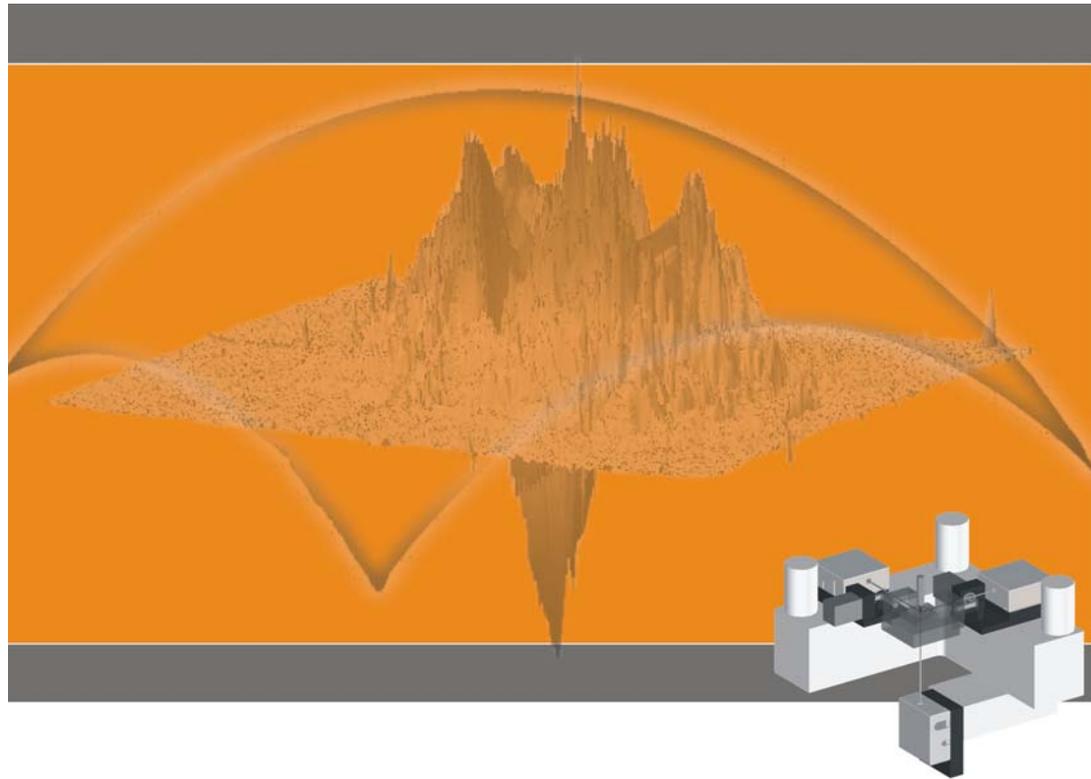


# Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

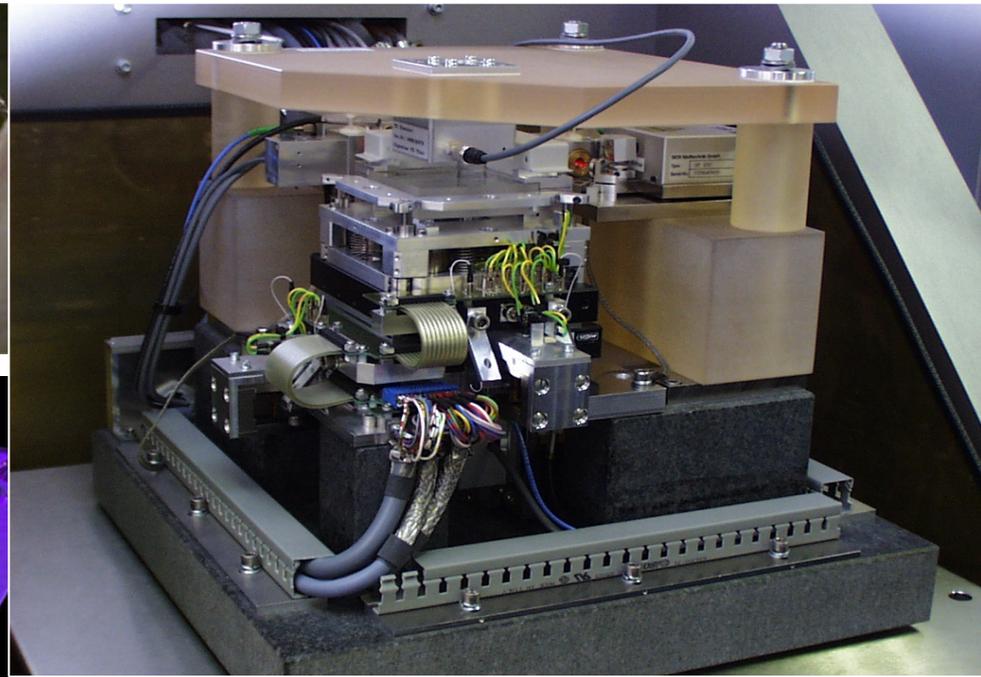
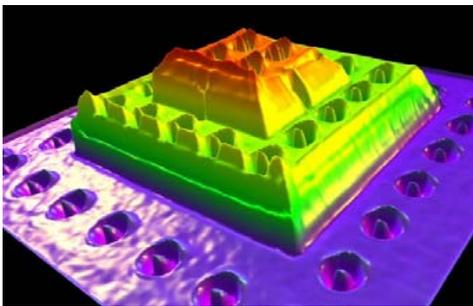
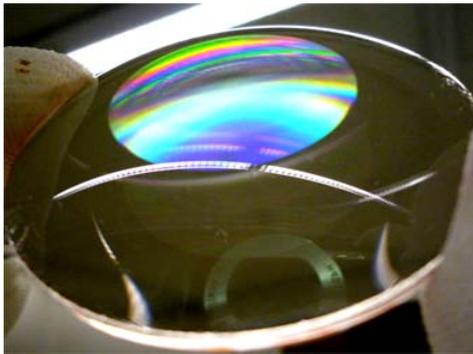


**6. Fachtagung Feinwerktechnische Konstruktion  
8. Nov. 2012, Dresden**

R. Theska  
Technische Universität Ilmenau

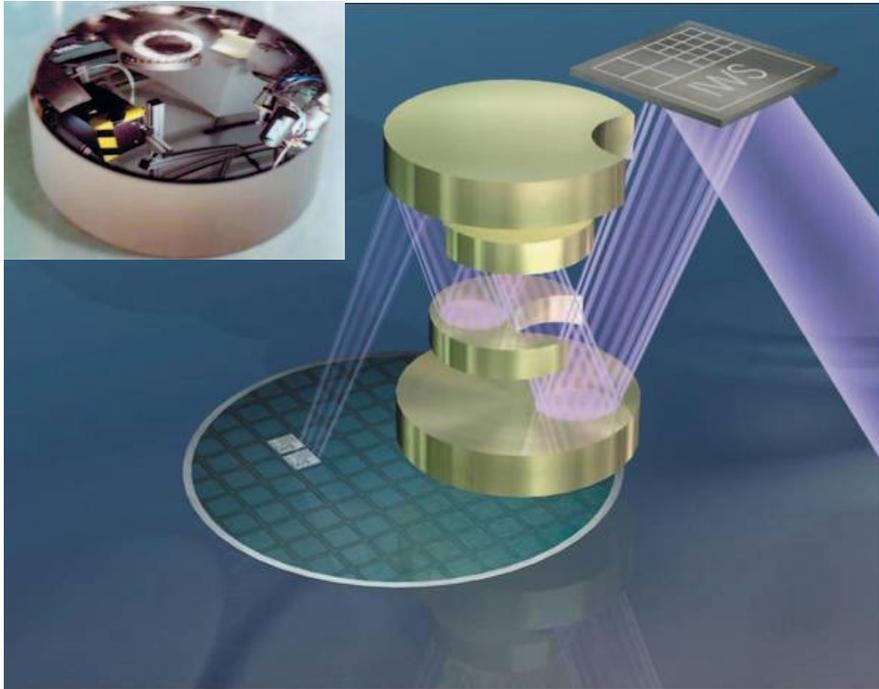
# Gliederung

1. Motivation
2. Nanopositionier- und Nanomessmaschine
3. Multi-Sensor-Technologie
4. Möglichkeiten und Ausblick



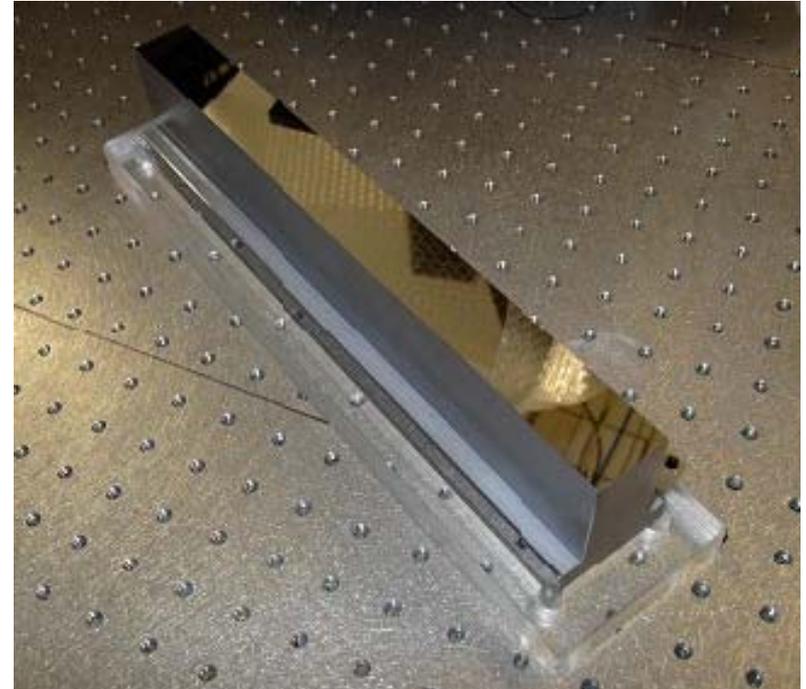
# Herausforderungen

Extreme Anforderungen an Formabweichungen und Rauheiten von ausgedehnt großen Spiegeln in optischen Systemen  
„atomare Präzision“ ( $< 0.15 \text{ nm}$ )



## Spiegel für EUV-Lithographie

Quelle: Tilmann, Lowisch: *EUV-Lithographie – die Chipfertigung der Zukunft*. In: *Photonik 2/2008*. S. 44-47

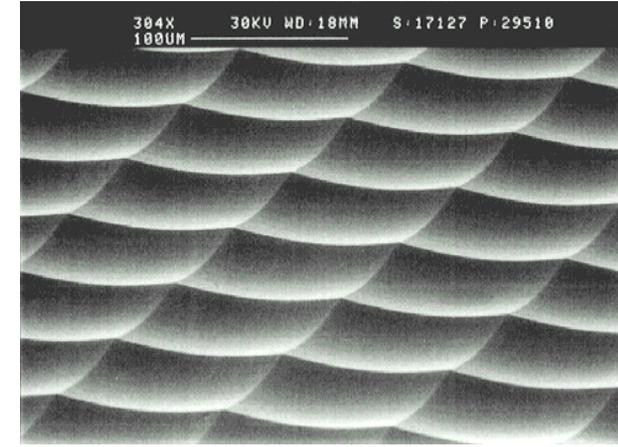
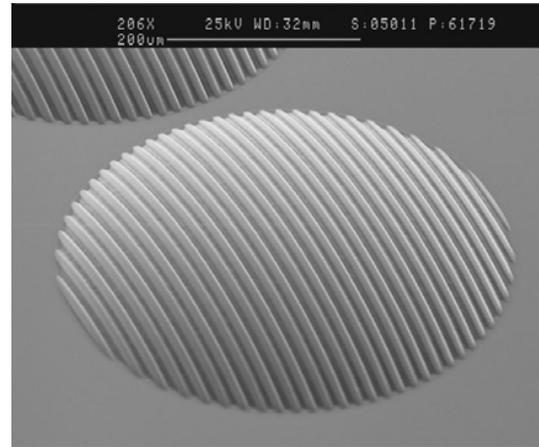
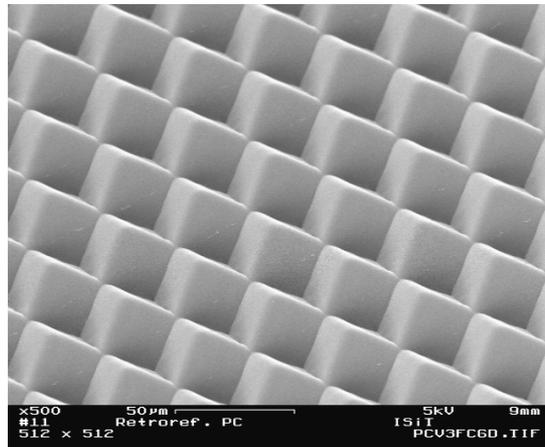
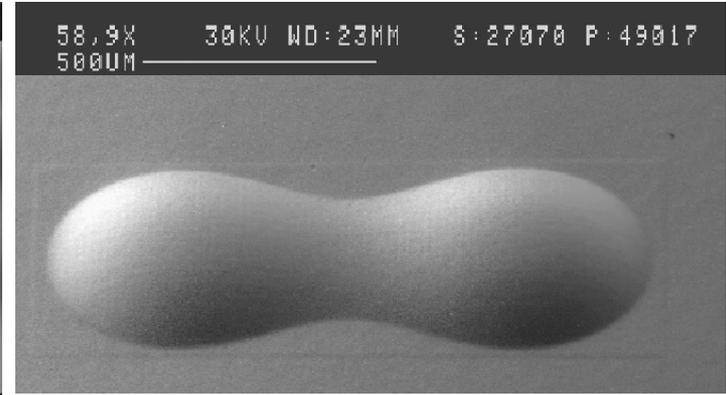
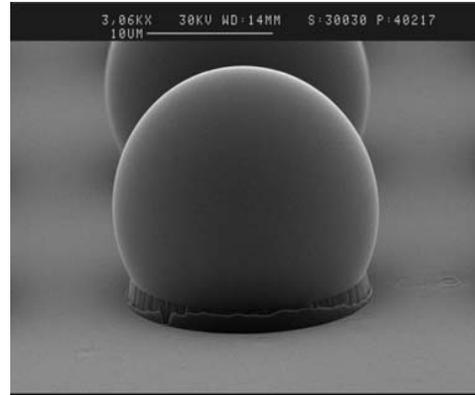
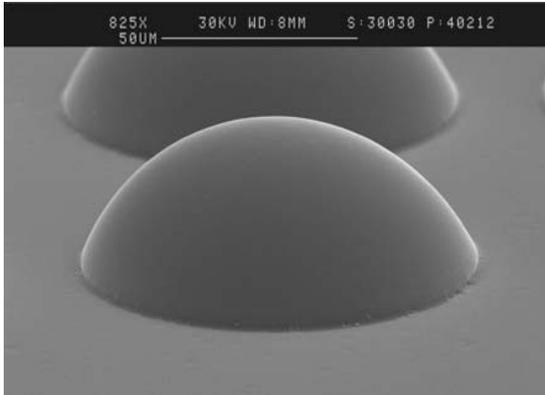


## Bessy Synchrotronspiegel

Quelle: Siewert, Bessy

# Herausforderungen

## Refraktive und diffraktive Strukturen



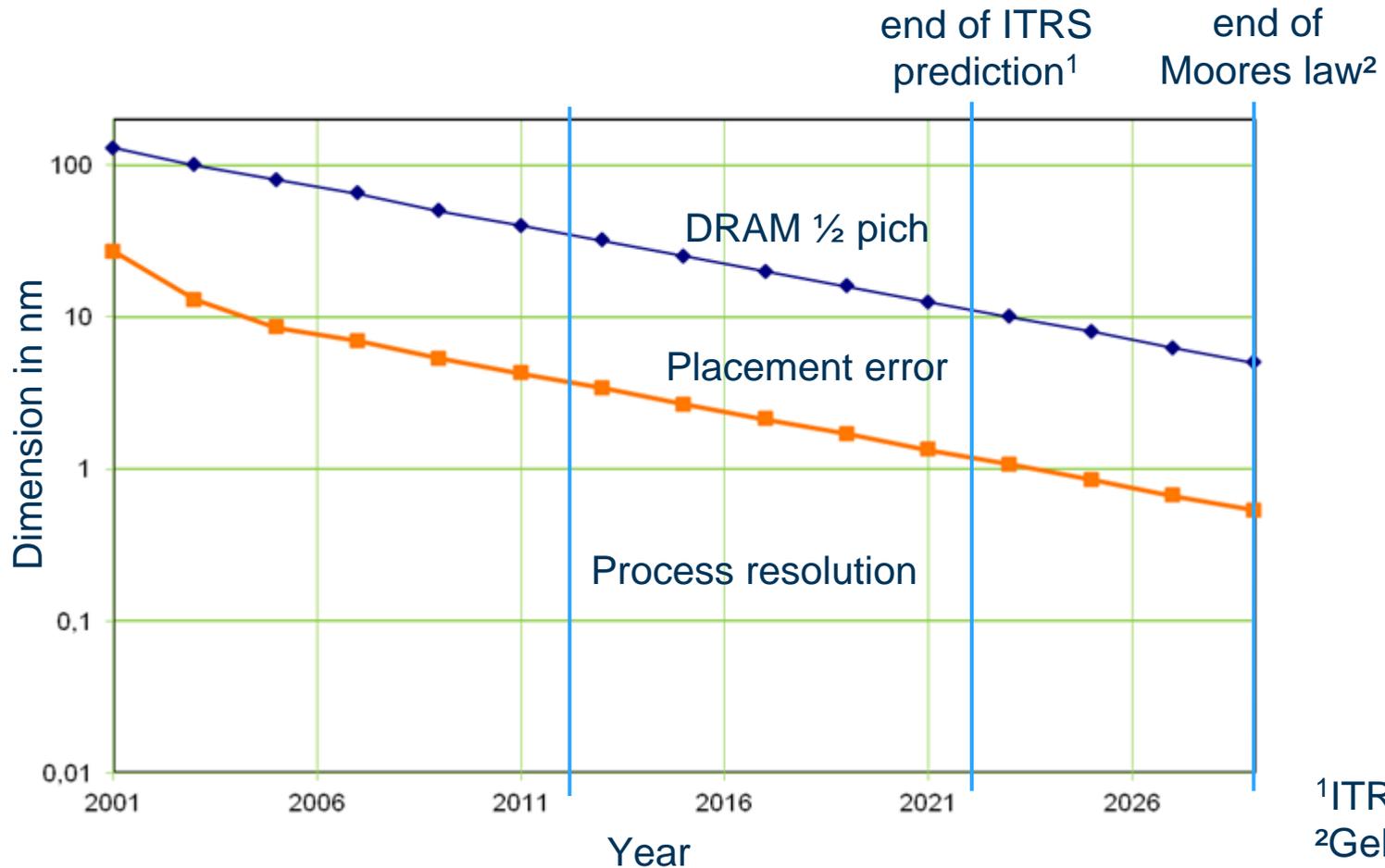
Quelle: K. Reimer, ISIT/FhG

Quelle: U. Zeitner IOF/FhG

Quelle: B. Kley FSU, IAP Jena

# International Technology Roadmap of Semiconductors

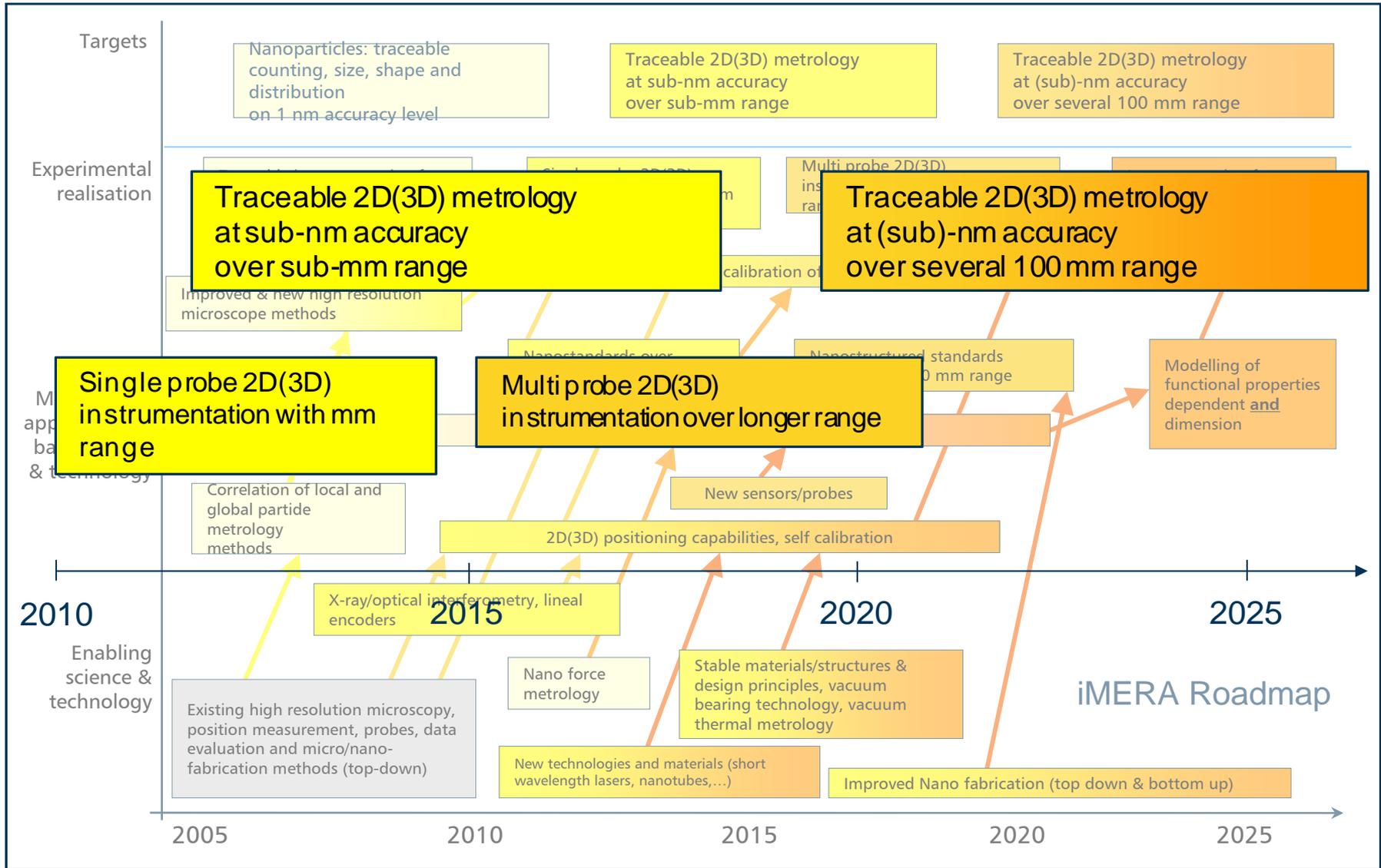
ITRS		2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025
DRAM (1/2 pitch)	in nm	130	100	80	65	50	40	32	25	20	16	12.5	10	8
Placement error	in nm	27.0	13.0	8.5	6.9	5.3	4.3	3.4	2.7	2.1	1.7	1.3	1.1	0.9



<sup>1</sup>ITRS 2009/2010

<sup>2</sup>Gelsinger/ Intel

# Dimensional metrology for micro- and nano- technologies



# Herausforderungen

- Strukturen erreichen atomare Abmessungen
- Skalenübergreifende Messung, Positionierung und Bearbeitung von Subnanometer bis (hunderte) Millimeter
- Wachsende Anforderungen nach wirklichen 3D-Messungen

## Einsatzbereiche

- Mikro-/Nanoelektronik
- Mikromechanik
- Mikrosystemtechnik
- Metrologie
- Präzisionsoptik
- Präzisionstechnik
- Biologie/Gentechnik
- Chemie

## Aufgaben

- Messung
- Positionierung
- Antastung
- Bearbeitung
- Manipulation

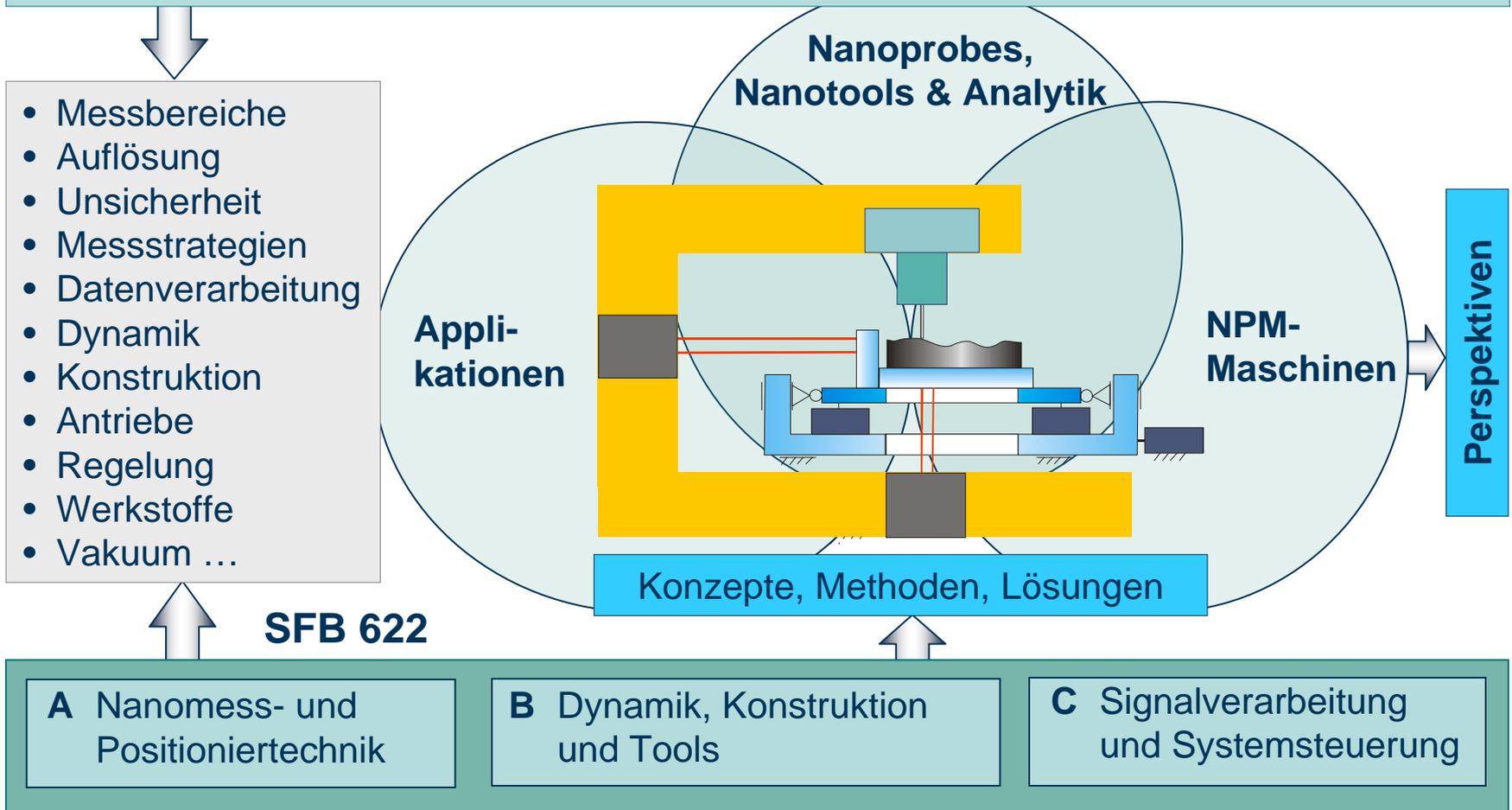
## Herausforderungen

- Zunehmende Arbeitsvolumina
- Wachsende Auflösung, Reproduzierbarkeit, Genauigkeit
- Hohe Dynamik
- Wachsende Komplexität

Untersuchung der Grenzbereiche des physikalisch Möglichen und des technisch Machbaren.

# Zielstellung des SFB 622 (2002-2013)

## Grenzbereiche der Nanopositionier- und Nanomesstechnik



# Holistischer Ansatz der Maschinenentwicklung

- Anwendung, fehlerminimaler Mess-, Positionierungs-, Konstruktions- und Steuer- und Regelungsprinzipien
- Minimierung aller Fehlereinflüsse des gesamten Messkreises
- Optimierung der gesamten Maschine und der Prozesse

Verbesserte Funktionalität  
notwendig in:

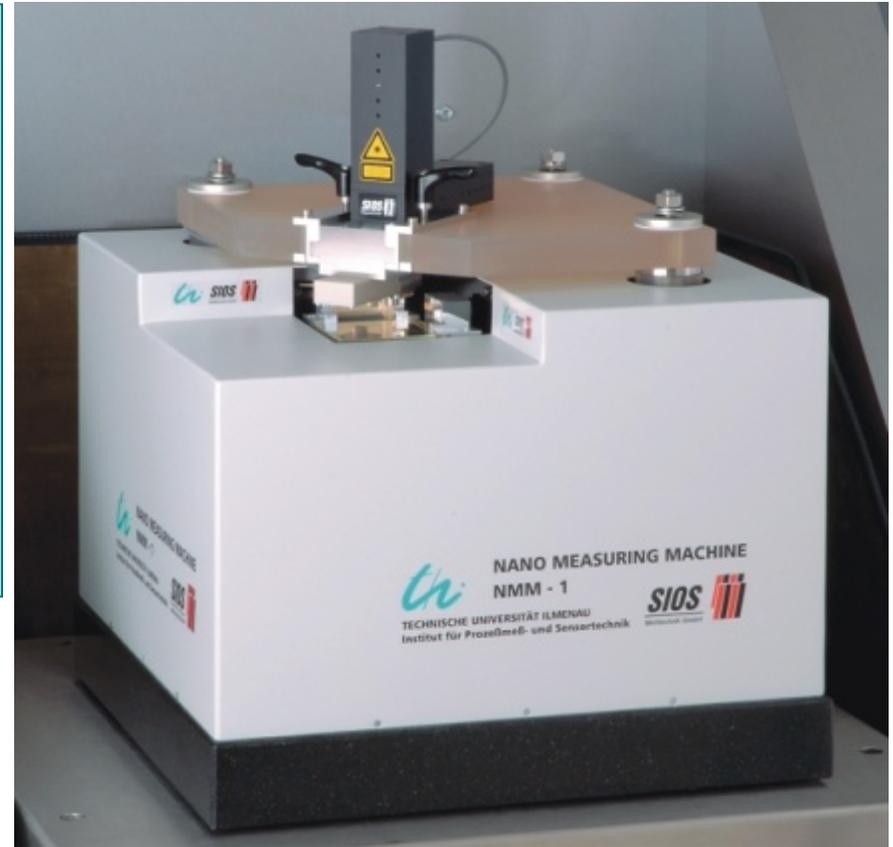
- Messung
- Positionierung
- Antastung
- Bearbeitung
- Manipulation

Kompensation und Korrektur  
von unvermeidlichen Restfehlern

- Umgebungseinflüsse
- Sensor-Objekt-Wechselwirkung
- Einflüsse des Messobjektes
- Mechanische und zeitliche Stabilität
- Dynamische Störungen
- Geometrische Restabweichungen
- ...

# Nanopositionier- und Nanomessmaschine

- Großes Arbeitsvolumen ( verglichen zu Atomkraftmikroskopen):  
25 mm x 25 mm x 5 mm
- Subnanometerauflösung:  
0.08 nm
- Nanometerreproduzierbarkeit  
und -messunsicherheit
- Universelle Anwendbarkeit  
durch Einsatz verschiedener  
optischer, taktiler und AFM  
Tastsysteme



NMM - 1

# Leistungsfähigkeit der NPM-Maschine



Messbereich:  $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$

Auflösung: 0.08 nm

Scangeschwindigkeit:

10  $\mu\text{m/s}$  (AFM)

6 mm/s (Fokussensor)

Auffinden eines menschlichen

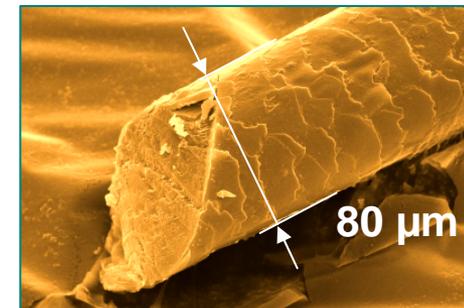
Haars ( $80 \mu\text{m}$ ) im Raum

Dresden:  $25 \times 25 \times 5 \text{ km}^3$  mit einer

Geschwindigkeit von

36 km/h (Auto)

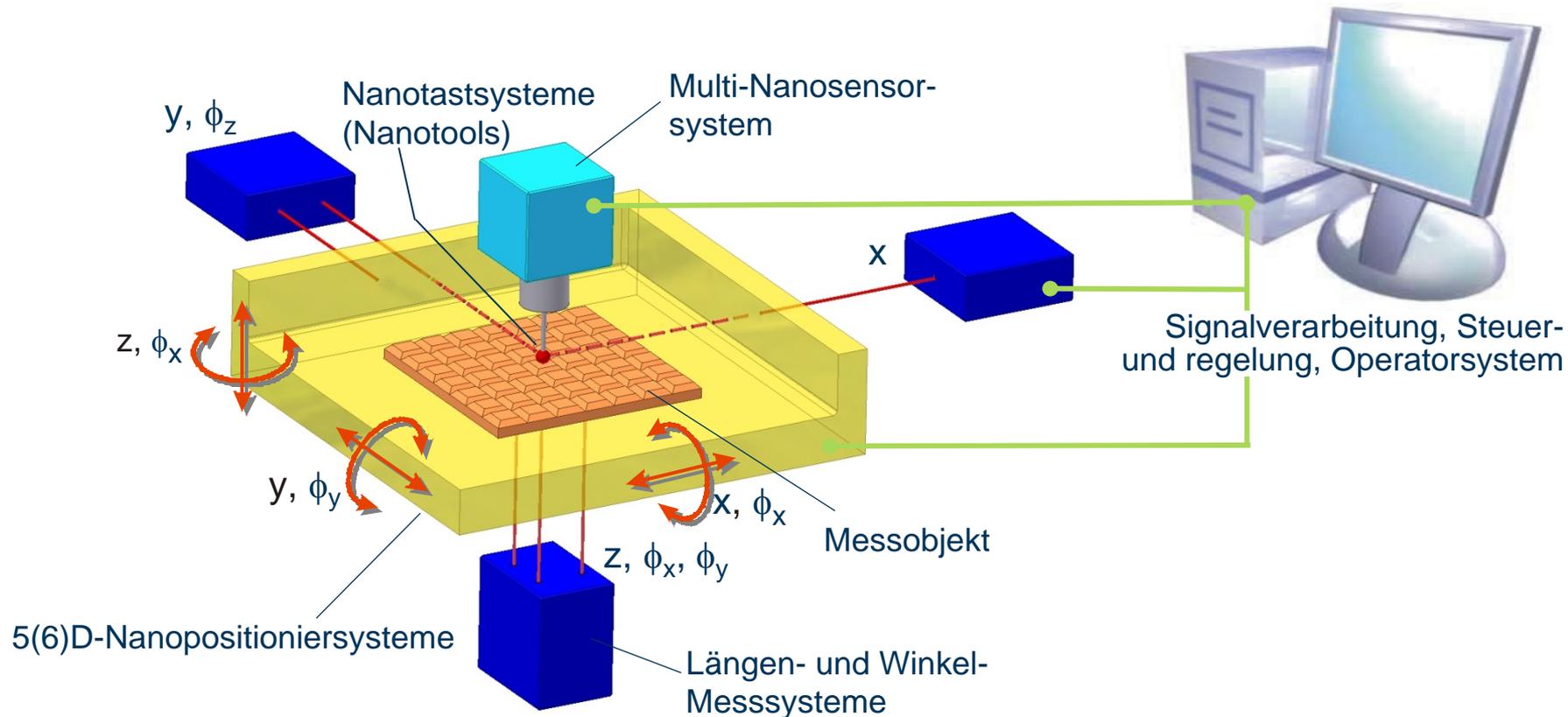
216 km/h (Hubschrauber)



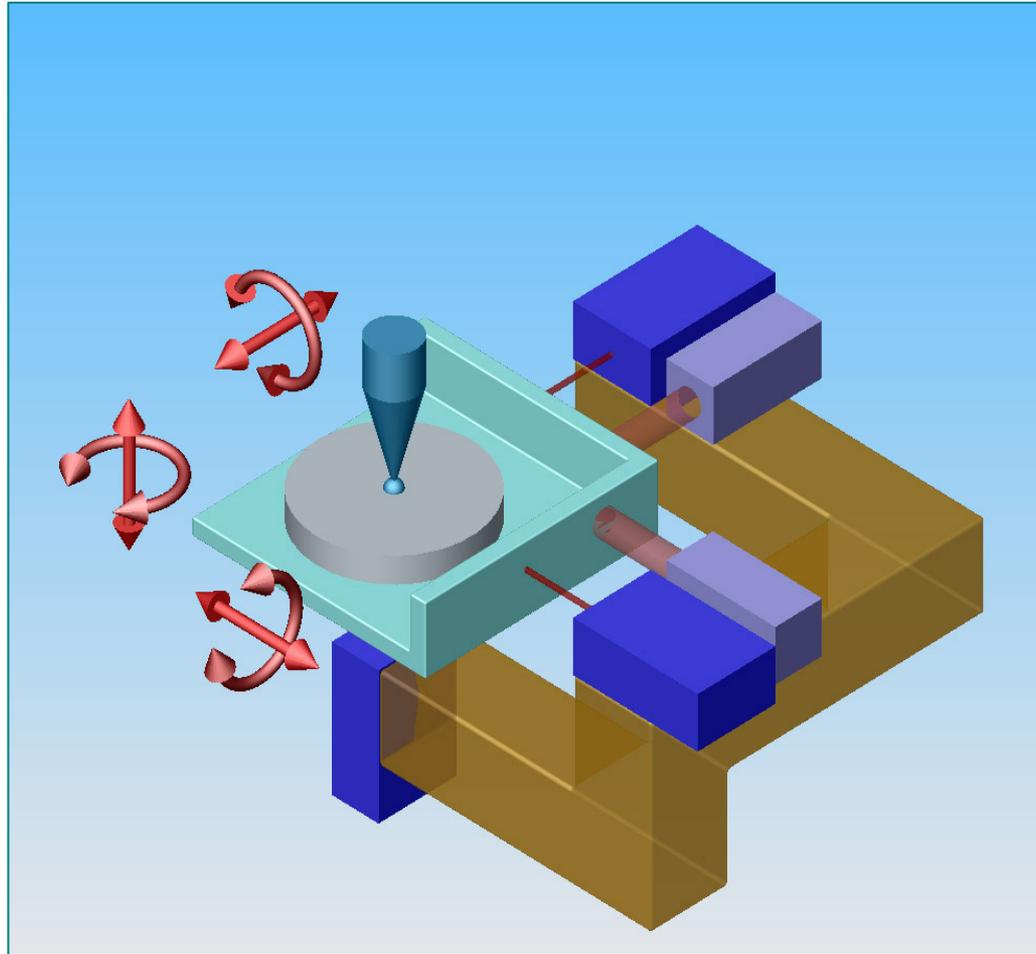
Menschliches Haar

# Maschinenkonzept

- Fasergegekoppeltes Mehrachs-Laserinterferometer-System
- Erweitertes 3D-Abbe-Komparatorprinzip
- Multi-Nanosensor-Ansatz (Nullpunktindikator)



# Erweitertes 3D- Abbe-Komparator-Prinzip



## 3 Interferometer

- Kartesisches Koordinatensystem
- gemeinsamer Schnittpunkt

**Taster** = Nullindikator im  
gemeinsamen Schnittpunkt

$$l_{off_i} \rightarrow 0$$

## Spiegelecke

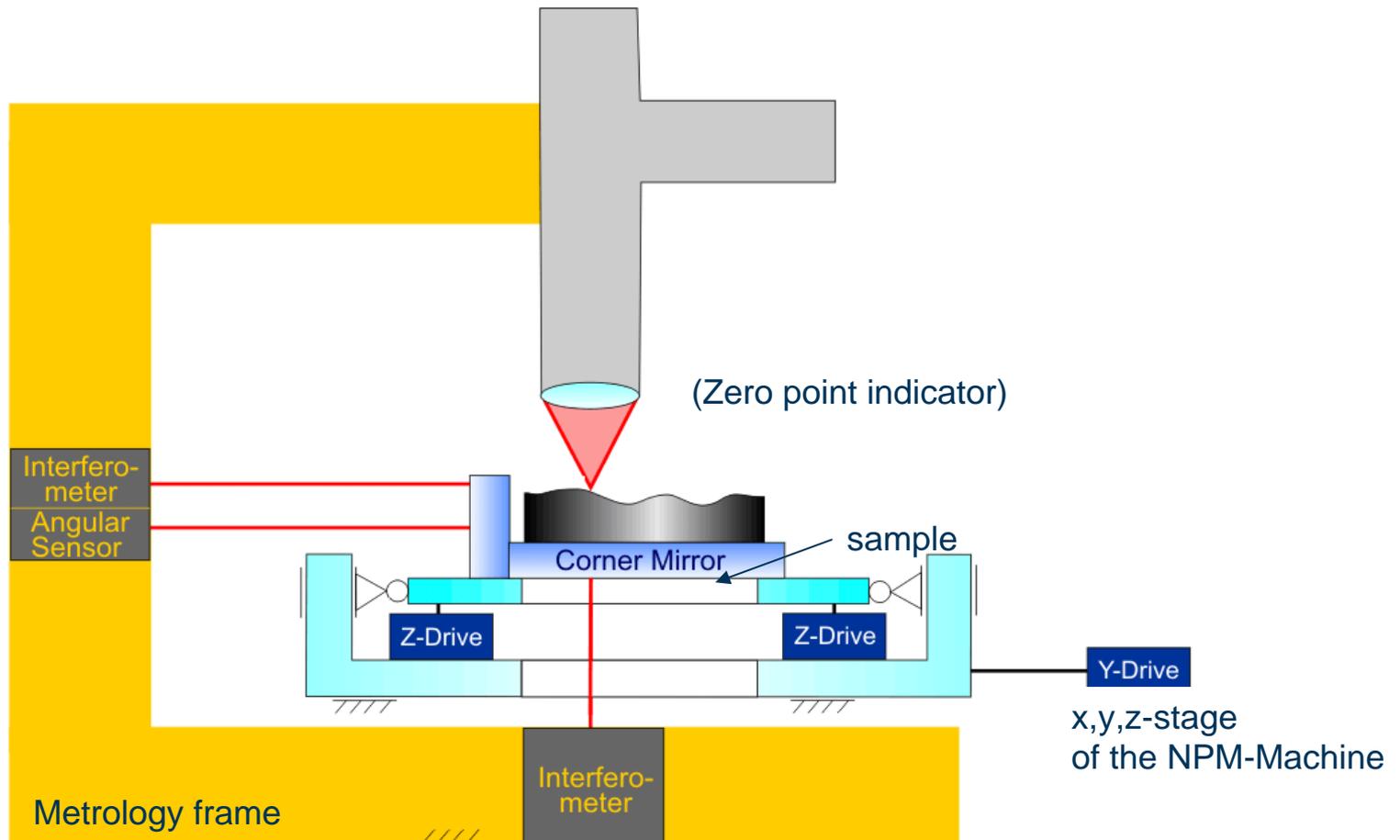
- reflektiert Laserstrahlen
- trägt den Prüfling

## Winkelsensoren

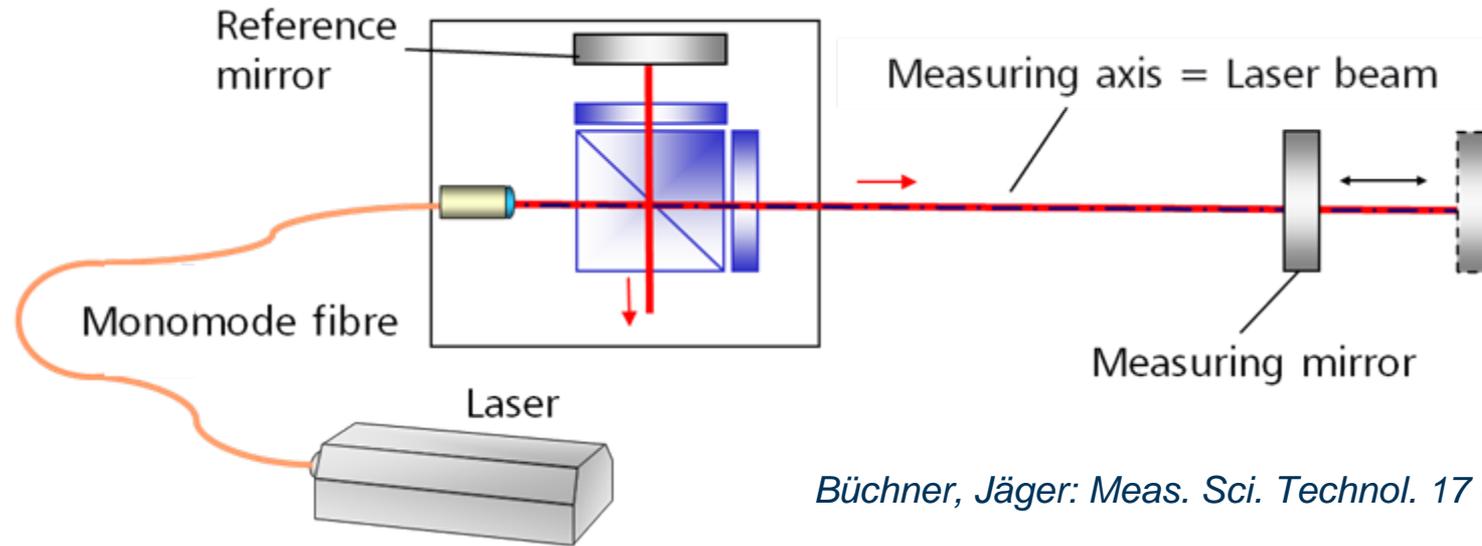
- Kompensation von Winkelabweichungen im geschlossenen Regelkreis

$$\Delta l_i = l_i \sin \alpha_i \rightarrow 0$$

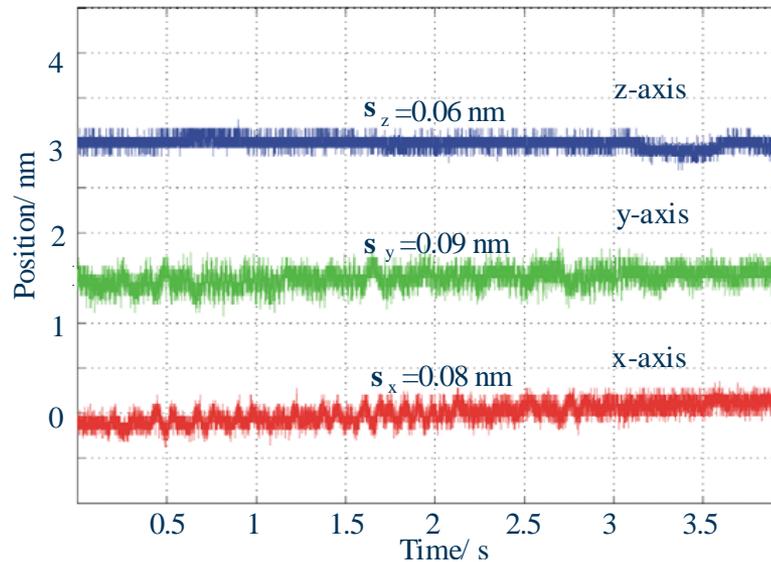
# NPM- Maschine mit Nullpunktsensor



# Fasergekoppeltes Planspiegelinterferometer

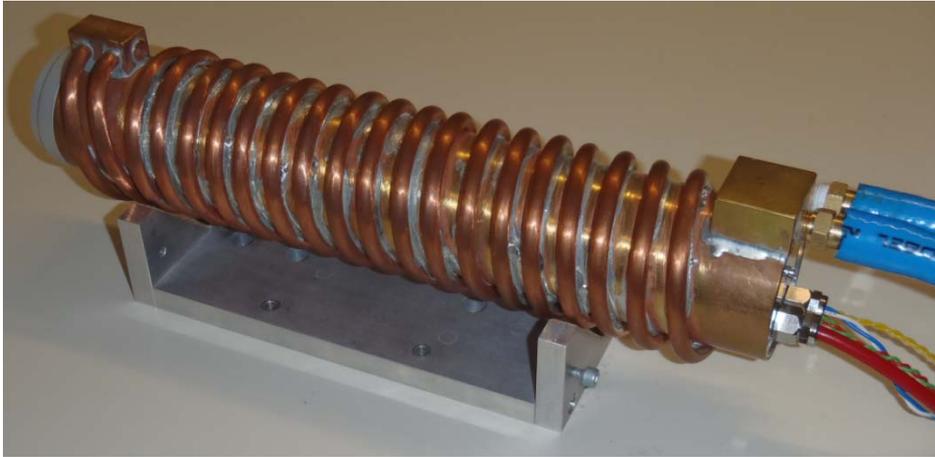


Büchner, Jäger: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006) 746-752

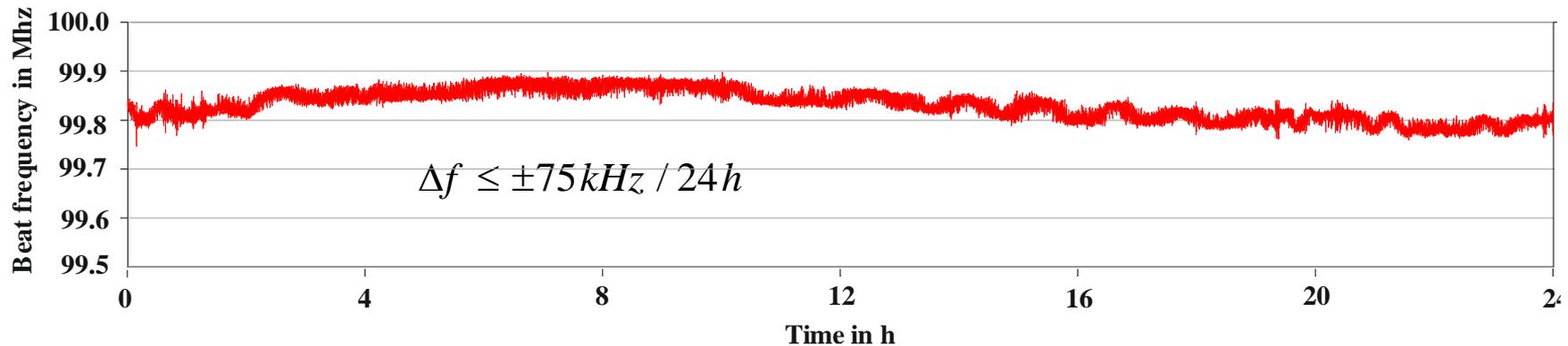


- Auflösung:  $\lambda/4096 = 0,08 \text{ nm}$
- Stabilität:  $< 0,1 \text{ nm}$
- Hohe mechanische und therm. Stabilität
- Totstreckenkorrektur
- Korrektur der Umwelteinflüsse
- Multiachs-Fähigkeit
- Vakuumtauglichkeit

# Frequenzstabilisierter He-Ne-Laser



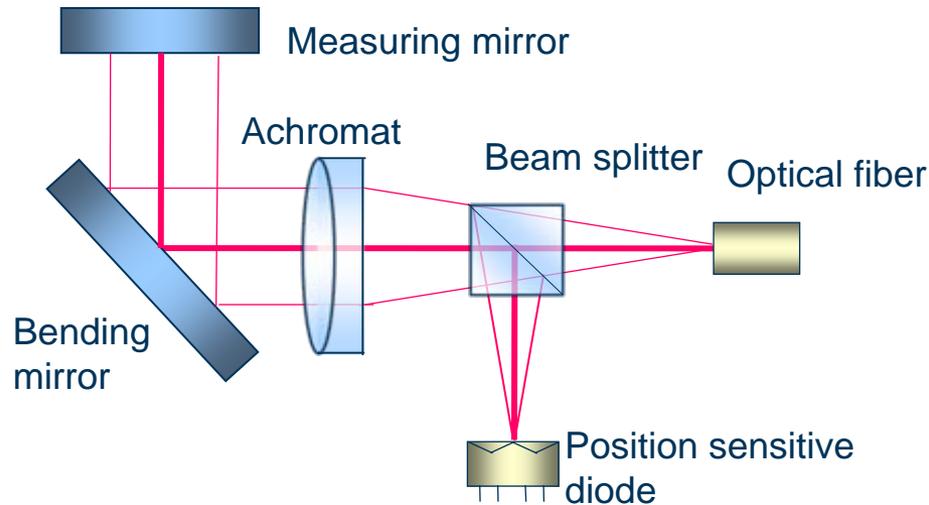
Zusätzliche Temperaturregelung  
des gesamten Lasers



$$\frac{\Delta f}{f} \leq 1,5 \cdot 10^{-10} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta l}{l} \leq 0,15 \text{ nm} / \text{m}$$

# Autokollimationssensoren für aktive Winkelregelung

- automatische Regelung von Nick- und Gierwinkel

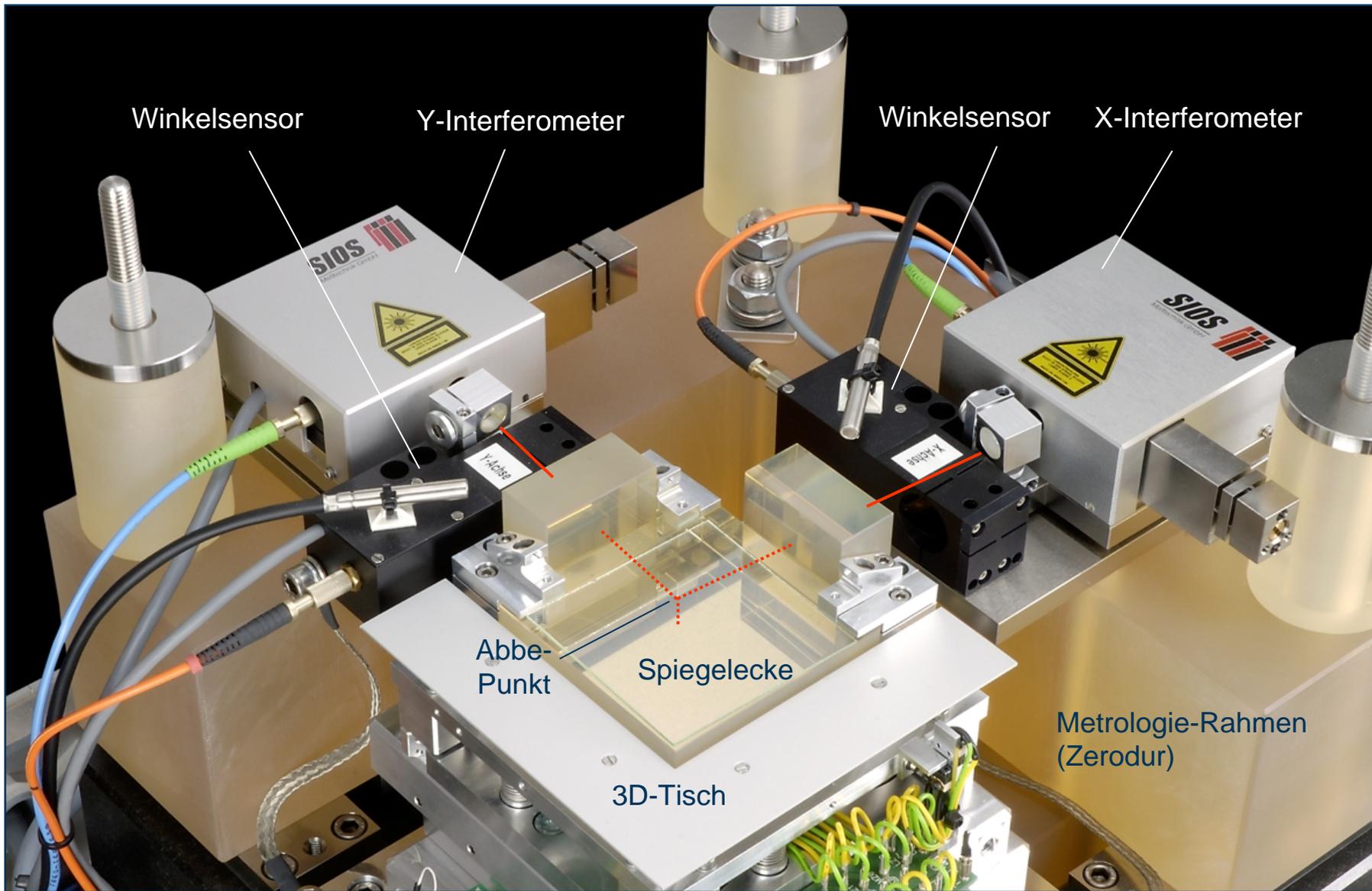


Messbereich: 50" x 50"

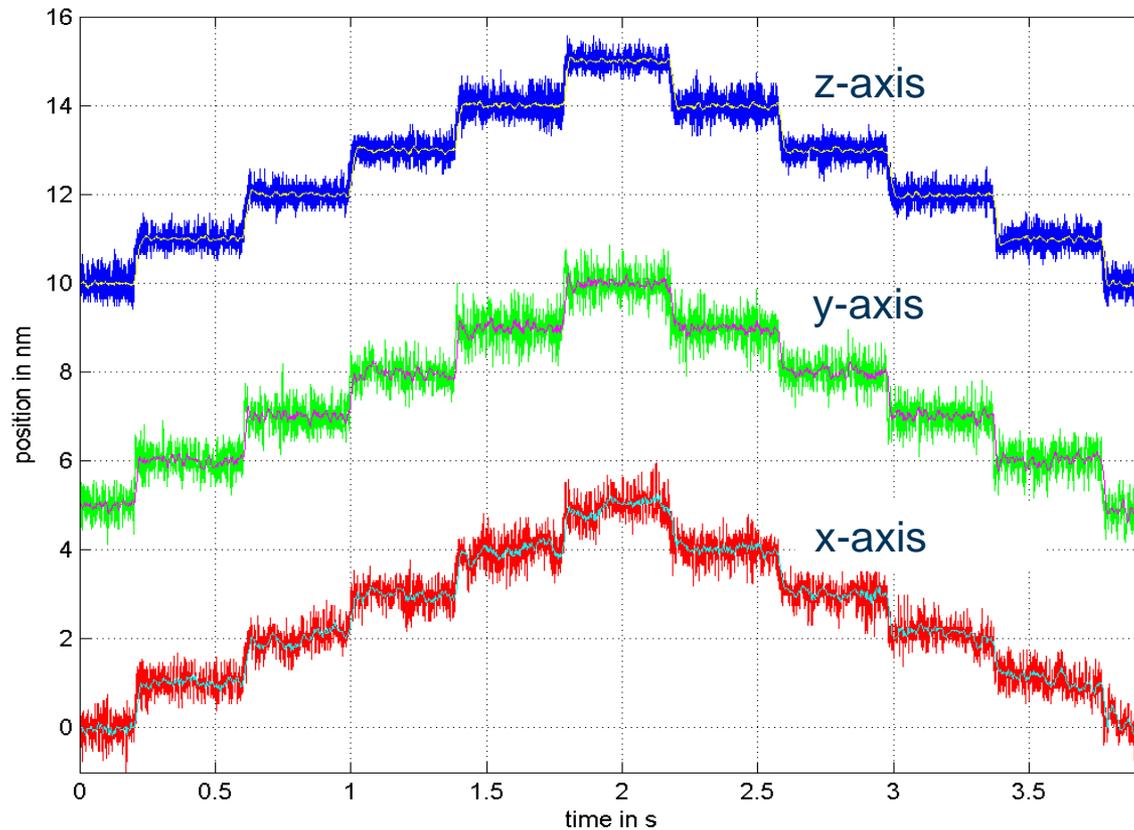
Auflösung: 0,0008"

Winkelabweichungen der NPM-Maschine: < 0,05"

# NPM-Maschine 25 (NMM-1)

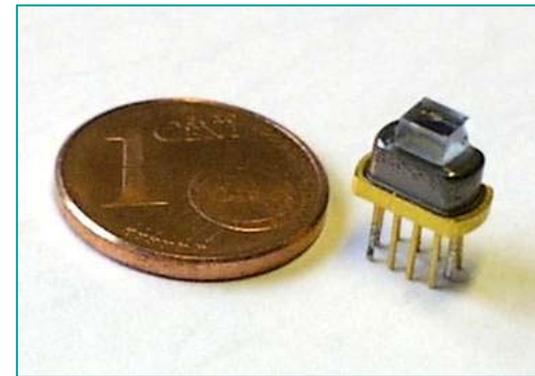


# Positionsschritte von 1 nm in allen Achsen

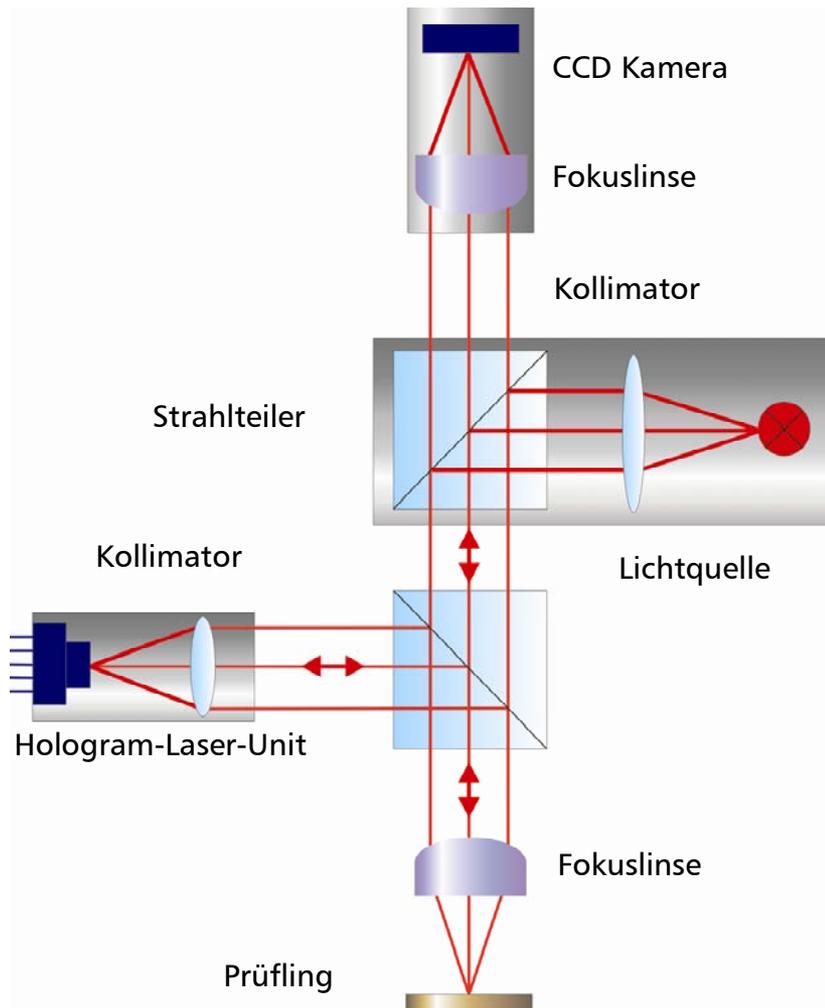


Auflösung: 0.1 nm

# Laserfokussensensor mit CCD-Kameramikroskop

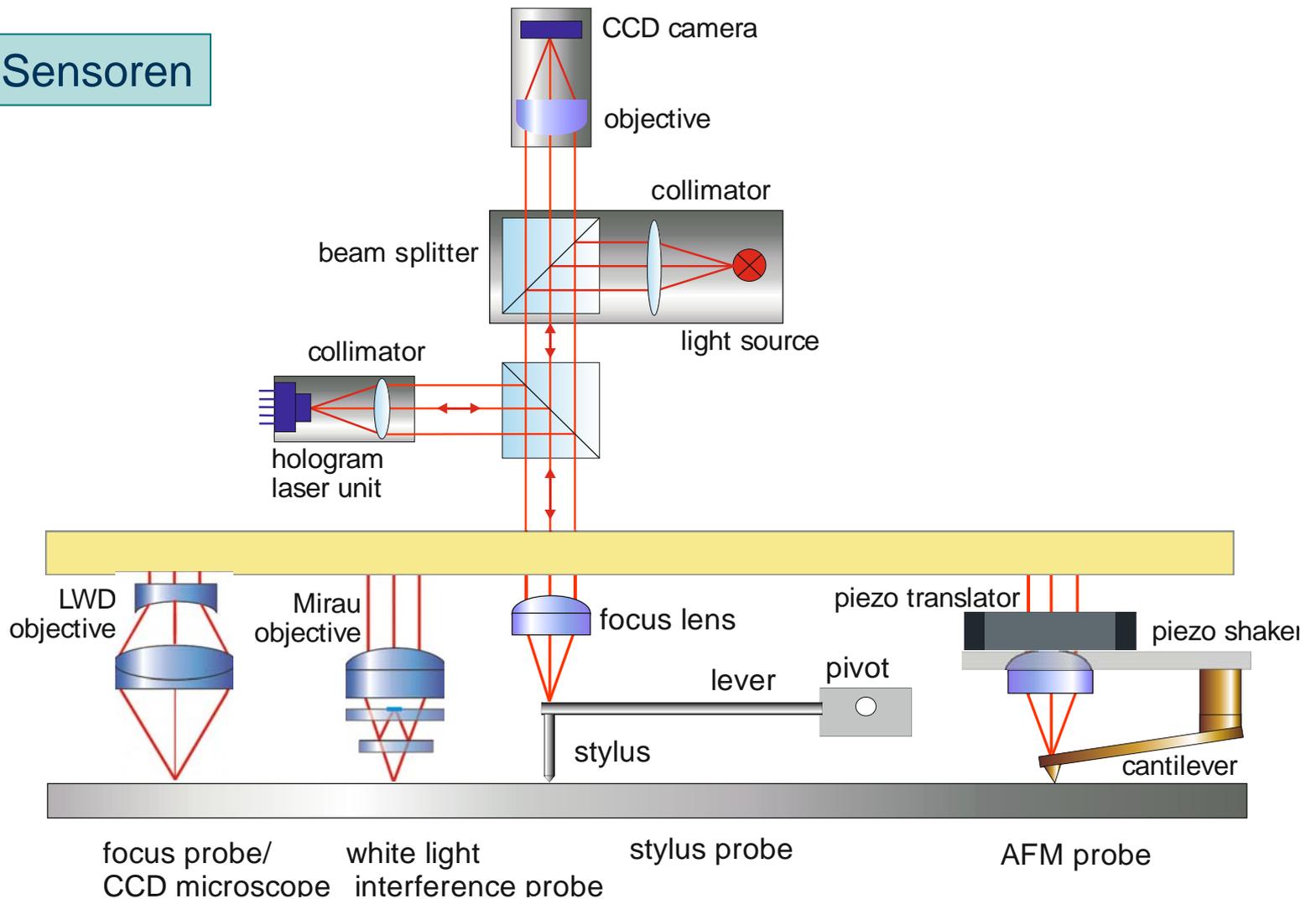


Hologram laser unit



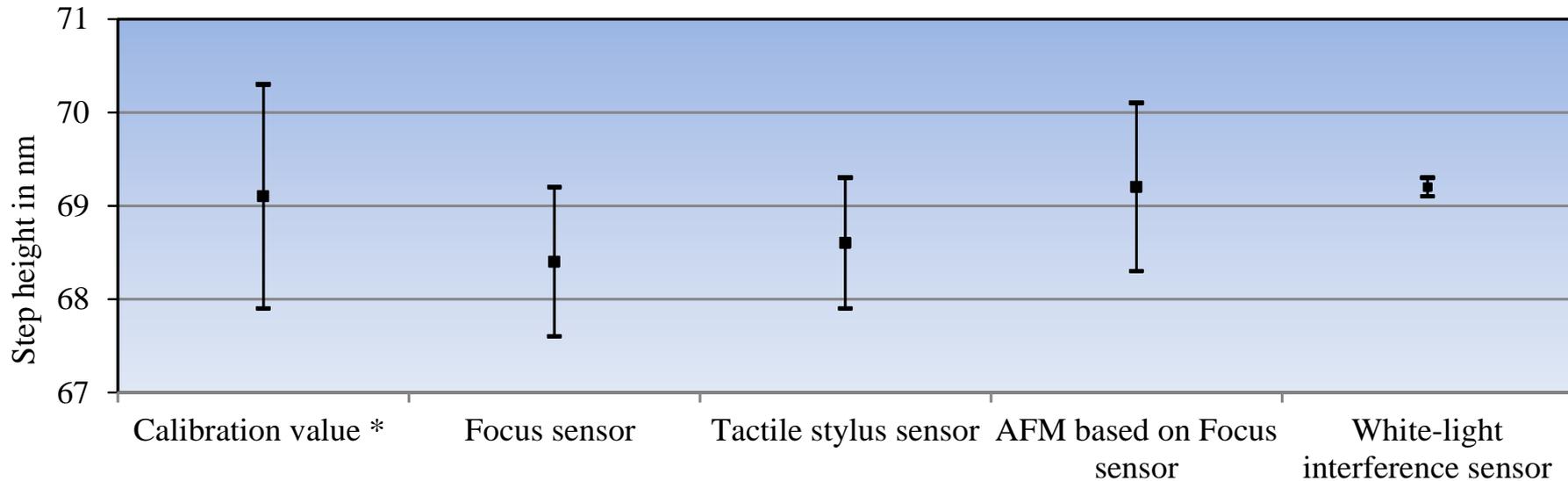
# Multisensor-Ansatz auf Basis eines Laserfokussensors

5 Sensoren



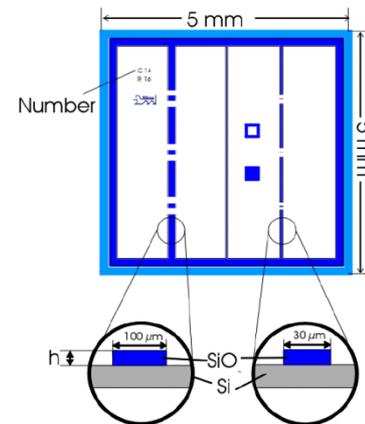
# Vergleich der Sensoren in der NPM- Maschine

## Stufenhöhenmessung

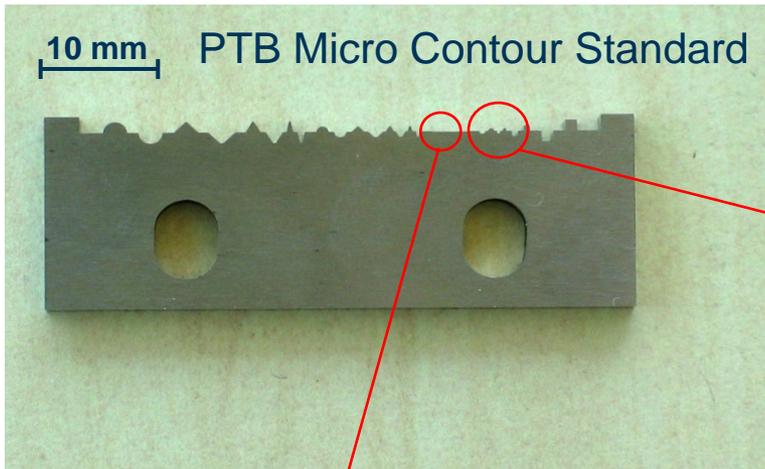


Abweichungen vom Kalibrierwert:  $Dh < \pm 0.8 \text{ nm}$   
Standardabweichungen aller Sensoren:  $u < 0.9 \text{ nm}$

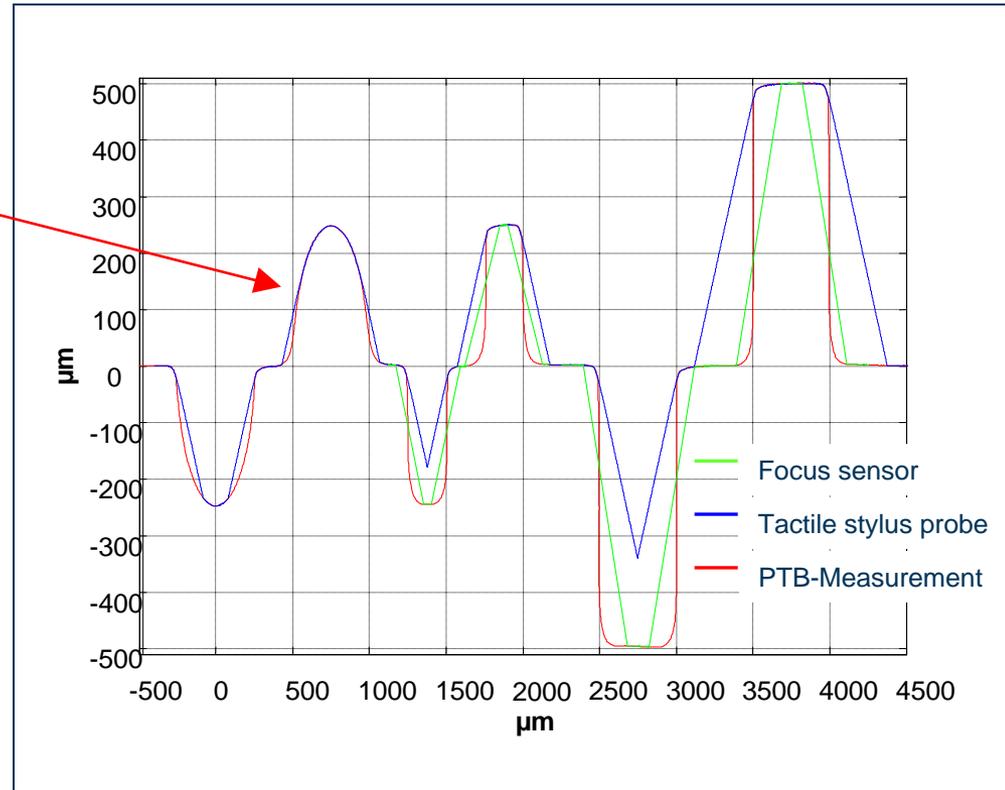
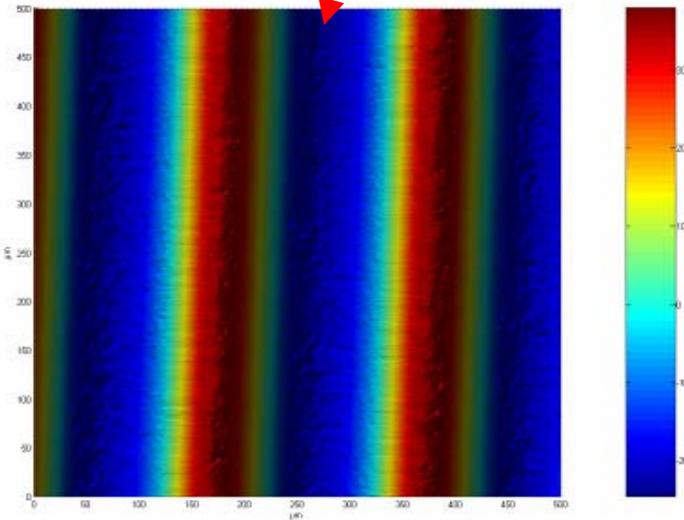
\* Bezieht sich auf gesamtes Messfeld (100  $\mu\text{m}$ )



# Formmessung an steilen Flanken



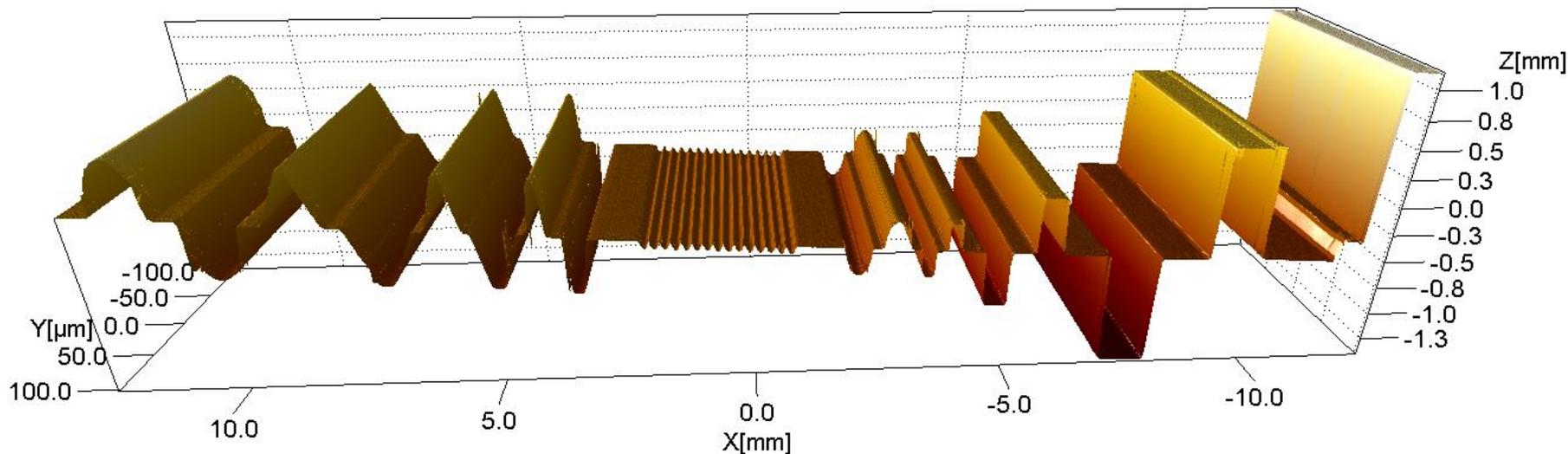
Quelle: M. Neugebauer/ PTB



Limitierung für Laserfokus-, Weisslichtinterferenz- und Tastschnittsensor

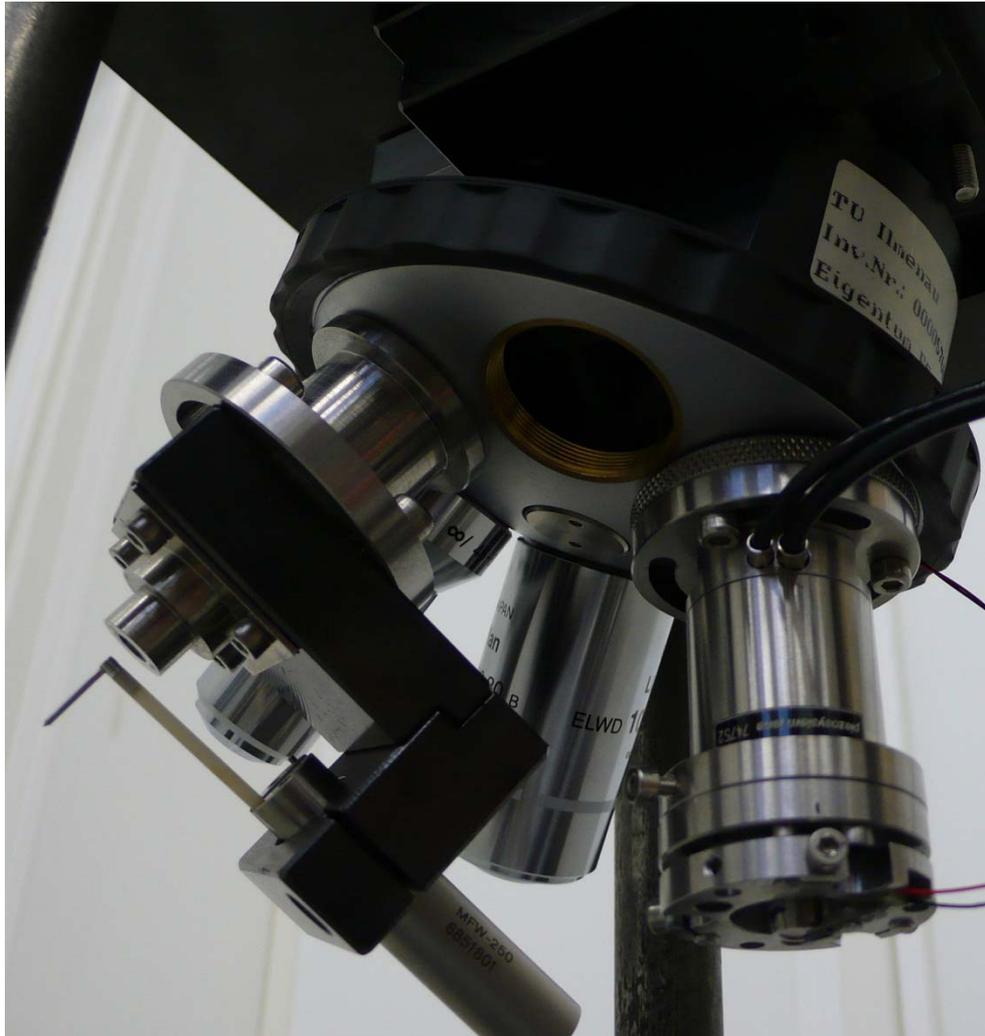
# CCD- Kamera- Mikroskop mit Fokusvariationsverfahren

- Einzelfeld:  $360\ \mu\text{m} \times 360\ \mu\text{m}$
- Z-Scan: 20 Bilder/s
- 90 Einzelfelder zusammengesetzt mit Nanometerpräzision
- Messung steiler Flanken ( $80^\circ$ ) auf rauhen Oberflächen
- Standardabweichung: bis  $50\ \text{nm}$



Mikrokonturnormal:  $25\ \text{mm} \times 360\ \mu\text{m}$  (*Dr. Neugebauer/ PTB*)  
90 Einzelfelder, 54.000 Bilder, Dauer: 2.5 h, Speicherbedarf: 100 GByte

# Multisensor-Anordnung mit Mikroskoprevolver



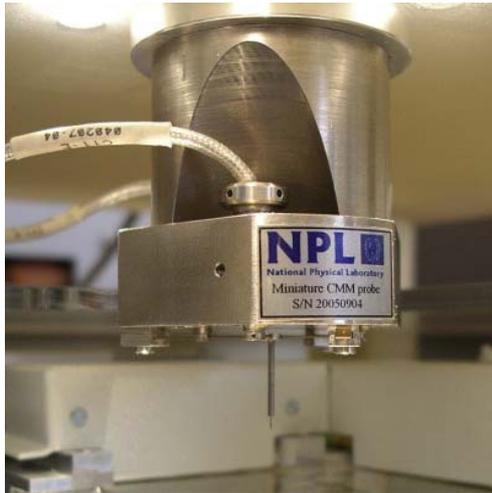
- Laserfokussensor
- CCD-Kameramikroskop
- Weißlichtinterferenzmikroskop
- Tastschnittsensor
- AFM-Sensor

In Vorbereitung:

- 3D-Mikrotaster

Referenzmarken erforderlich

# Integration von 3D-Mikrotastern

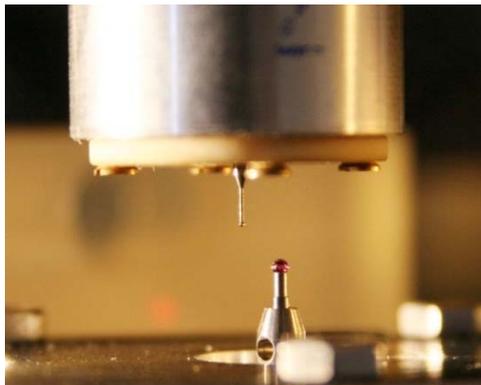


NPL/ IBS

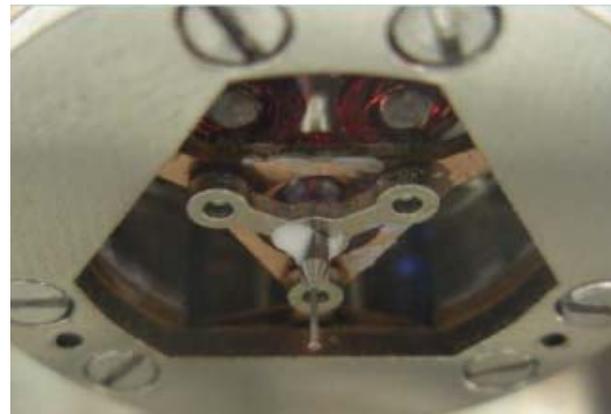


Xpress

- 3D-Funktionalität
- 3D-Scannen
- I++DME-Interface



IMT Braunschweig



SFB 622

## Herausforderungen

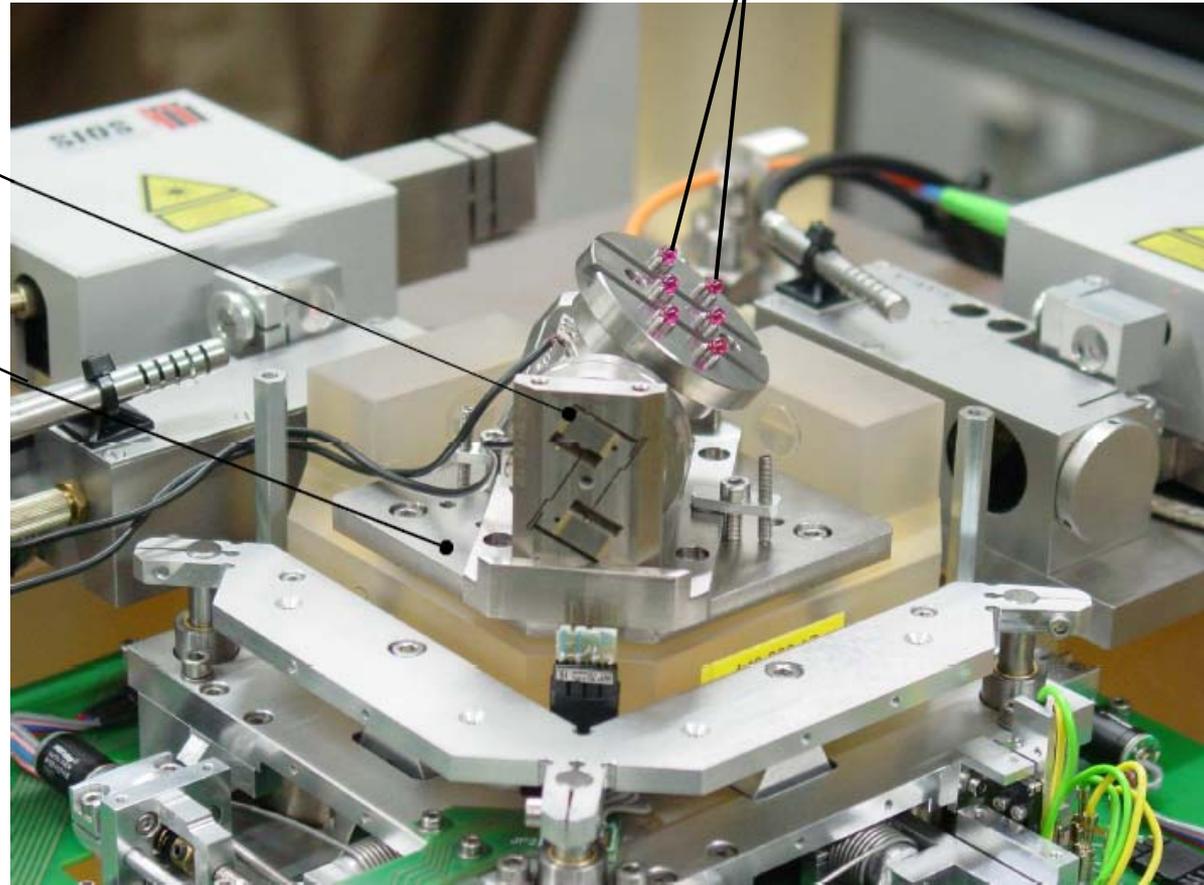
- Kugelform
- Durchmesser-  
/Formbestimmung
- Schnelles Scannen
- aktive Taster
- Aspektverhältnis

# Implementierung eines Dreh-/Schwenktisches in die NPM-Maschine

Referenzelemente (Rubinkugeln)

Dreh-  
/Schwenktisch

Messtisch der  
NPM- Maschine



**NanoCMM**

**Tekniker**  
ik4 research alliance

**SIOS**  
Messtechnik GmbH

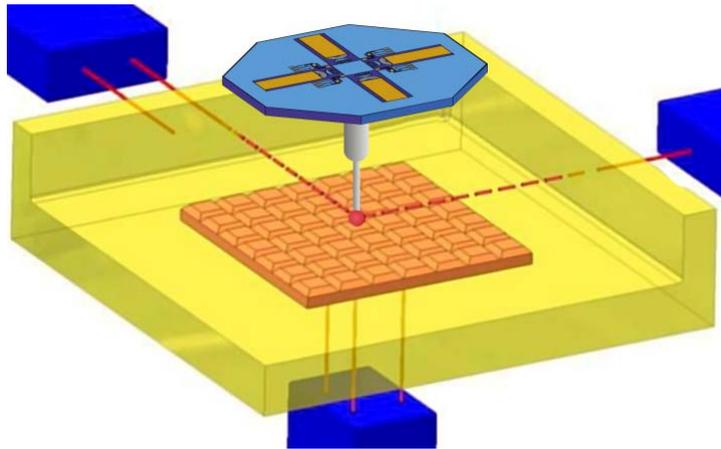
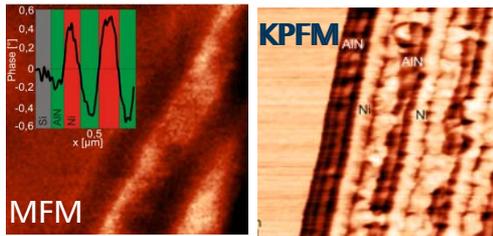
# Großflächige Rastersondenmikroskopie

Multifunktionale Nanoanalytik

[Hoffmann]

Wechselwirkung Sensor-Objekt

[Franke, Machleidt]

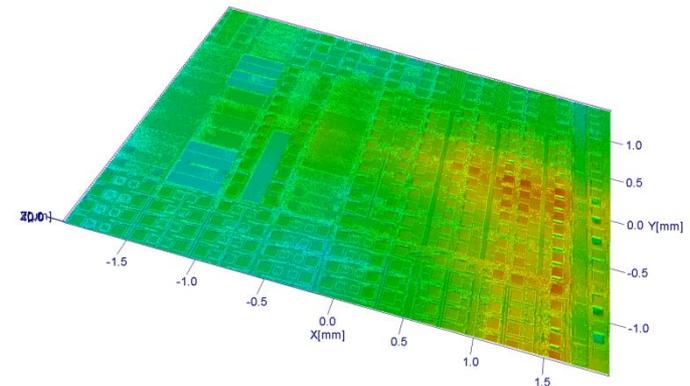
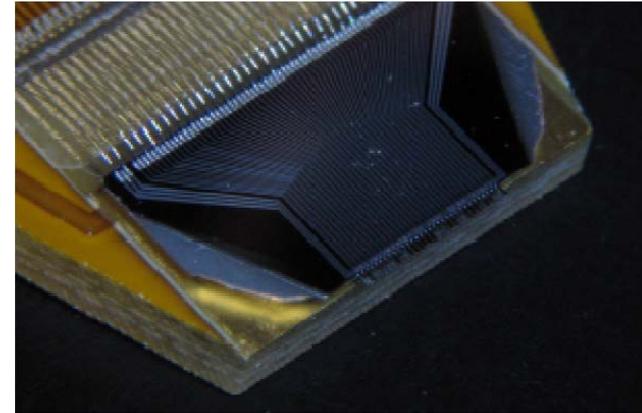


High speed AFM-Scanner

[Rangelow, Guliyev: IWK 2011]

AFM-Cantilever-Arrays (1x32)

[EU-Projekt: ProNano]



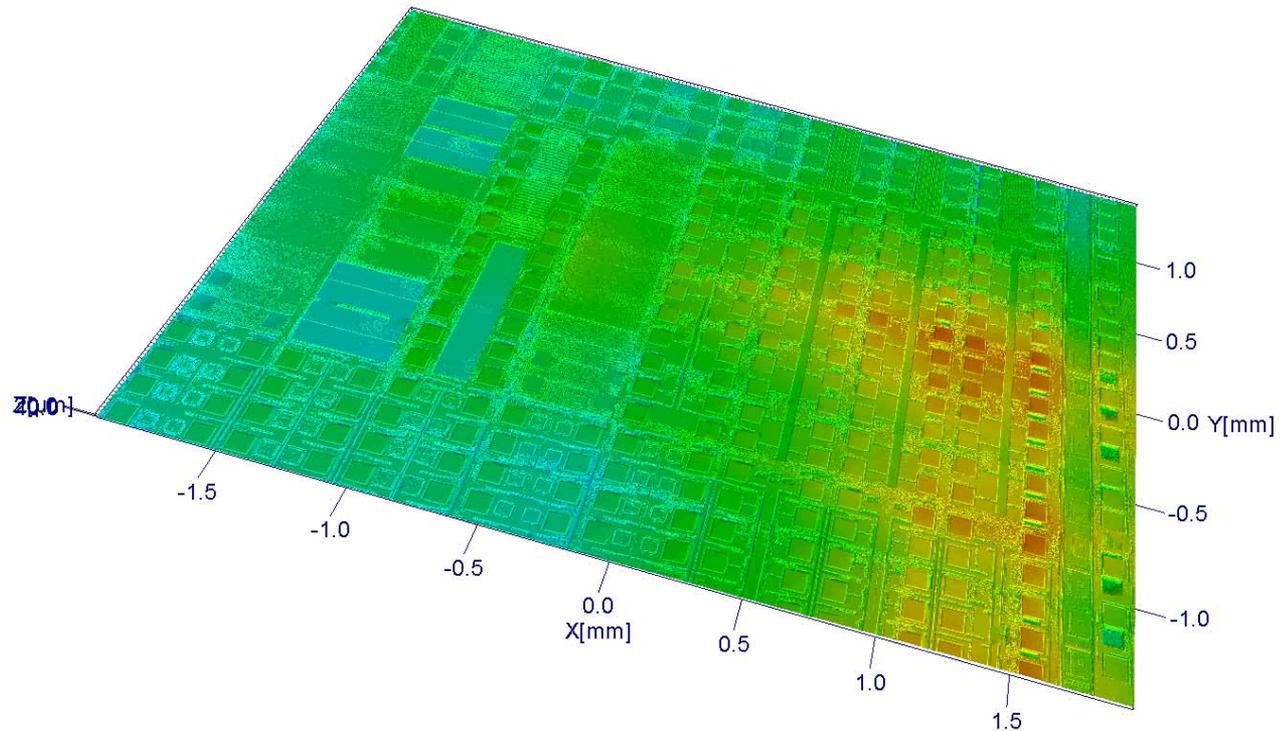
Visualisierung großer Datenmengen

[Machleidt: IWK 2011]

# 3D-Orientierung und Visualisierung

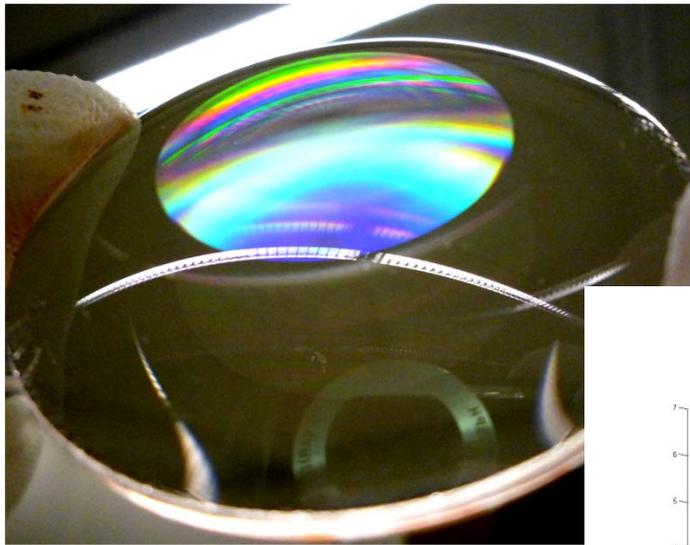
- Z-Scan (begrenzt durch Kamera: 45 Hz): 3  $\mu\text{m}$  /s
- Evaluationszeit: < 1 s (1032x768 Pixel)
- Stitching 9 x 9 Felder: 4 x 3 mm<sup>2</sup>, 50 Mio. Pixel
- < 25 s/ Feld: 0.5 h

[Machleidt et al]

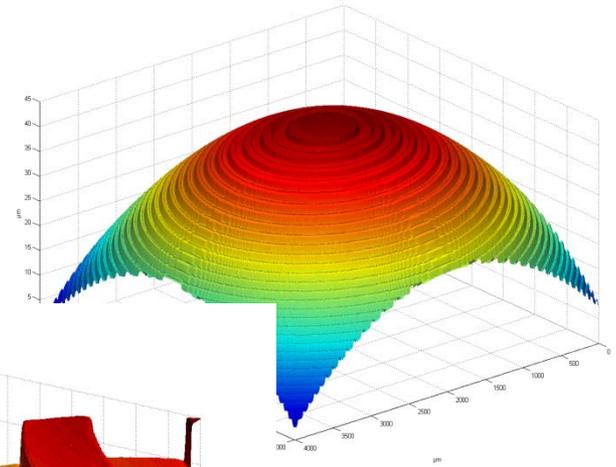


# Messung von Sphären, Asphären und Freiformflächen

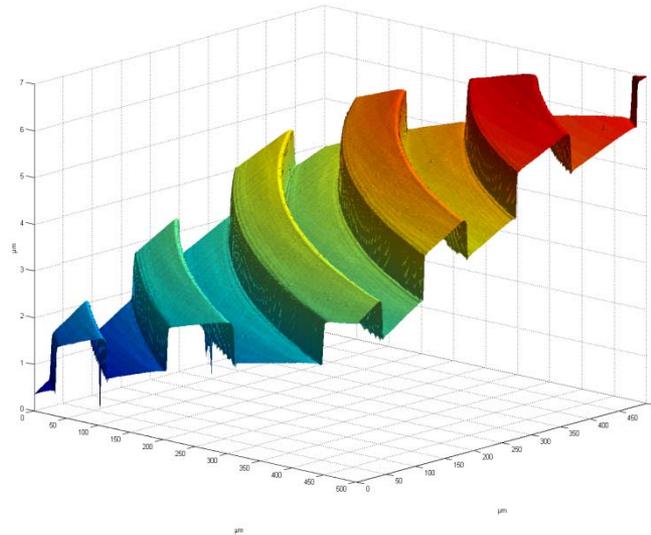
- Superposition von Makrogeometrie mit Mikro- und Nanogeometrien
- (Herausforderungen: Flankenwinkel bis  $80^\circ$ )



ITO Stuttgart



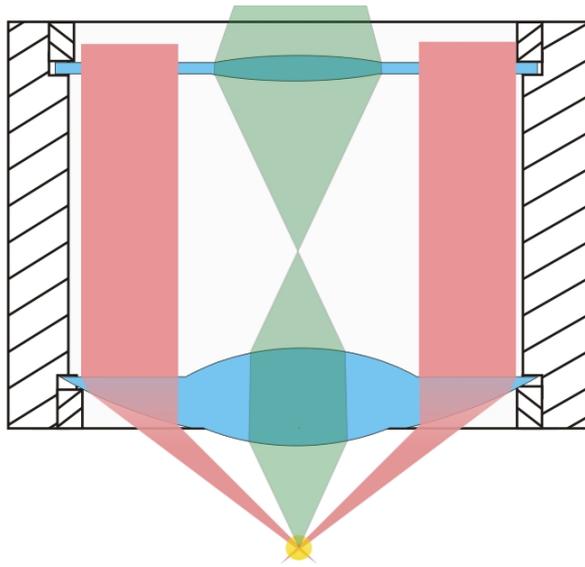
TU Ilmenau



Reichle, Häfner, Pruß, Osten:  
*Diffraکتive Strukturen auf gekrümmten  
Oberflächen für hybride Abbildungssysteme*  
In: *Photonik* 4/2010, pp. 36-39

# Nanomanipulation / Nanobearbeitung

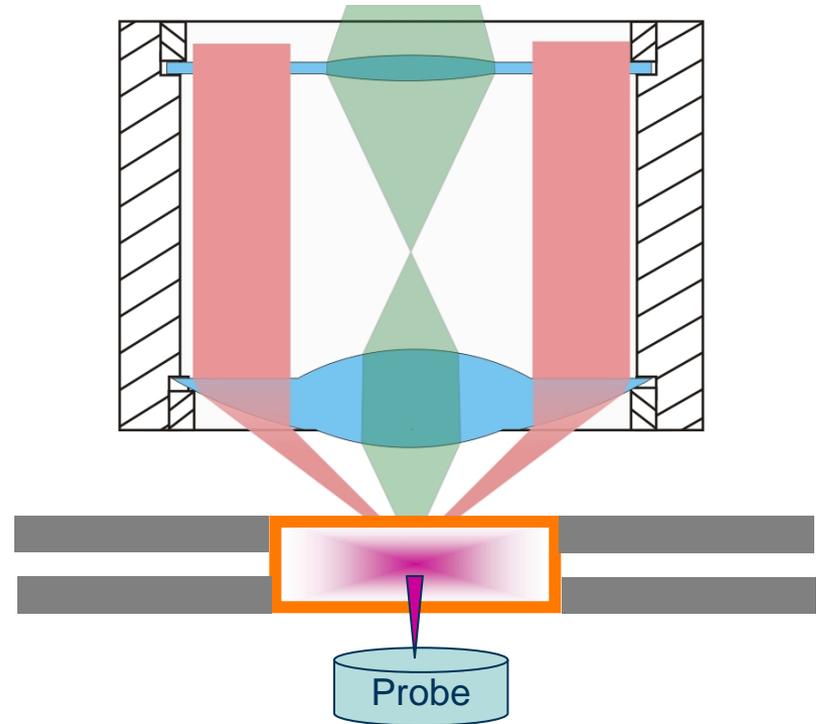
## Optische Pinzette



Nanopartikel

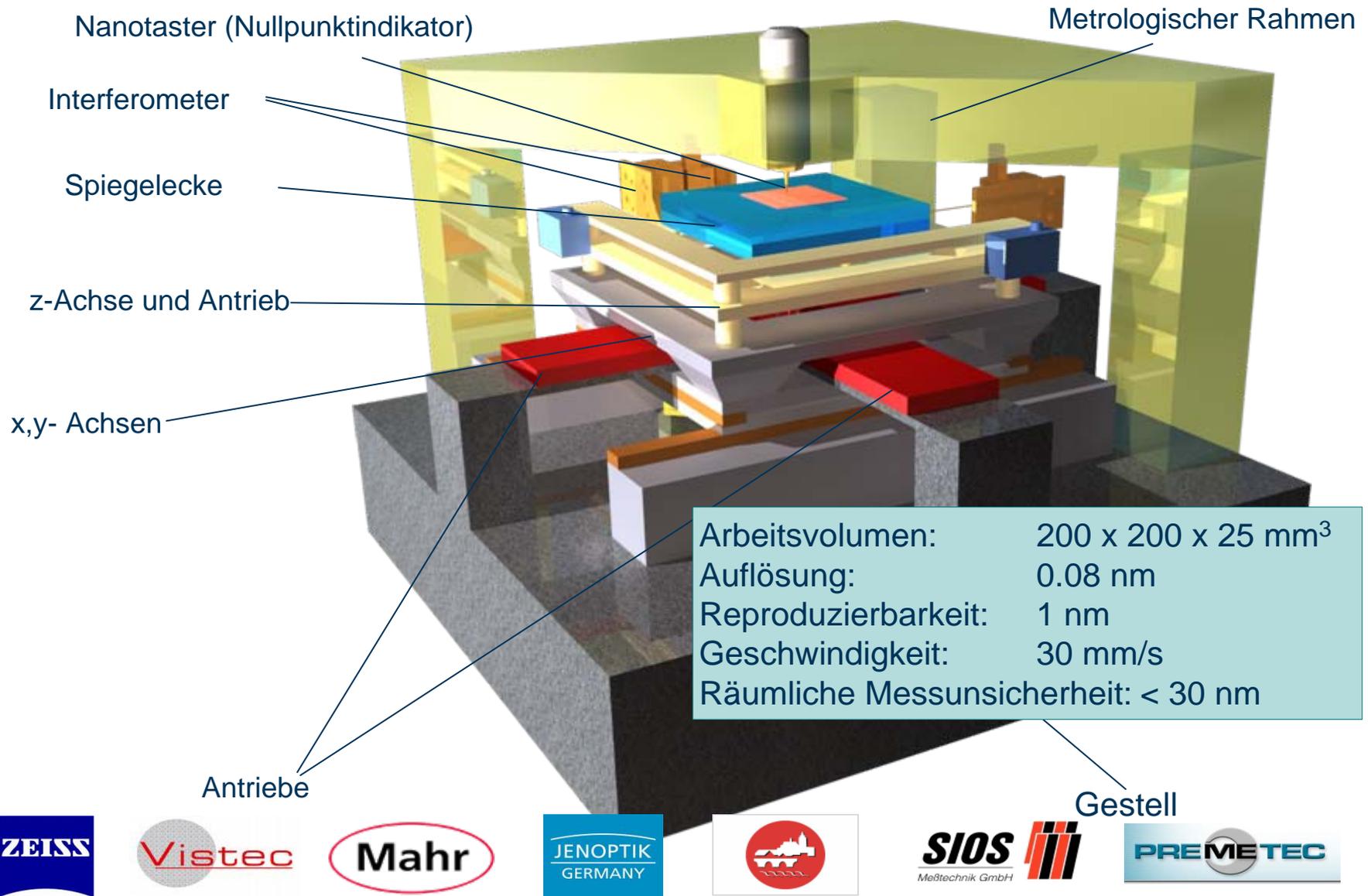
[Sinzinger/ Oeder: DGaO 2011]

## Mikroplasma



[Hoffmann/ Polster]

# Neue Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM-200



# Zusammenfassung

- NPM-Maschine mit Multisensor-Ansatz
- Konformität der Messergebnisse verschiedener Sensoren
- Messstrategien für großflächige Rastersondenmikroskopie
- Strategien für steile Flanken und Hinterschneidungen

## Ausblick

- Weiterentwicklung der NPM-Maschine
- Weiterentwicklung des Multisensor-Ansatzes
- Entwicklung neuer Taster und Werkzeuge
- Entwicklung neuer Messstrategien und -Algorithmen



# Danksagung

- DFG: SFB 622: Nanopositionier- und Nanomessmaschinen
- EU-FP6-Projekt: NanoCMM
- SIOS Messtechnik GmbH
- allen beteiligten Mitarbeitern der TU Ilmenau

