;2pi[)
  - Mit zwei Frequenzen: über ganzen Screen  
Chinesischer Restesatz
- Warum vertikale und horizontale Projektion?
  - Zwei Dimensionen der Screen  
(Bestimmung der Neigung in x und in y Richtung)



# PMD Messtechnik – Problem

- Problem:  
Mehrdeutigkeit



# PMD Messtechnik – Lösung

- Mögliche Lösungen des Problems:

- *Verschieben der Mattscheibe*

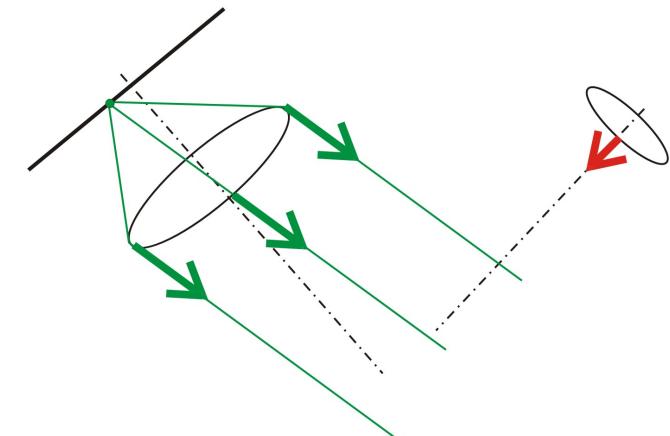
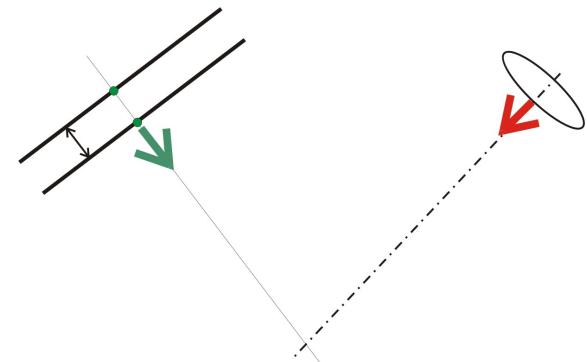
Nachteile

- Mechanisch aufwändig
    - Zeitaufwändig

- *Richtungskodierte Deflektometrie*

Nachteile

- Sehr aufwändige und teure Optik  
(sehr große Linse, großes Messfeld  
und großer Winkelbereich)



# PMD Messtechnik – Lösung II

- Praktikabelste Lösung:

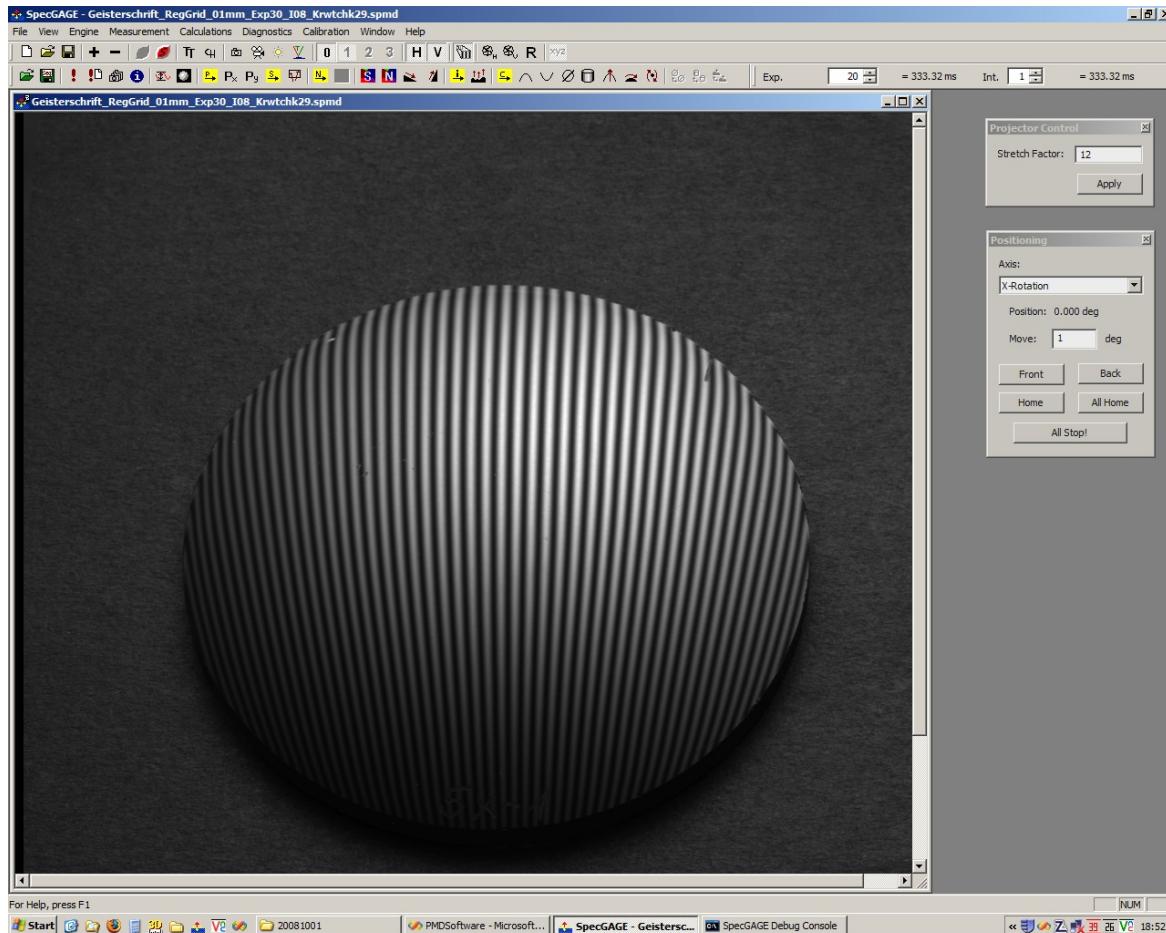


*Stereodeflektometrie*

2. Kamera beobachtet den Prüfling unter anderem Winkel
  - Auswertung der Messung: Berechnung der potentiellen Normalen in Weltkoordinaten
  - Vergleich des potentiellen Normalenfeldes beider Kameras
  - Math. nachweisbar: nur an der Position der wahren Normalen stimmen beide Felder überein



# Messung

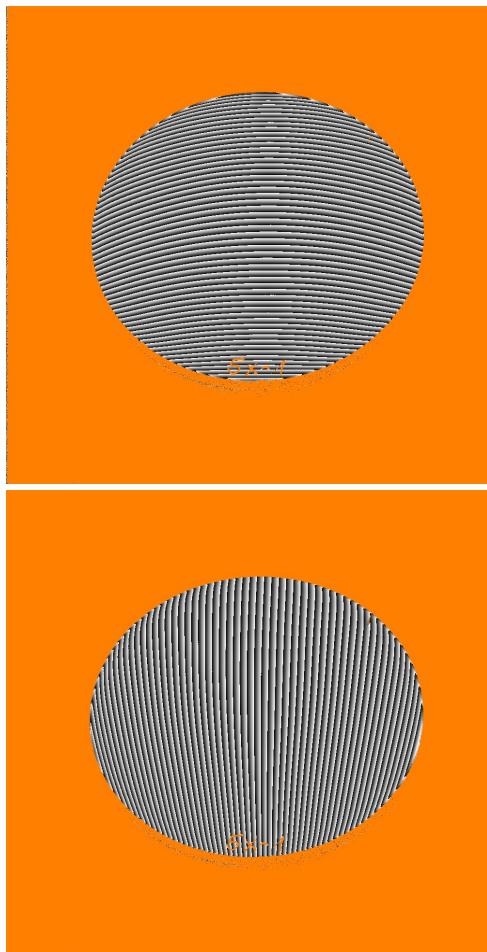


- Kamera nimmt 16 Bilder insgesamt auf
- 8 mit horizontalen, 8 mit vertikalen Streifen
- 4 der Bilder haben jeweils die selbe Frequenz  
„Vier-Shift-Algorithmus“

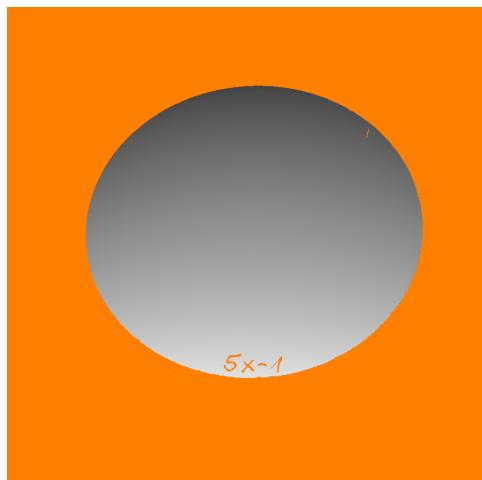
Annemarie Holleczeck – Deflektometrie  
Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



Phasen

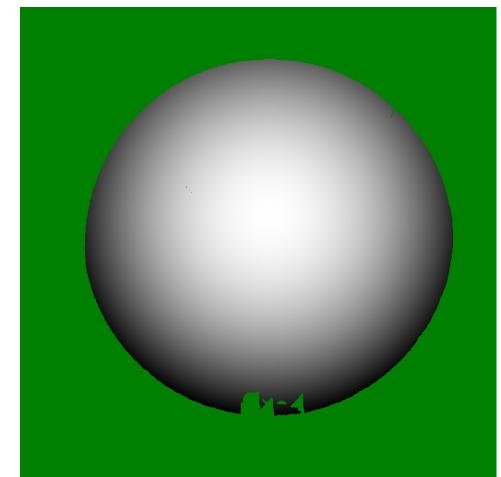


Neigung in x-Richtung



Numerische  
Integration

Absolute Höhe



Numerische  
Differentiation



# Messung

Numerische Differentiation

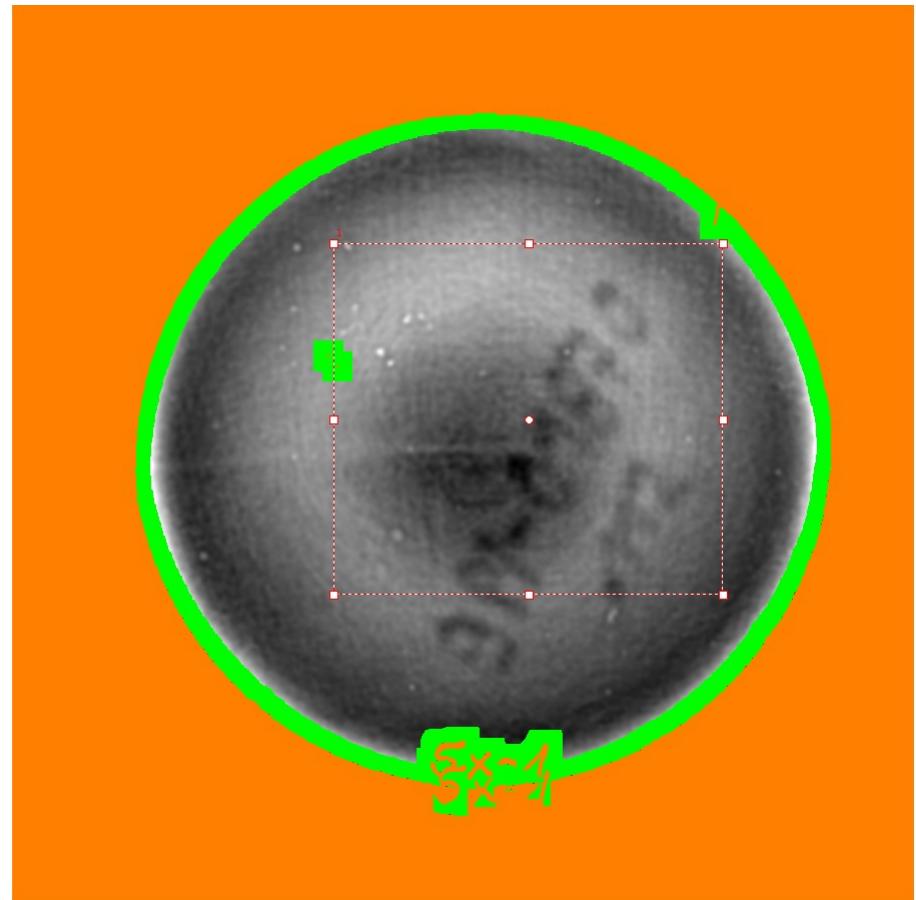
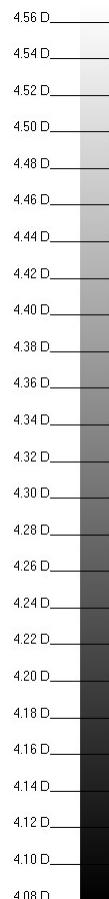
Hier angetragen:

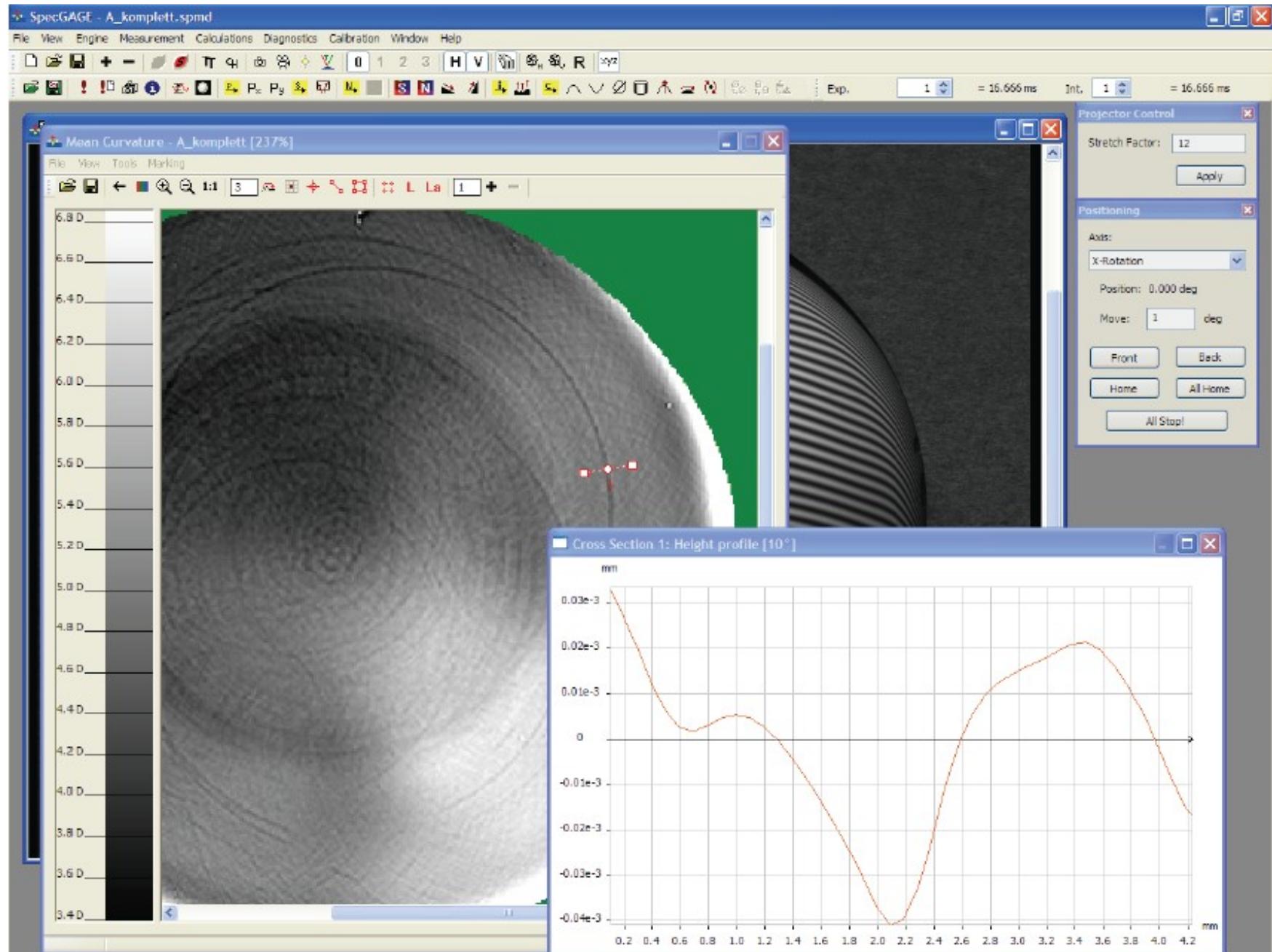
Mittlere Krümmung

Ergebnis:

„Geisterschrift“

~ 20 nm





[Quelle 2]

# Besonderheiten der PMD

- Spiegelnde Oberflächen werden i.A. mit interferometrischen Methoden vermessen, die **höhensensitiv** sind
- Ausnahme: z.B. Shearing Interferometer  
⇒ Hier muss man mit Einschränkungen rechnen

- Für die PMD gilt:

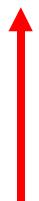
Der größte Vorteil der PMD: sie misst **Neigungen**;  
der größte Nachteil: sie misst **Neigungen**.



# Besonderheiten – Berechnung der Objektform

**Höhe:**  $z(x, y)$  (Skalar)

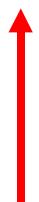
Numerische Integration



Numerische Differentiation

**Steigung:**  $\underline{p} = \nabla z(x, y)$

Numerische Integration



Numerische Differentiation

**Krümmung:**  $\underline{k} = \Delta z(x, y)$



# Besonderheiten – Berechnung der Objektform

**Höhe:**  $z(x, y)$  (Skalar)

Numerische Integration

Numerische Differentiation

**Steigung:**  $\underline{p} = \nabla z(x, y)$

$$\tan\alpha = -p_x, \tan\beta = -p_y$$

PMD

Numerische Integration

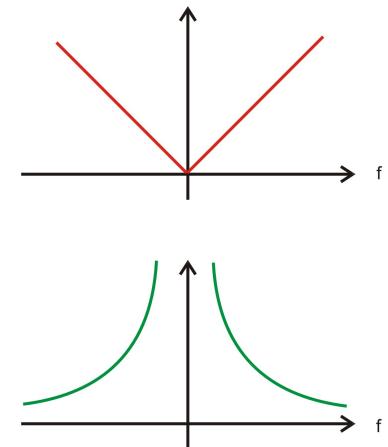
Numerische Differentiation

**Krümmung:**  $\underline{k} = \Delta z(x, y)$



# Besonderheiten - Informationstheorie

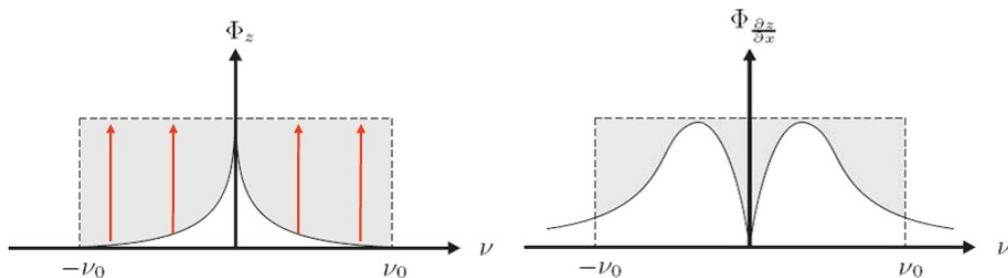
- Kleiner mathematischer Exkurs:
  - Im Fourierraum:  
Sowohl numerische Differentiation als auch Integration sind lineare Operationen  
⇒ Multiplikation mit der jeweiligen OTF
  - Numerisches Differenzieren:  
verstärkt hochfrequente Signalanteile („Rauschen“)
  - Numerisches Integrieren:  
Num. Integration: verstärkt niederfrequente Signalanteile (Kalibrierfehler, daher „Objektfehler“)



# Besonderheiten - Informationstheorie

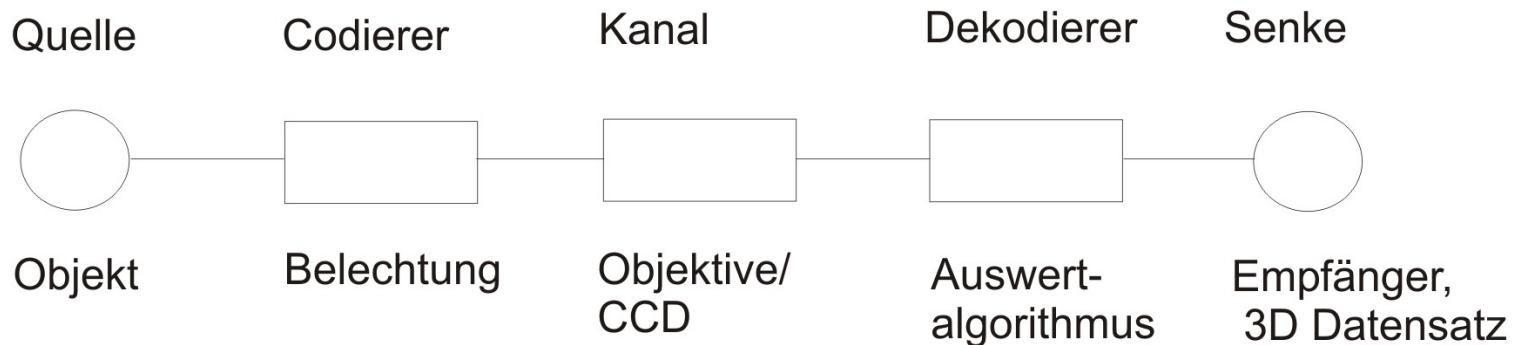
- Kleiner mathematischer Exkurs:
  - Herkömmliche Höhenmessung (links)
  - PMD misst Neigungsdaten (rechts): intrinsische „optische Differentiation“

⇒ Informationstheoretisch effizientes Messverfahren



# Besonderheiten - Informationstheorie

- Informationstheorie – was bedeutet das?



# Besonderheiten - Genauigkeit

- Problematik der **globalen** und **lokalen** Genauigkeit

Da nicht nur Neigung von Interesse, sondern auch Form, muss numerisch integriert werden

⇒ lokal sehr genau

⇒ global schlechter als äquivalente interferometrische Messung da  
*Aufsummation aller Messfehler* über den gesamten Messbereich

⇒ „Geisterschrift“ (20 nm) messbar, da *lokaler Defekt*



# Besonderheiten - Dynamikbereich

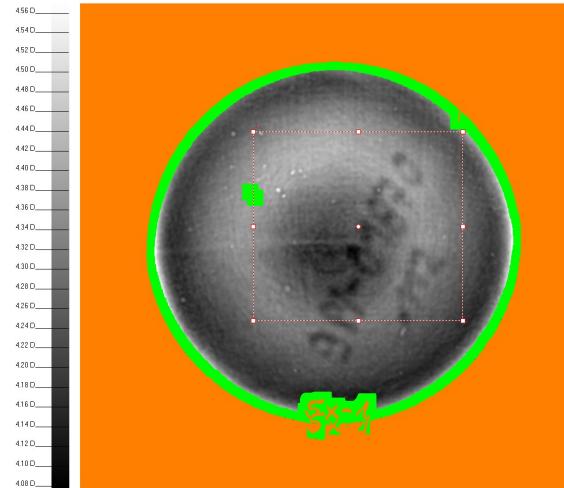
- Dynamikbereich der PMD

Dynamikbereich:

Verhältnis Messbereich: Messauflösung  
z.B Hub zu Oberflächenstruktur

Beispiel: „Geisterschrift“

- 10mm Hub zu 20 nm Oberflächenstruktur
- Dynamikbereich:  $\sim 500\ 000$

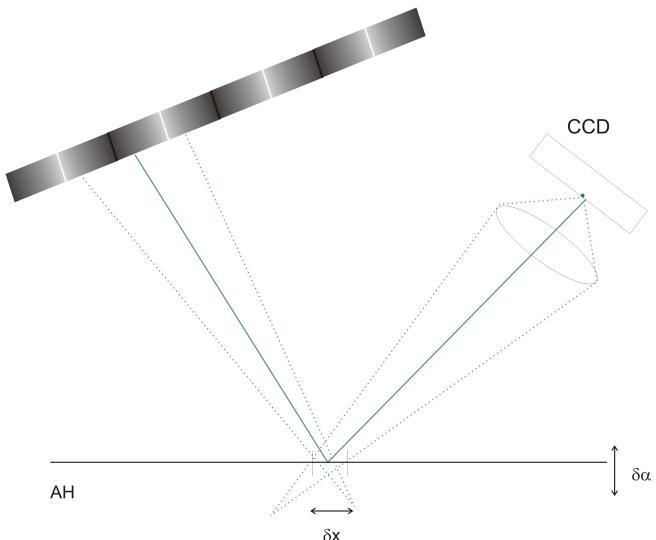


# Besonderheiten - Unschärferelation

- Payoff zwischen hoher lateraler Auflösung und Winkelunschärfe
  - $Q = \text{const S/NR} \sim 1000$  (für 4-Shift-Phasenverfahren)
  - Unschärferelation hat Dimension einer Höhe  $\sim 1\text{nm}$  (lokal!)
- ⇒ Höhensensitivität unabhängig von lateraler Auflösung!

$$\tan(\delta\alpha) \cdot \delta x \approx \delta\alpha \cdot \delta x \geq \frac{\pi\lambda}{Q}$$

$$Q = 2\pi \frac{\sqrt{2}I_0}{\Delta I}$$



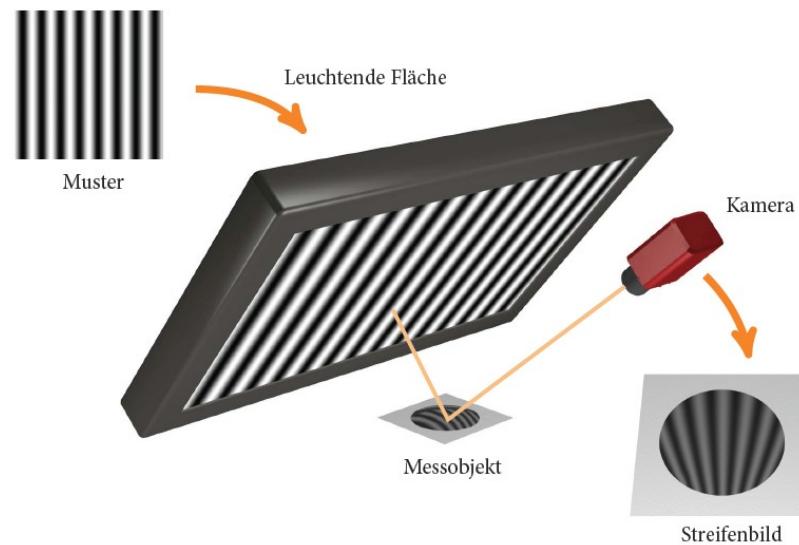
- Hinführung zum Thema
- Die PMD Messtechnik
  - Messprinzip
  - Ausgewähltes Problem und dessen Lösung
  - Messbeispiel
  - Besonderheiten
  - Grenzen und Limitierungen
- **Technische Umsetzung**
- Bezugnahme auf Optische Lithographie (Mikrodeflektometrie)
- Fazit

Annemarie Holleczeck – Deflektometrie  
Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# PMD Messtechnik

- Schematischer Aufbau
    - DMD-Beamer
    - Mattscheibe
    - Kamera
    - Prüfling
  - Extrem robuster Aufbau
  - Handelsübliche Geräte
- ⇒ Kostengünstig

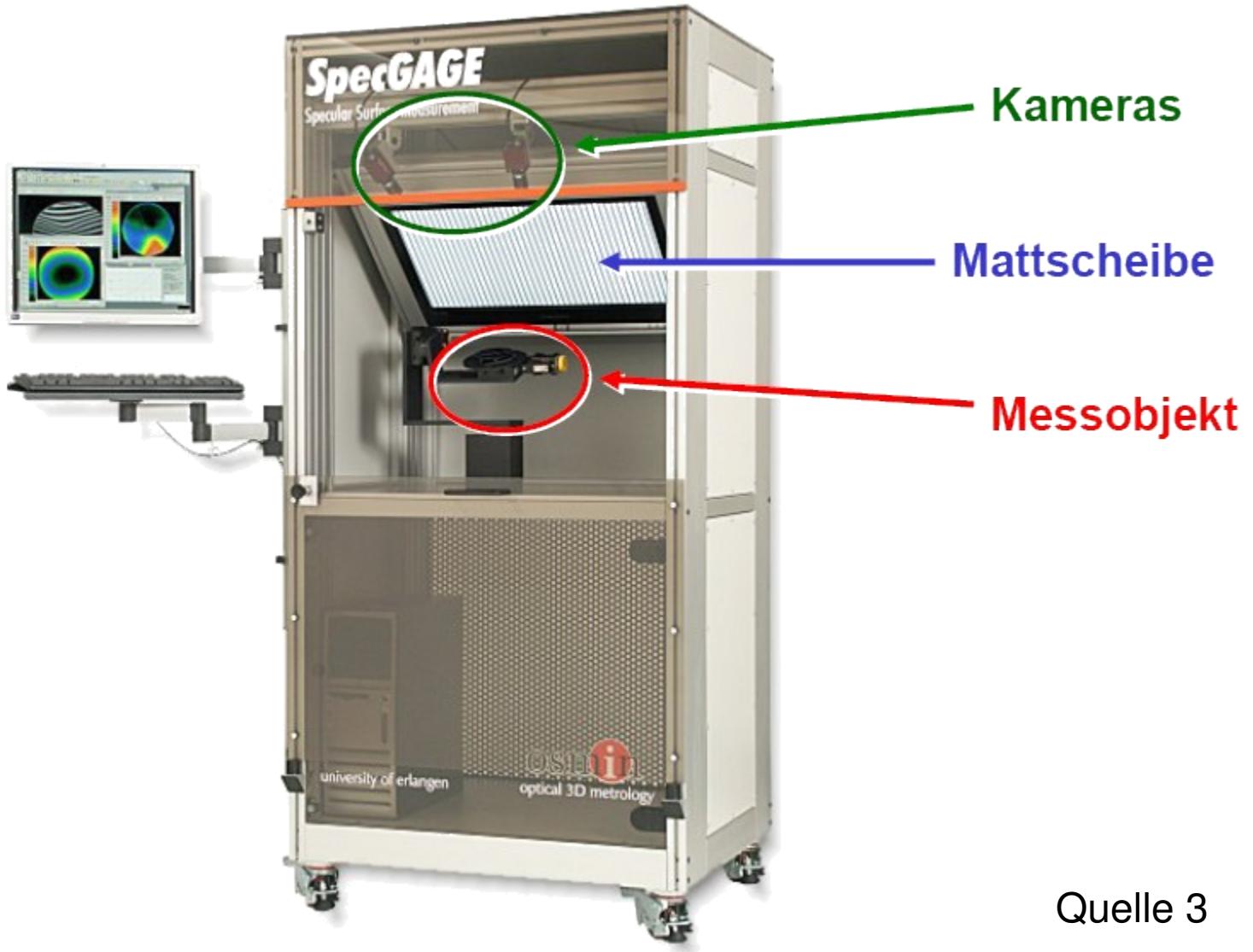


[Quelle 2]

Annemarie Holleczeck – Deflektometrie

Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09





Quelle 3



- Hinführung zum Thema
- Die PMD Messtechnik
  - Messprinzip
  - Ausgewähltes Problem und dessen Lösung
  - Messbeispiel
  - Besonderheiten
  - Grenzen und Limitierungen
- Technische Umsetzung
- **Bezugnahme auf Optische Lithographie (Mikrodeflektometrie)**
- Fazit

Annemarie Holleczek – Deflektometrie  
Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# Bezugnahme auf optische Lithographie

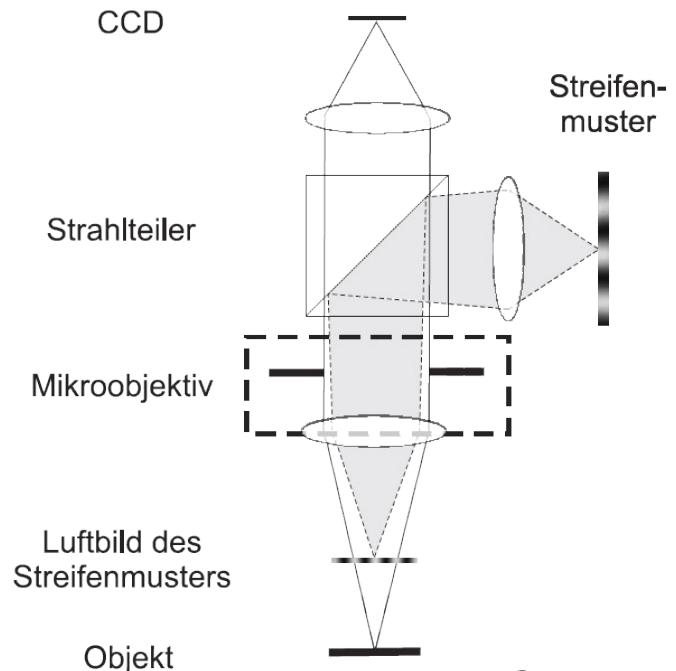
- Mögliche Anwendung der PMD in optischer Lithographie
  - EUV-Lithographie: Einsatz von kleinen Spiegeln zur Strahlführung  
⇒ Einsatz von PMD zur einzelnen und effizienten Messung der Spiegel (Unschärferelation lässt dies zu)
- PMD auch auf mikroskopische Prozesse anwendbar
  - Messung von Masken, Wafern etc.



# Bezugnahme auf optische Lithographie

- Ausführung: Mikrodeflektometrie
  - Mikroskopaufbau
  - ⇒ Große Beleuchtungsapertur
  - ⇒ Geringer Arbeitsabstand

Es gelten ähnliche Prinzipien wie  
in der Makro-PMD



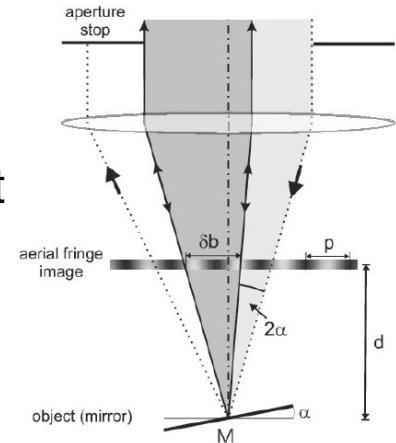
[Quelle 5]



# Bezugnahme auf optische Lithographie

## Unterschied zur PMD – Konsequenzen im Aufbau

- Keine Mattscheibe
  - nur reelles Zwischenbild zwischen Objektiv und Objekt
- Beleuchtungs- Beobachtungsapertur beeinflusst Abbildung
  - Bei normaler PMD: großflächige Mattscheibe
  - Bei Mikro-PMD: Apertur durch Objektiv fest vorgegeben
- Messignal ist kodiert in Differenz der Aperturen
  - geringere Winkeldynamik als bei Makro-PMD wegen begrenzender Aperturen

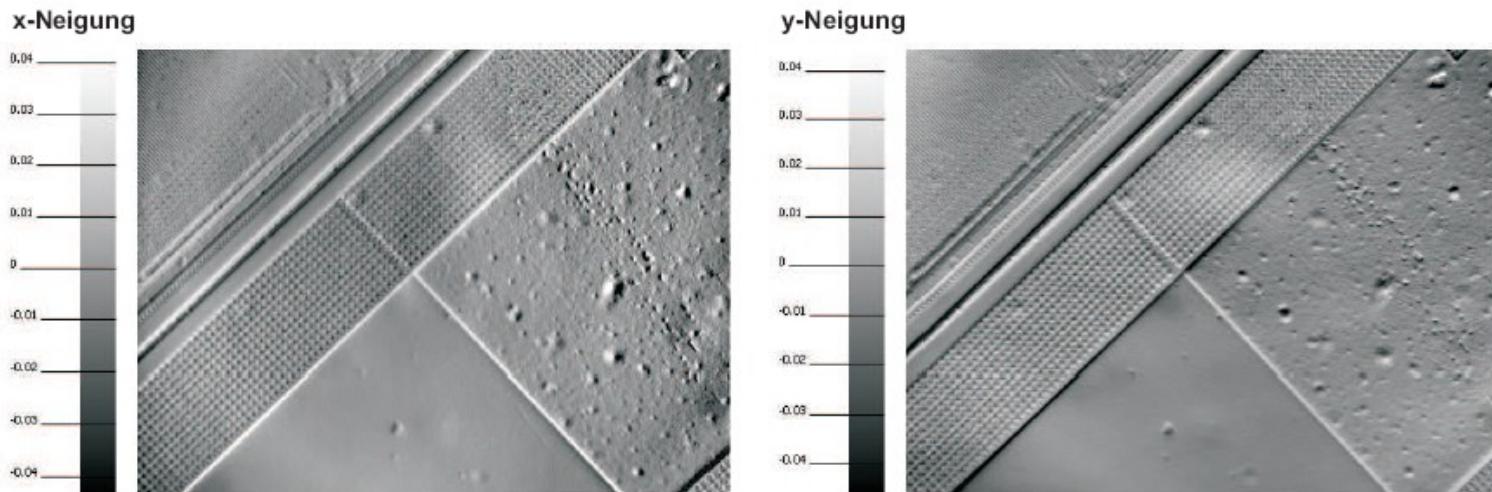


[Quelle 5]



# Bezugnahme auf optische Lithographie

- Ergebnis: z.B. Waferoberfläche

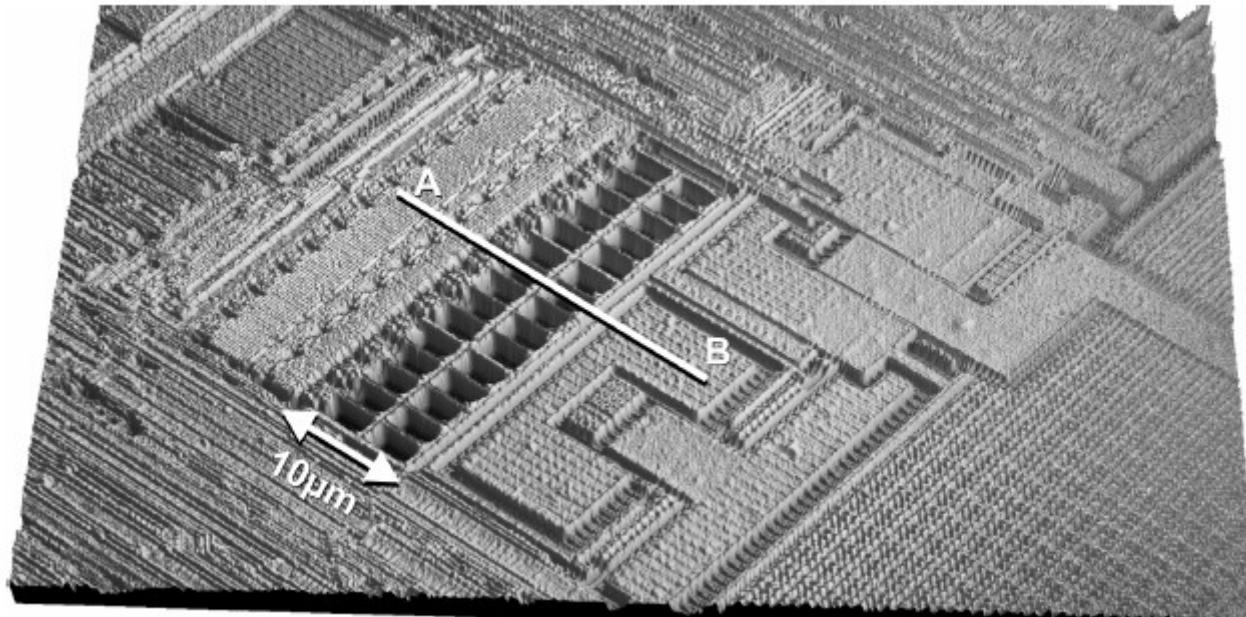


[Quelle 6]



# Bezugnahme auf optische Lithographie

- Ergebnis: z.B. Waferoberfläche



[Quelle 6]



- Hinführung zum Thema
- Die PMD Messtechnik
  - Messprinzip
  - Ausgewähltes Problem und dessen Lösung
  - Messbeispiel
  - Besonderheiten
  - Grenzen und Limitierungen
- Technische Umsetzung
- Bezugnahme auf Optische Lithographie (Mikrodeflektometrie)
- **Fazit**

Annemarie Holleczek – Deflektometrie  
Scheinseminar Optische Lithographie im WS 2008/09



# Fazit

- PMD ist:
  - Extrem robust gegenüber Störanfällen von außen
  - Aufwändiger Kalibrierprozess nötig
  - kostengünstiger Aufbau
  - Weit einsetzbar (Vermessung von Parabolspiegeln, Autoscheiben, Gleitsichtbrillengläsern, Kontaktlinsen, Wafern)
  - Eine Methode, um spiegelnde Freiformflächen auf 1/100 Dioptrie auf ein 3x3mm<sup>2</sup> genau und schnell zu vermessen (~nm Auflösung)



# Quellen

1. Markus C. Knauer: Absolute Phasenmessende Deflektometrie
2. Jürgen Kaminski, Geometrische Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen aus deflektometrischen Messdaten, 2008
3. Markus C. Knauer, [http://smarthome.unibw-muenchen.de/IMC/061208\\\_IEEE\\\_01.pdf](http://smarthome.unibw-muenchen.de/IMC/061208\_IEEE\_01.pdf), 2006
4. Svenja Ettl, Vorlesung "Optische 3D Sensoren und Virtuelle Methoden", WS 2008/09
5. Gerd Häusler, Claus Richter, Karl-Heinz Leitz, and Markus C. Knauer, Microdeflectometry – a novel tool to acquire 3D microtopography with nanometer height resolution
6. Markus C. Knauer et al.: Deflektometrie macht der Interferometrie Konkurrenz





**Vielen Dank  
für Ihre/Eure Aufmerksamkeit!**