

Diffraktive Wellenfront-Korrektur für die Spektroskopie im extrem Ultravioletten und weichen Röntgenbereich

Jürgen Probst^a, Heike Löchel^a, Thomas Krist^a, Christoph Braig^b, und Christian Seifert^b

^aNOB Nano Optics Berlin GmbH, Krumme Straße 64, 10627 Berlin

^bInstitut für angewandte Photonik e.V., Rudower Chaussee 29/31, 12489 Berlin

[Appl. Phys. Lett. **108**, 201106 \(2016\).](#)

Eine praktikable Lösung für Beryllium CRLs ...

ARTICLE

Received 22 Nov 2016 | Accepted 17 Jan 2017 | Published 1 Mar 2017

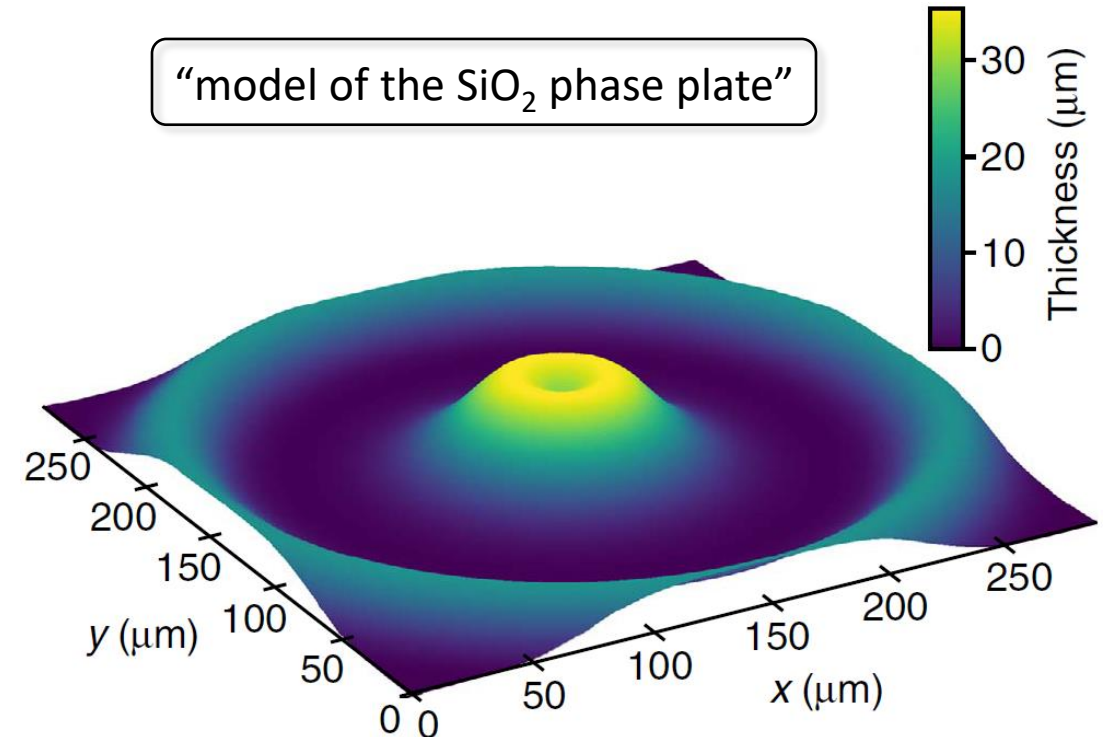
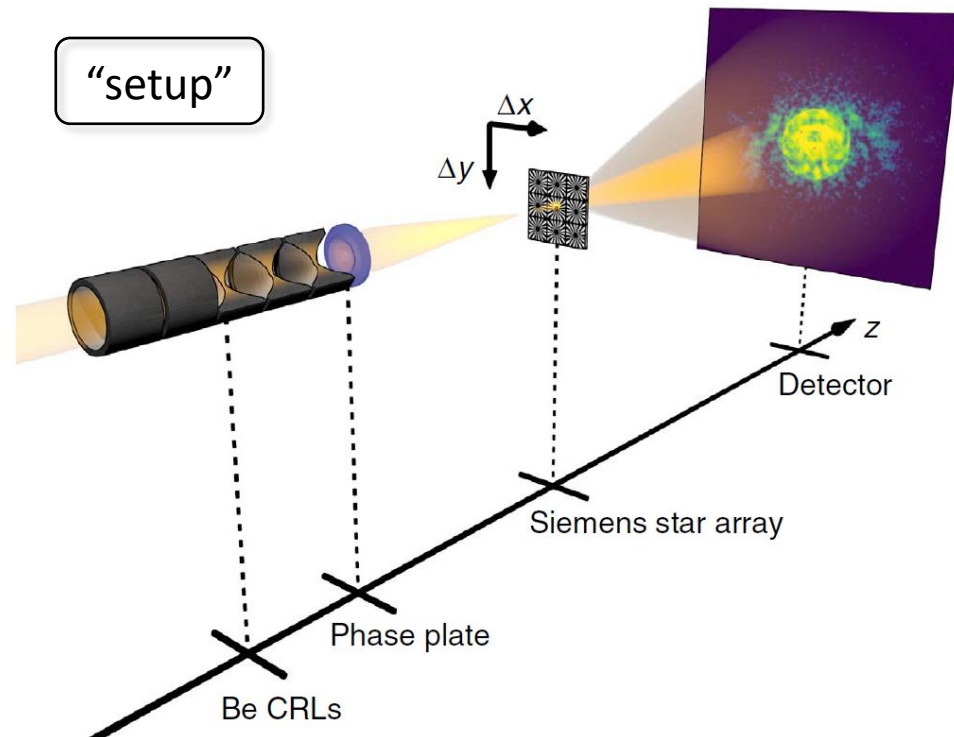
DOI: 10.1038/ncomms14623

OPEN

F. Seiboth et al.,

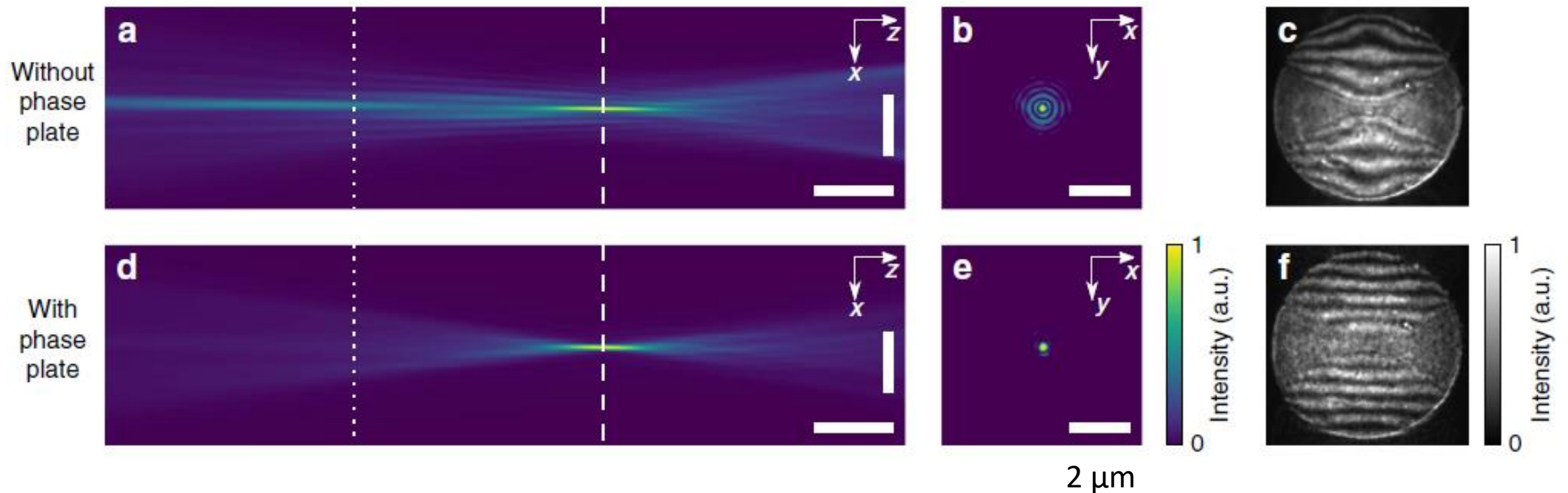
Perfect X-ray focusing via fitting corrective glasses to aberrated optics

@ LCLS, PETRA III & DLS



... bei einer Photonen-Energie von 8.2 keV

“correction by a [...] phase plate [...] from the ptychographic reconstruction”



XUV und weicher Röntgenbereich (unterhalb von ca. 2 keV) → **Absorption zu hoch**

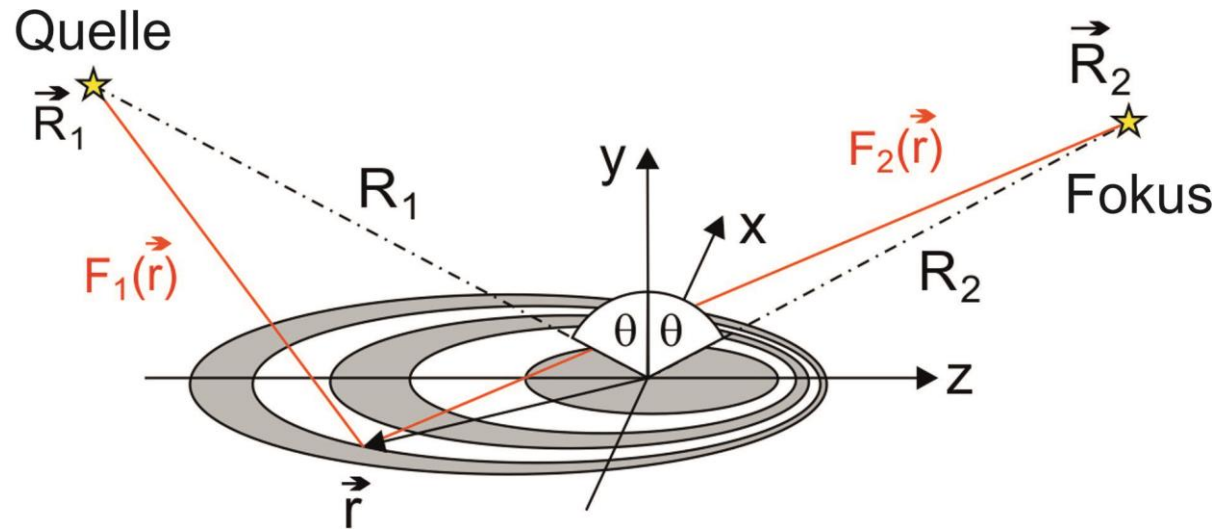
Die Reflexionszonenplatte als Ausgangspunkt

RZP auf Plan-Substrat

$$F_1(\vec{r}) + F_2(\vec{r}) = R_1 + R_2 + m \cdot \lambda/2$$

mit $m \in \mathbb{Z}$ (Fresnel)

- + Spektroskopie
- + ext. Totalreflexion
- + mer. Liniendichte
- + Aspektverhältnis
- + Wärmeabfuhr



- Abbildung
- chromat. Aberr.
- sag. Liniendichte
- Justagetoleranz
- Substratfehler

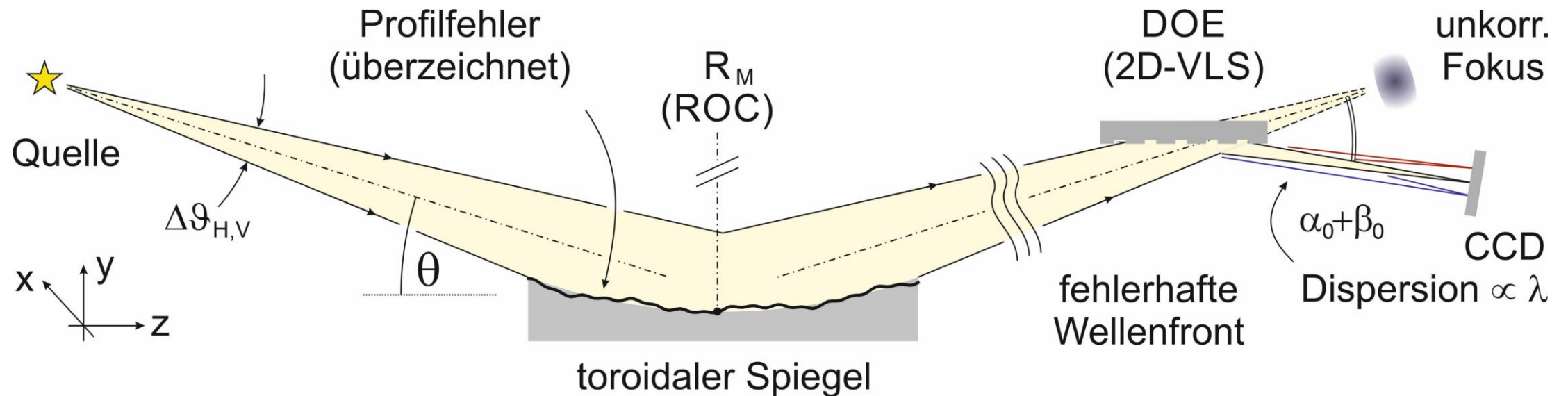
Verallgemeinerung auf gekrümmte, wellige Substrate → Beugungsgrenze

C. Braig et al., "[Diffraction compensation of slope errors on strongly curved grating substrates](#)," Proc. SPIE **11109**, 111090U (2019).

Motivation & Idee: Das „Hettrick-Underwood“

BESSY II @ Helmholtz-Zentrum Berlin

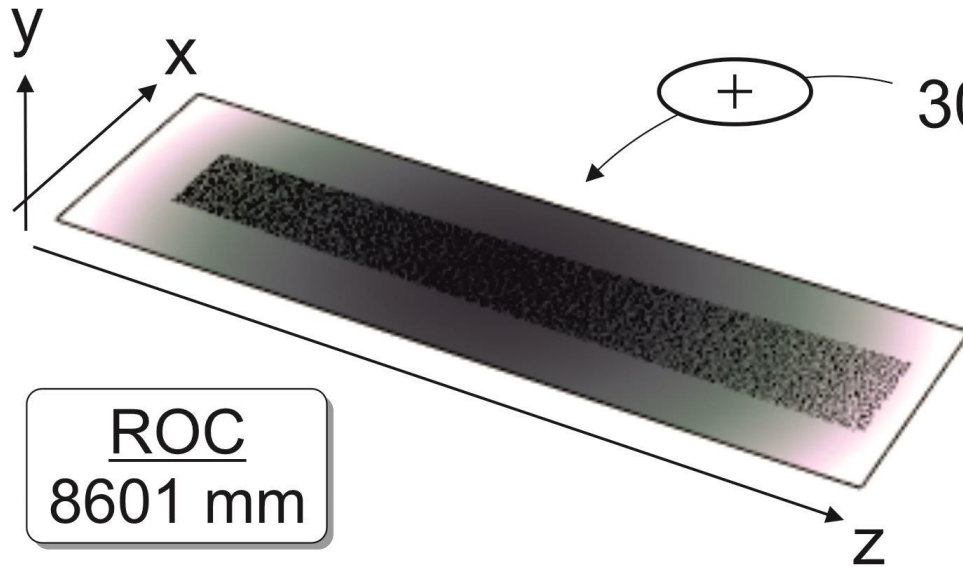
O. Fuchs et al., [Rev. Sci. Instrum.](#) **80**, 063103 (2009).



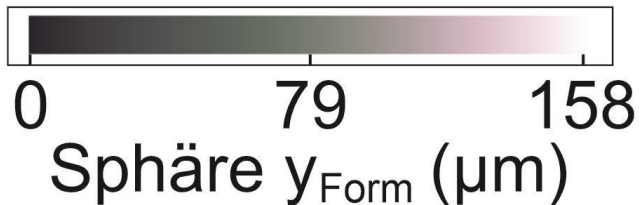
$E_0 = 183 \text{ eV} \mid \alpha_0 + \beta_0 = 12^\circ \mid (+1). \text{ Ordnung} \mid \text{Gesamtlänge} \approx 1600 \text{ mm}$

Klassifikation nach Form- und Figurenfehlern

$$y_M(x, z) = y_{Form}(x, z) + \delta y_{Fig.}(x, z)$$



ROC
8601 mm

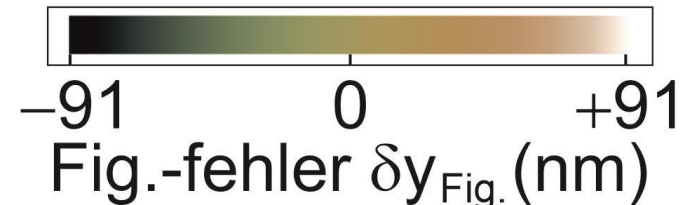
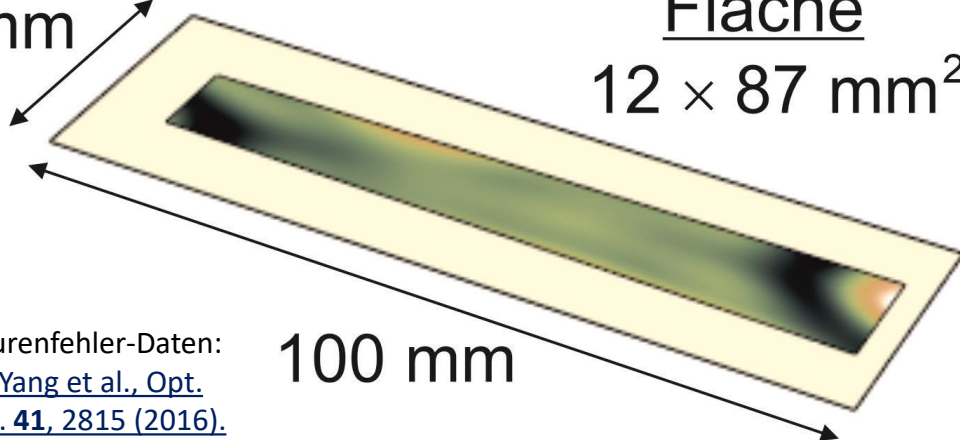


30 mm

Figurenfehler-Daten:
[F. Yang et al., Opt. Lett. 41, 2815 \(2016\).](#)

100 mm

Fläche
 $12 \times 87 \text{ mm}^2$



⇒ 2D-Polynomialfit 16. Ordnung in Spiegelsubstrat-Koordinaten (x,z) ⇐

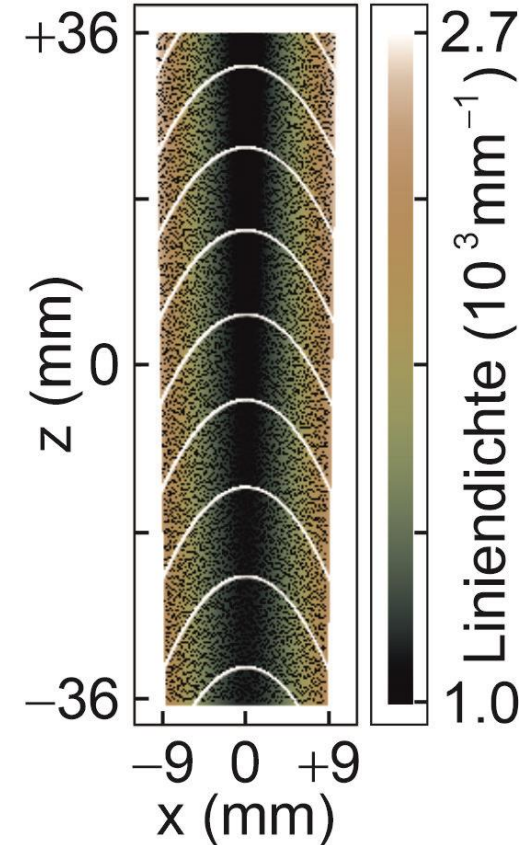
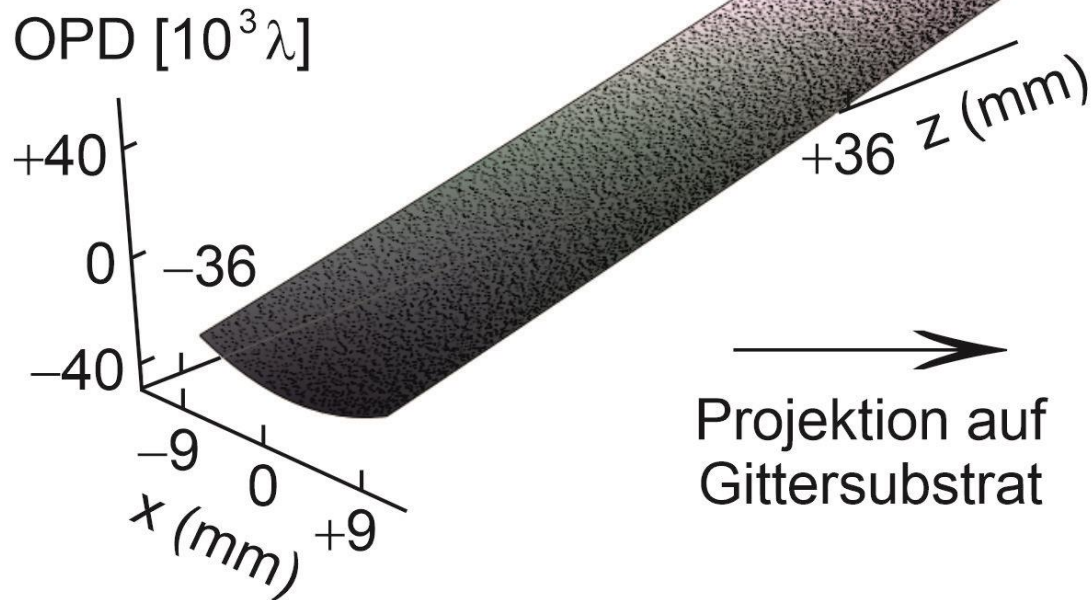
Das Prinzip: die „optische Wegdifferenz“ (OPD)

wie für (R)ZPs:

relative Pfadlänge

„Quelle → Fokus“

“ray tracing”



diffraktive WF-Korrektur



Fit-Residuen der OPD
 $\delta(\text{OPD}) = \lambda/1232 \text{ (rms)}$

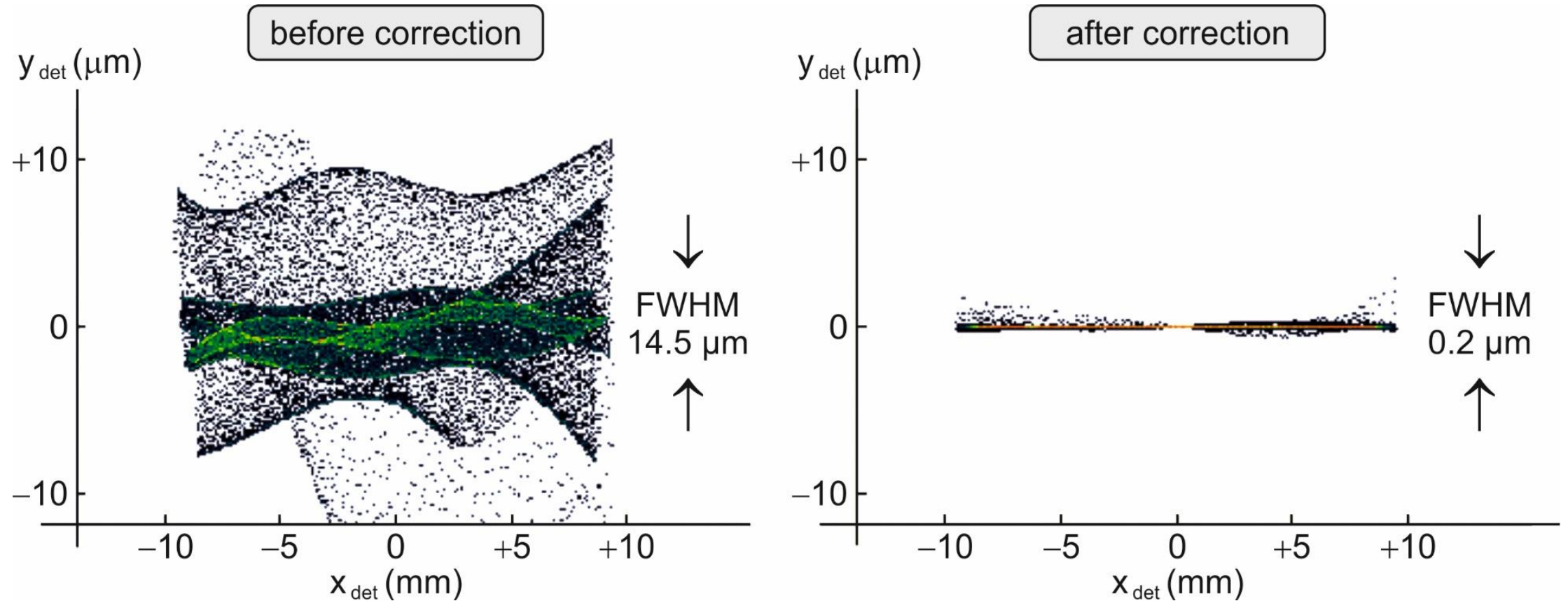
≤

Maréchal-Kriterium
 $\lambda/14 \text{ (rms)}$



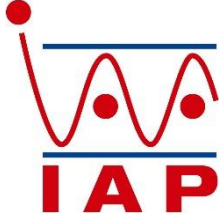
... simuliert mit “varied line space”-Gitter / DWK

Punktquelle (183 eV) – aberrationsbehafteter Toroid-Spiegel – 2D-VLSG / DWK – CCD



J. Probst et al., [Appl. Opt.](#) **59**, 2580 – 2590 (2020).

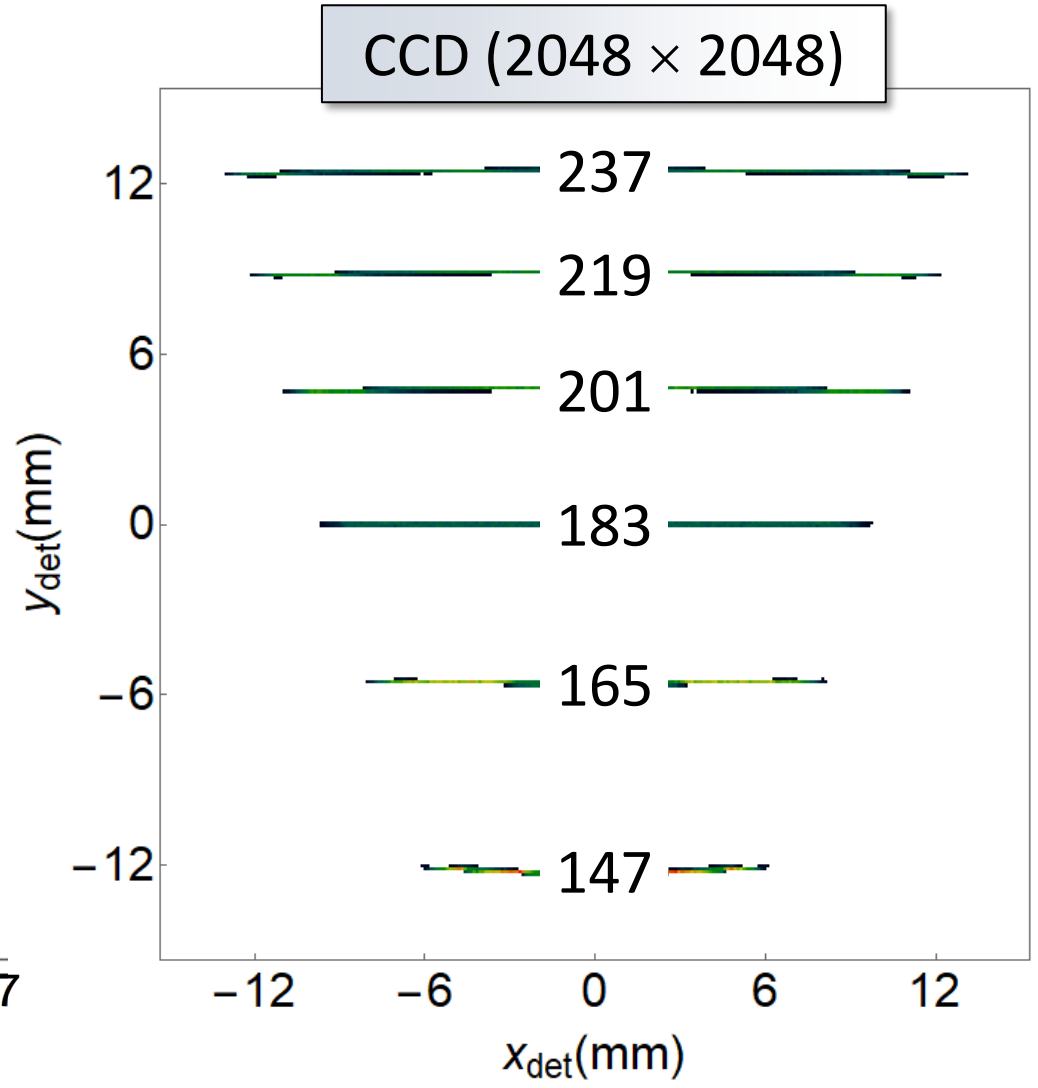
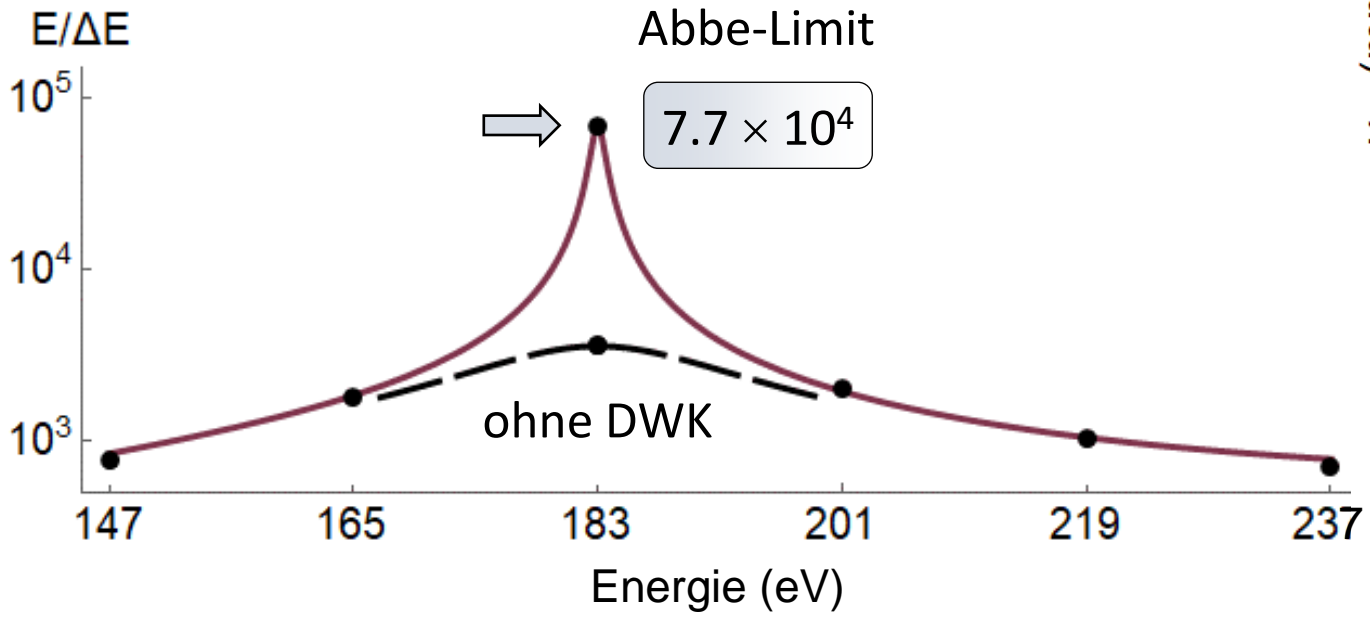
Auflösungsvermögen des Spektrometers



Punktquelle mit spektraler "multi- δ "-Verteilung



obere Schranke an Auflösungsvermögen $E/\Delta E$



Ein „Computer-generiertes Hologramm“ (CGH)

Wellenfront / Spiegelprofil + Fokussierungs-Bedingung



Projektion der **Phasenfunktion** $\phi(\vec{r})$

auf

beliebiges Substrat

des

diffraktiven Wellenfrontkorrektors (DWK)

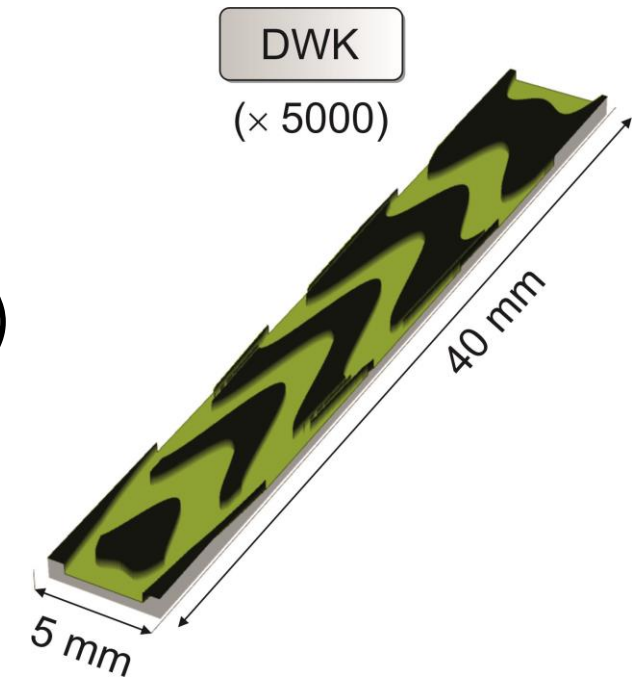
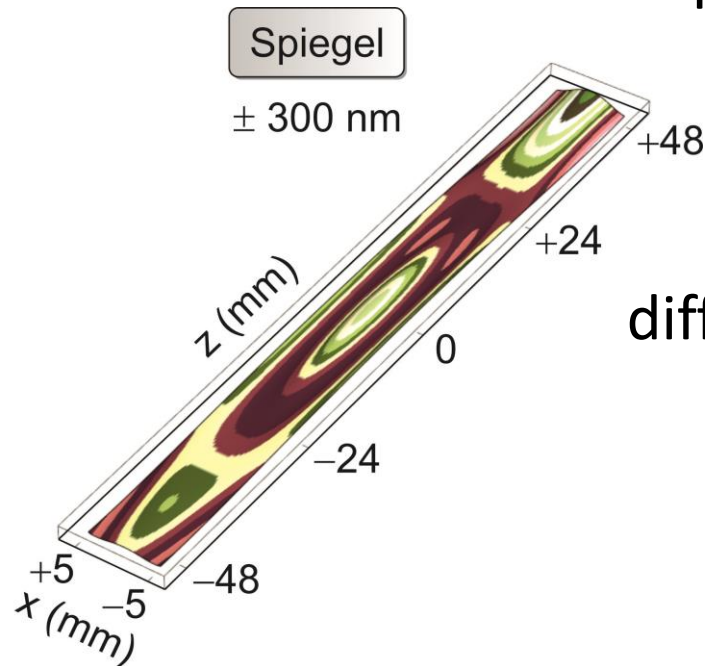


Konturen konstanter Phase

(„**Fresnelzonen**“)



(reflektiv laminare) Gitterstruktur („CGH“)

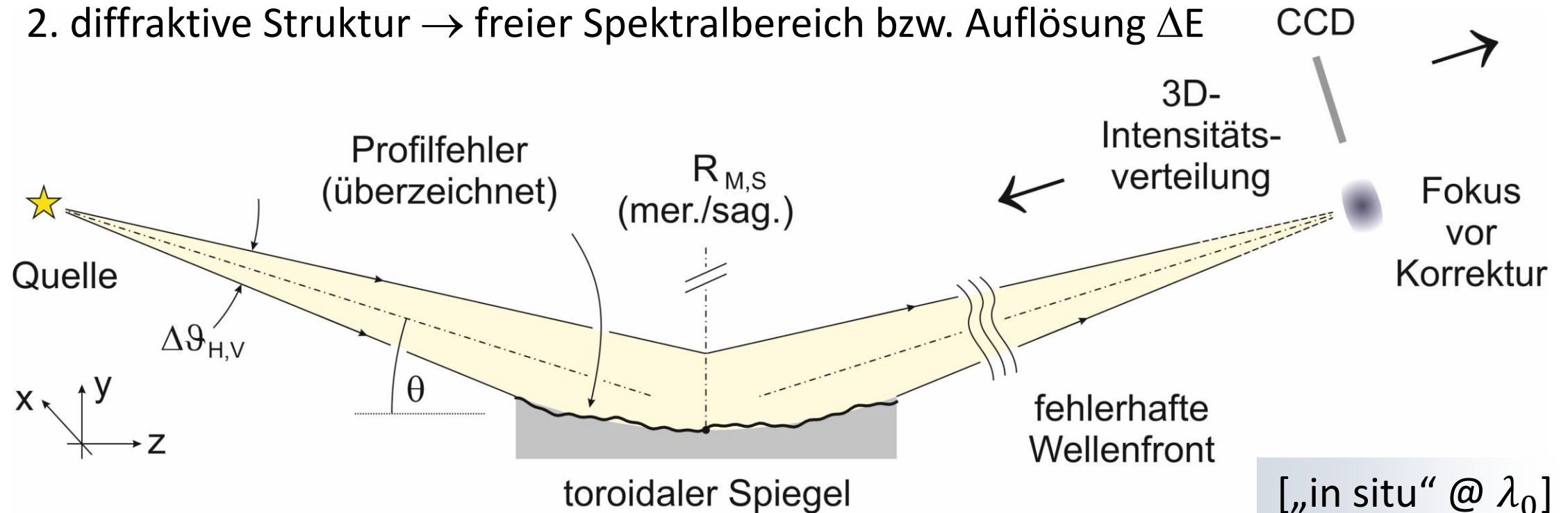


„All-in-one“: Integrierte Wellenfront-Korrektur

1. Reflexion an unstrukturiertem Spiegel mit Aberrationen (Form- / Figurenfehler)

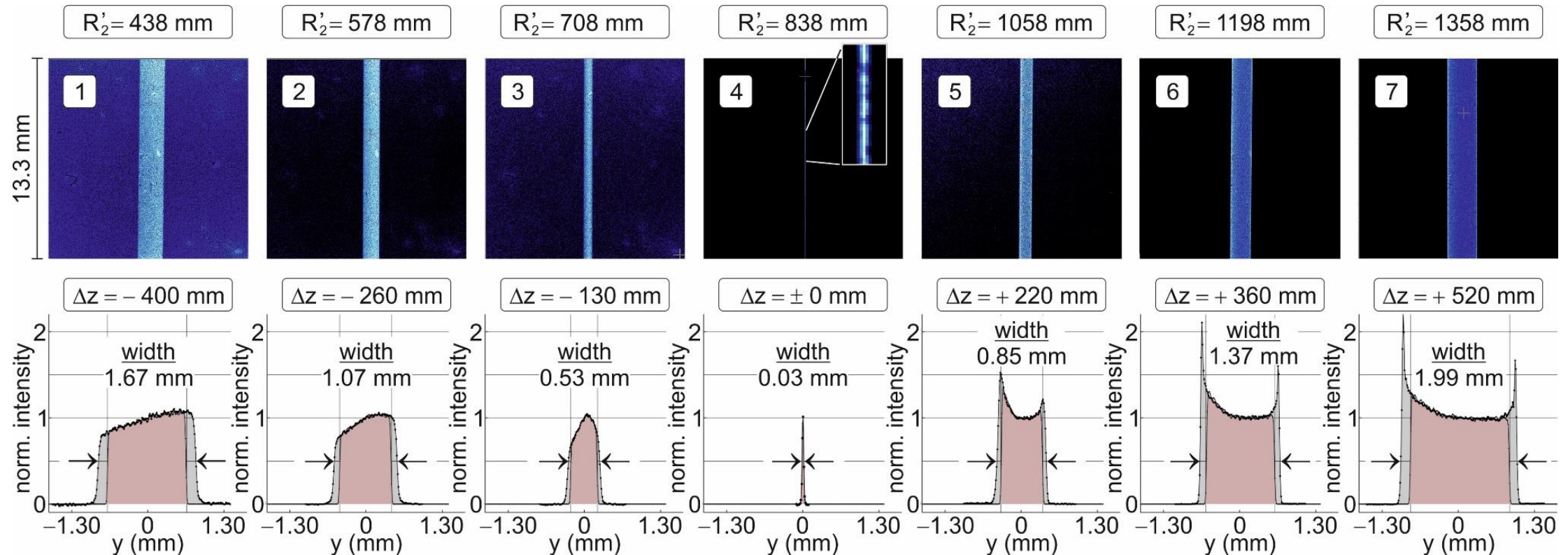
Fokussierung + Wellenlängen-Dispersion

2. diffraktive Struktur → freier Spektralbereich bzw. Auflösung ΔE



Sphärischer Spiegel: 3D-Intensitätsverteilung

Size($L \times W$)	$\Delta t_{\text{sub.}}$	ROC	Surface	$\pm\sigma$ (rms)
120 mm \times 30 mm	8 mm	29.13 m	blank Si	≈ 0.25 nm

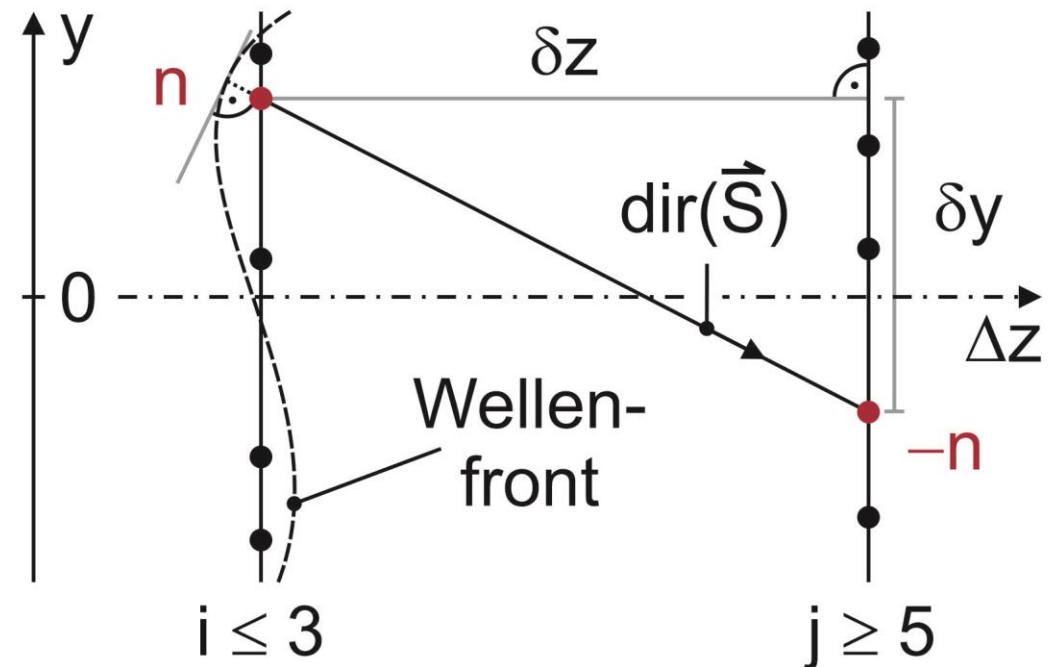
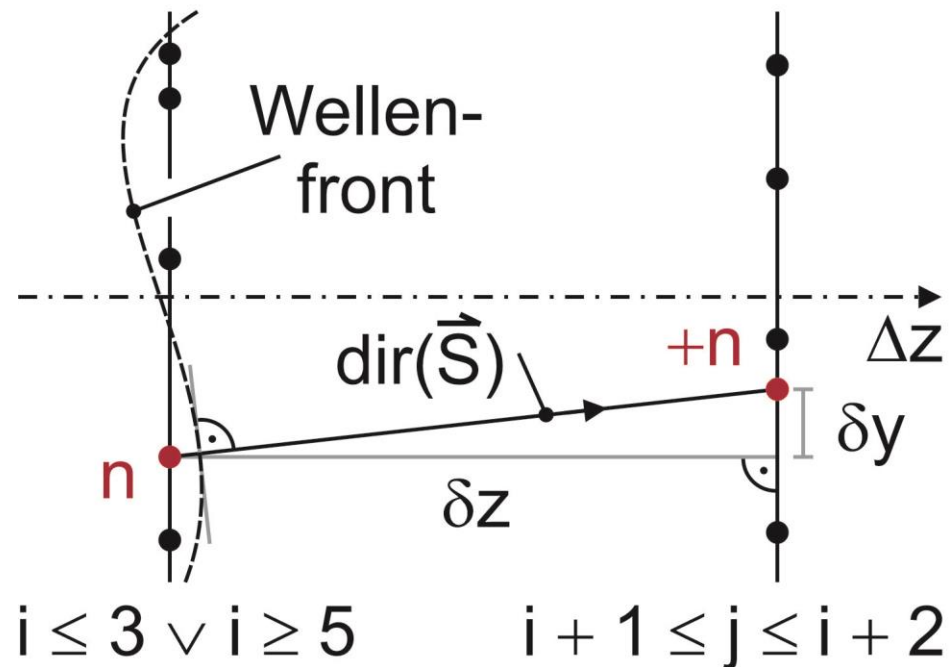


Geometrische Phase (1D) und Poynting-Vektor

TIE \rightarrow $-2\pi\lambda_0^{-1} \text{dir}(\vec{S}) = \partial_y \Phi(y, z)$ wobei $\text{dir}(\vec{S}) \equiv \partial y / \partial z$

intra-/extra-fokal

trans-fokal



Statistische Mittelung: „2 aus 6“ liefert $\pm \lambda/25$



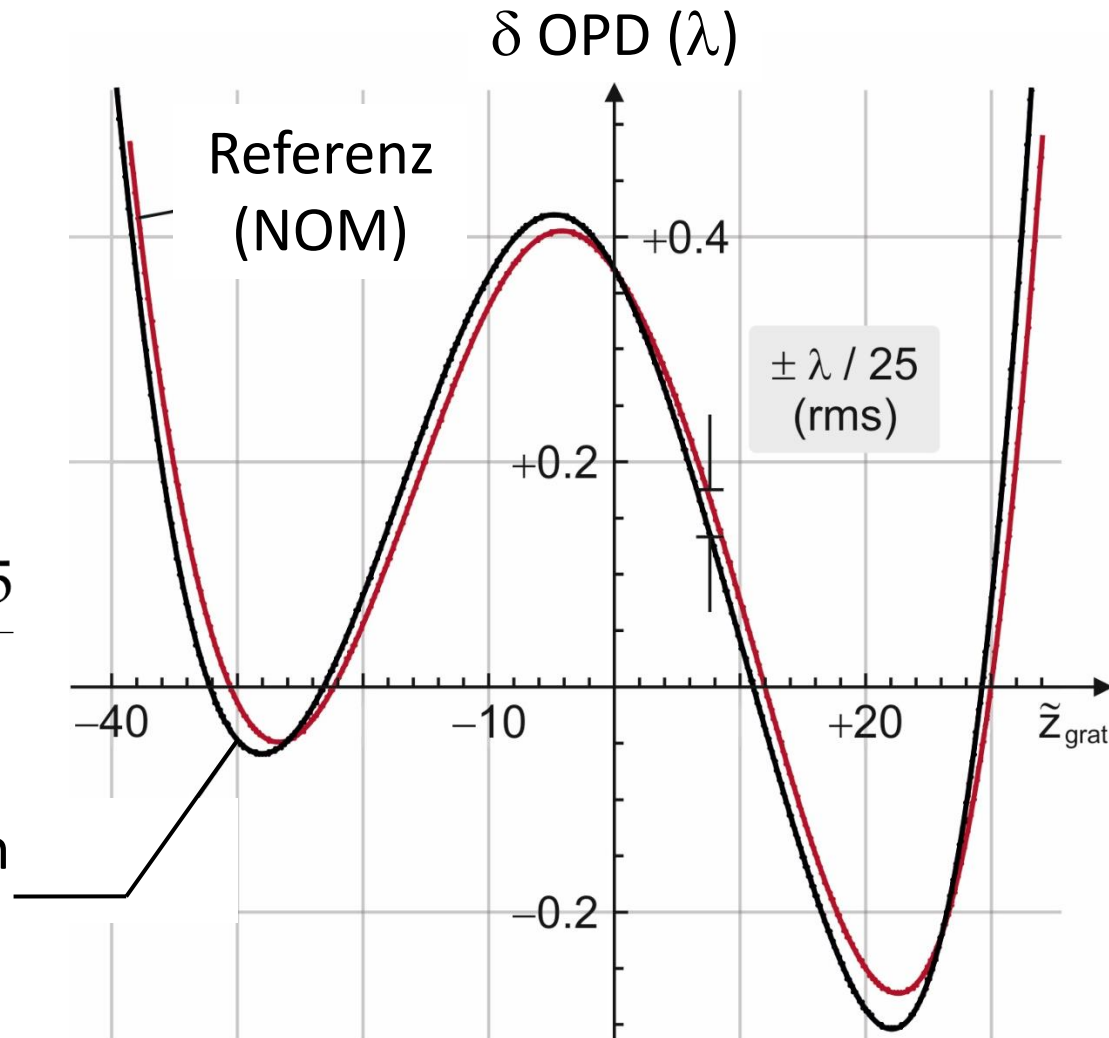
NOM @ HZB
“Nanometer Optical
Component
Measuring Machine”

15 Proben $i \mapsto j$

“+n” | $i, j \leq 3 \vee i, j \geq 5$

“-n” | $i \leq 3 \wedge j \geq 5$

Phasenrekonstruktion
 (“ray tracing”)



Skalierung, Mittelung
und
Projektion auf Ebene



DWK-Gitterstruktur



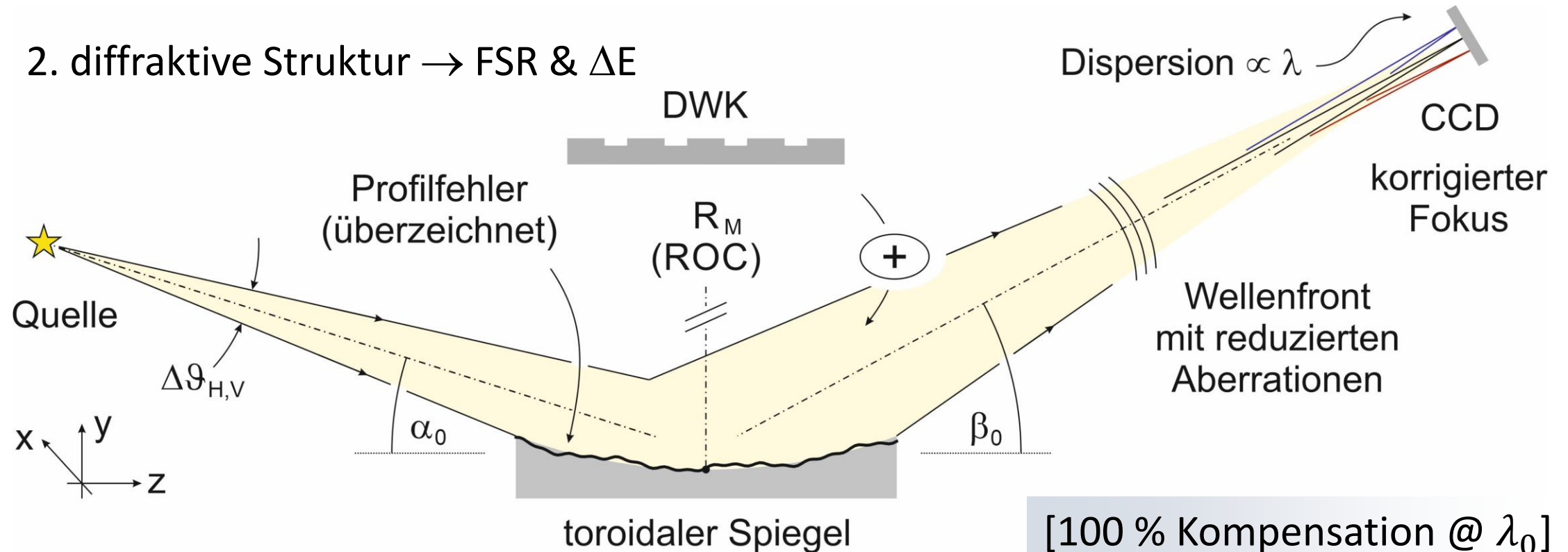
Fokus-Größe $1.1 \mu\text{m}$
($4.2 \times$ verbessert)

„All-in-one“: Integrierte Wellenfront-Korrektur

1. Reflexion an unstrukturiertem Spiegel mit Aberrationen (Form- / Figurenfehler)

Fokussierung + Wellenlängen-Dispersion

2. diffraktive Struktur \rightarrow FSR & ΔE



„All-in-one“: Mathematische Formulierung



Profil des Spiegels = Toroid + Figurenfehler („kleine Störung“)

$$h_{mir}(x, z) = R_M - \sqrt{\left(R_M - R_S + \sqrt{R_S^2 - x^2}\right)^2 - z^2} + \delta h_{fig}(x, z)$$

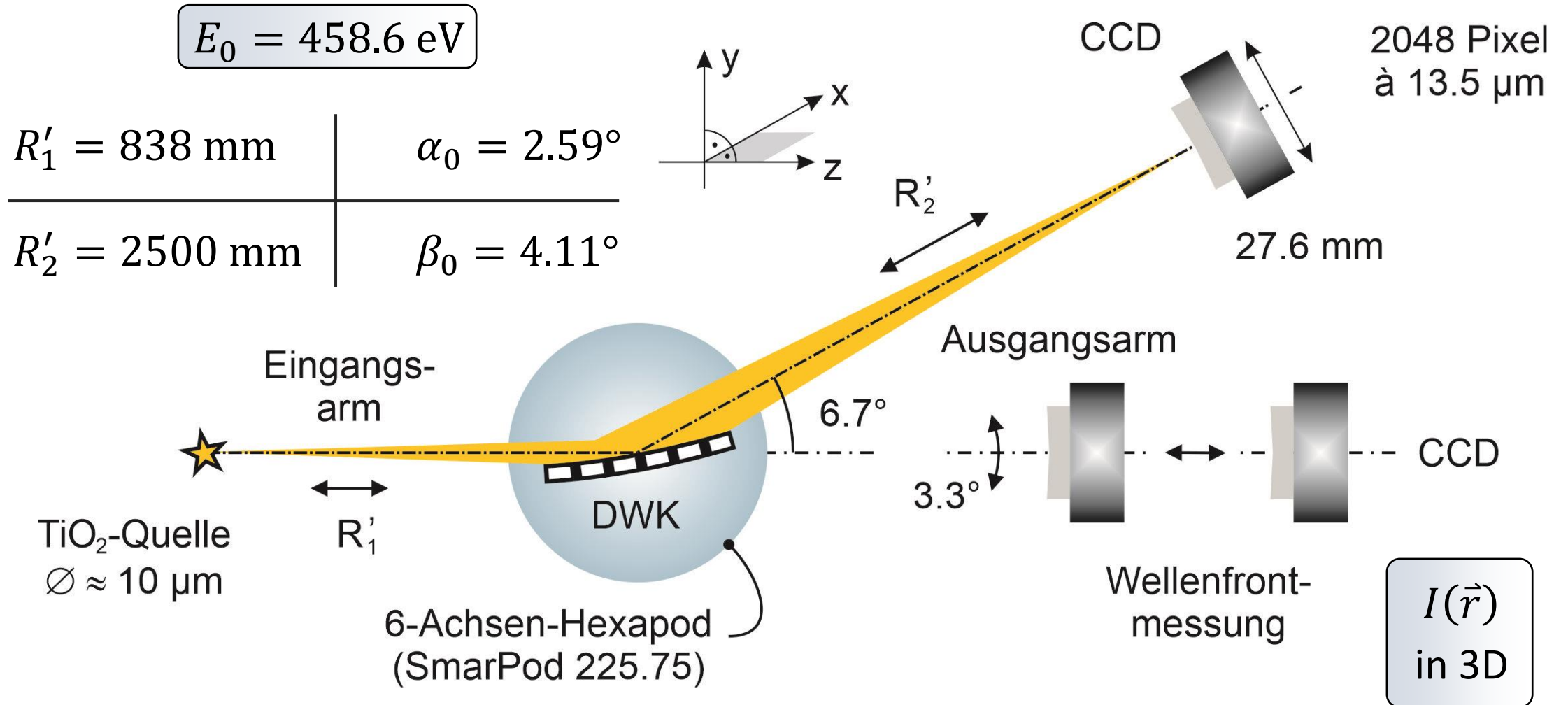
optische Wegdifferenz (OPD) [Punktquelle → Fokus] für lokale Gitterkoordinate (x, z)

$$\lambda_0 OPD(x, z) + (R'_1 + R'_2) = \sum_{i=1}^2 \sqrt{x^2 + (z \pm R_i \cos \theta)^2 + (h_{mir}(x, z) - R_i \sin \theta)^2}$$

$$R_1 \sin \theta = R'_1 \sin \alpha_0 \quad \text{und} \quad R_2 \sin \theta = R'_2 \sin \beta_0$$

numerische Lösung für $OPD(x, z)$ ([Mathematica](#)TM/[Optica](#)TM)

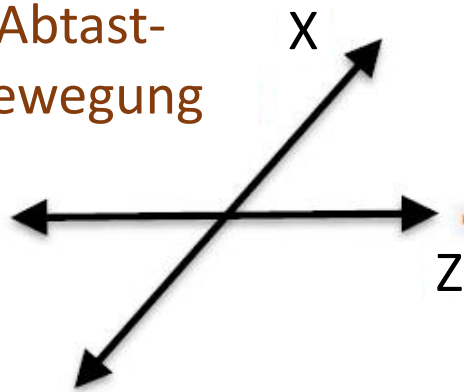
Ein Demonstrationsexperiment im Labor



2D-Spiegelmetrologie bei SIOS (Ilmenau)

Differential-Interferometer SP-DIS
mit einer Auflösung von $\pm 0.1 \text{ nm}$

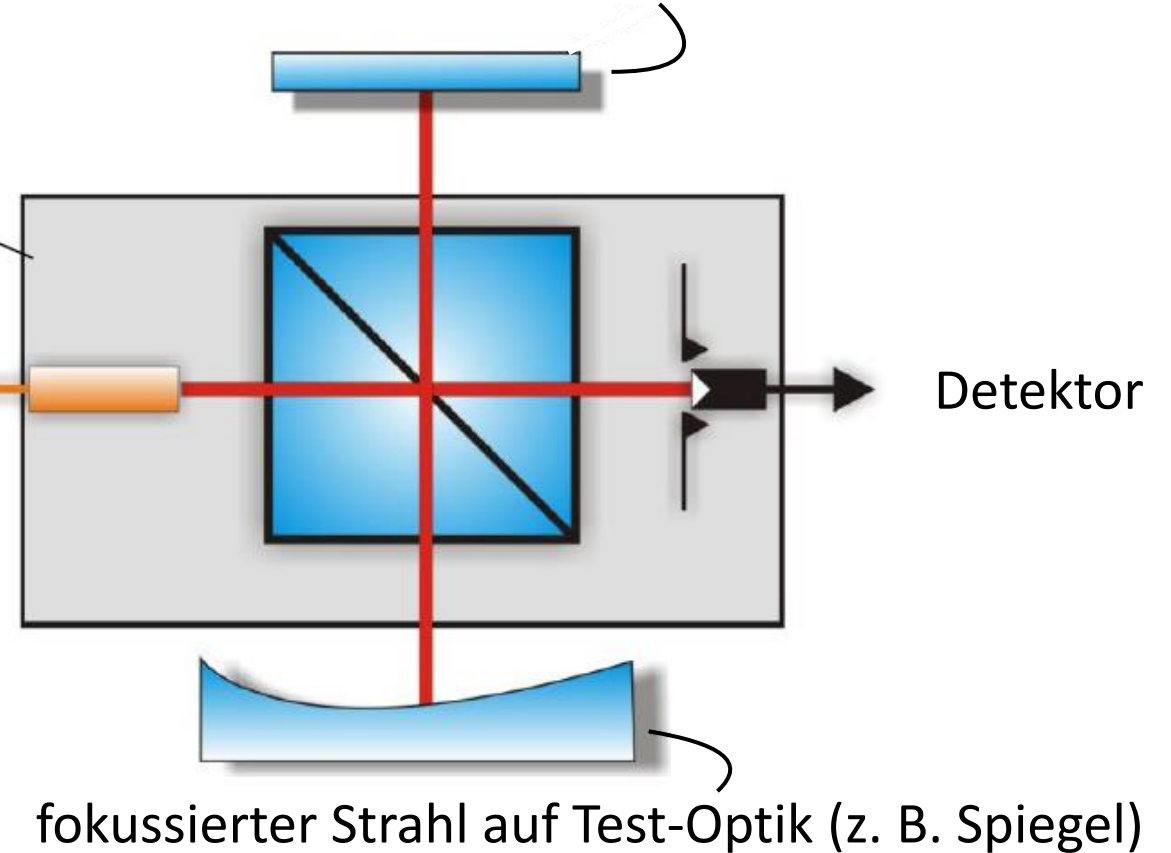
Abtast-
bewegung



Scan-Bereich (lateral): $90 \times 90 \text{ mm}^2$

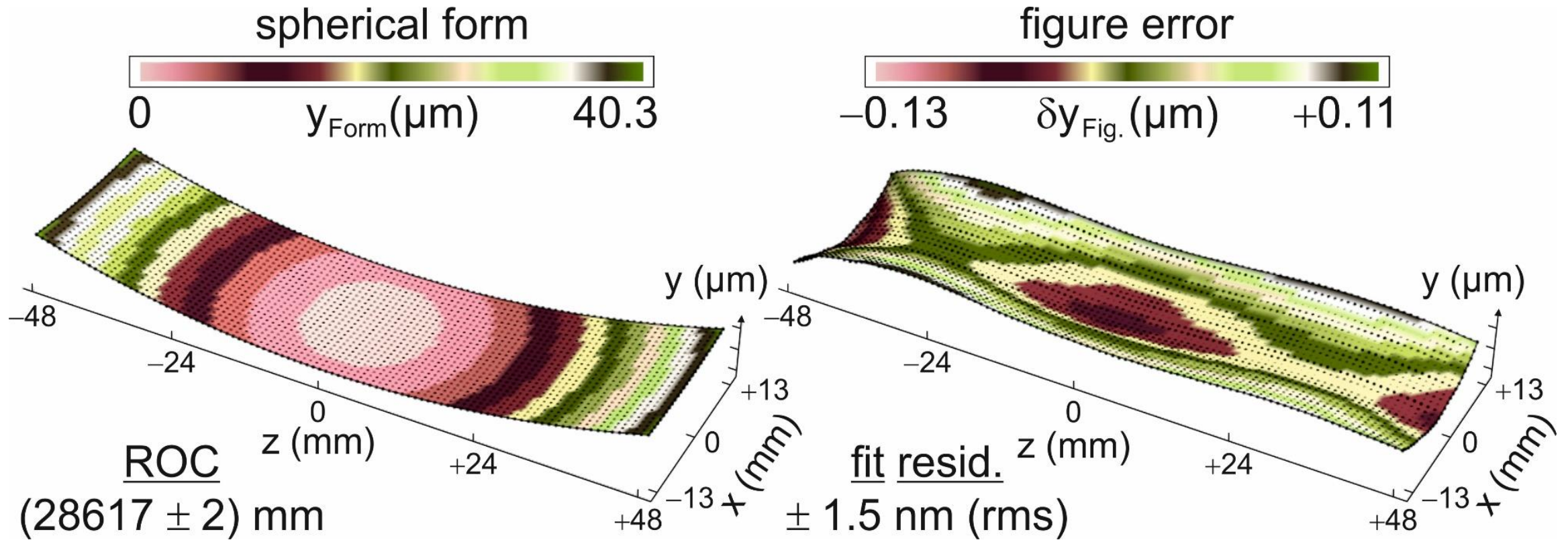
Abbildung © [SIOS GmbH](#)

Referenz: optischer Spiegel (Oberfläche $\lambda/20$)



M. Kühnel et al., "[Interferometrical profilometer for \[...\] measurements of free-form optics \[...\]](#)," Proc. SPIE **11853**, 1185309 (2021).

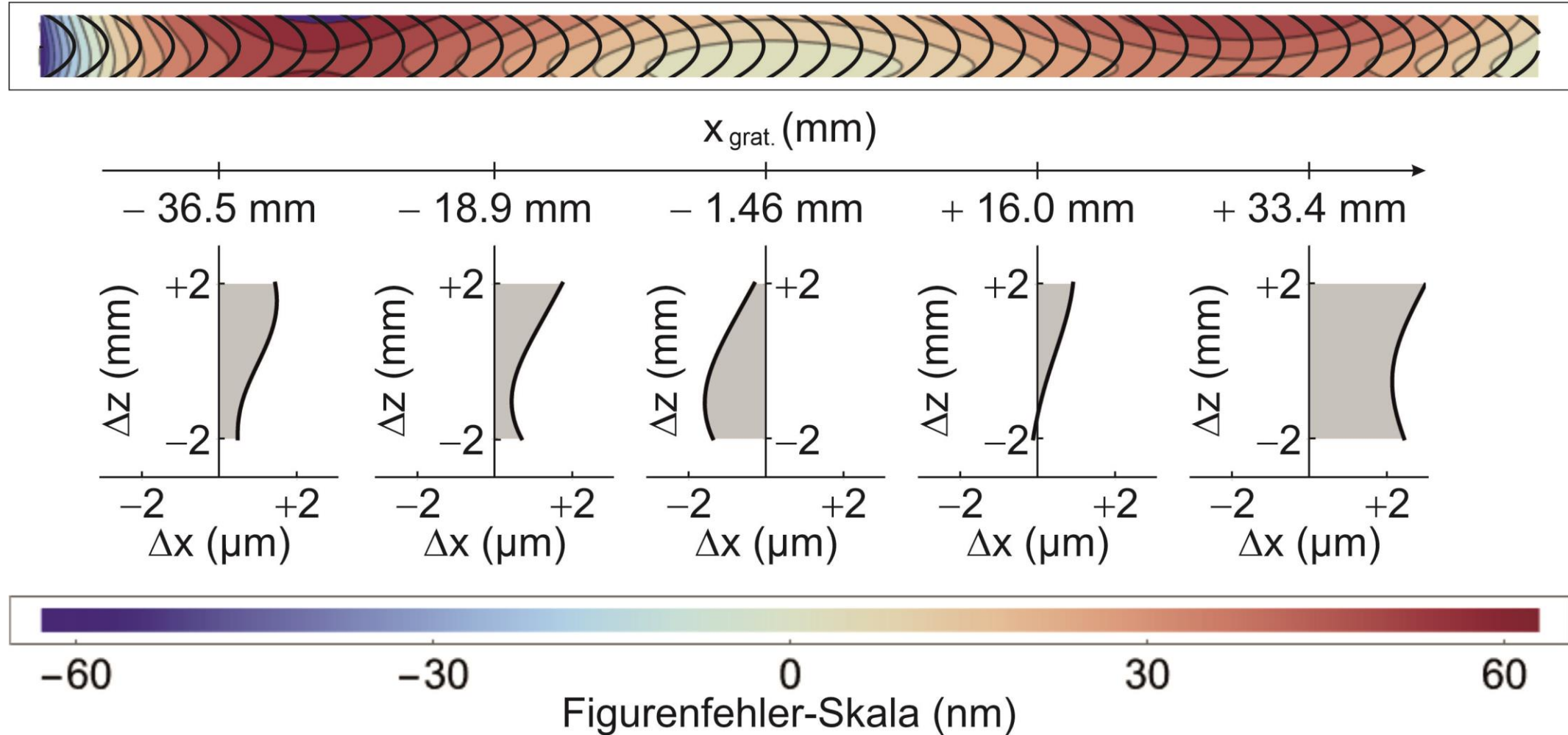
Sphärischer Spiegel: 3D-Scan der Si-Oberfläche



J. Probst et al., "[Conception of diffractive wavefront correction for XUV and soft x-ray spectroscopy](#)," Appl. Opt. **59**, 2580 – 2590 (2020).

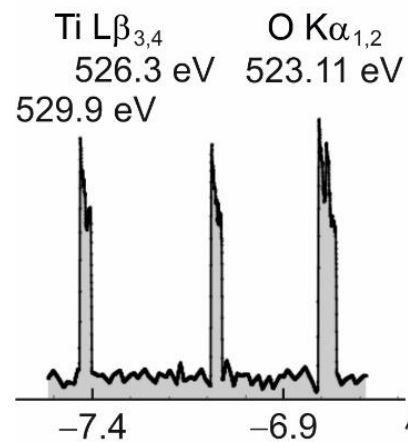
Abweichungen des DWK von regulärer RZP

Figurenfehler des Substrats (nm)

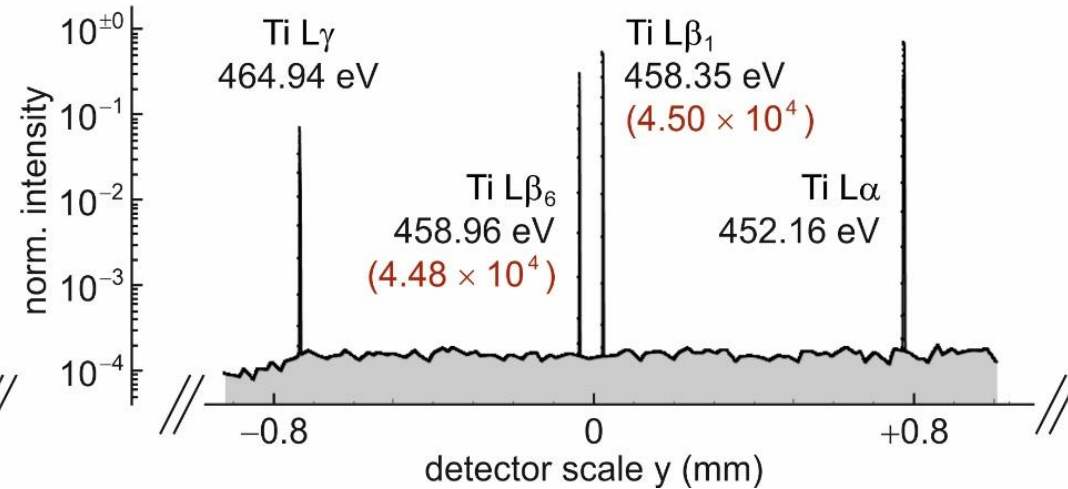


Simuliertes TiO₂-Spektrum (kohärente Quelle)

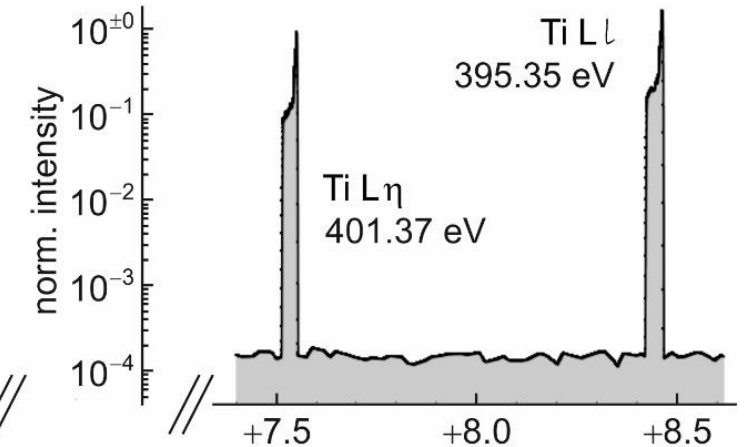
Aberr. (Koma)



bis zu 98 % der Beugungsgrenze

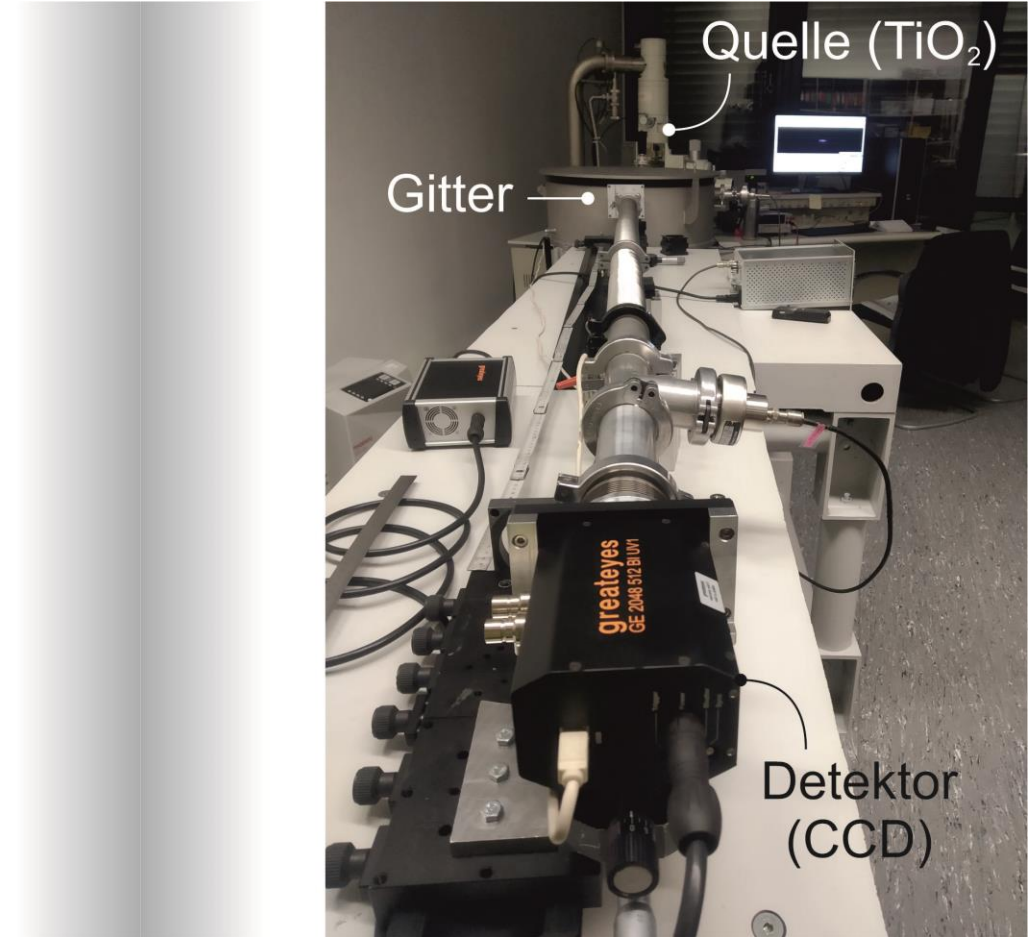
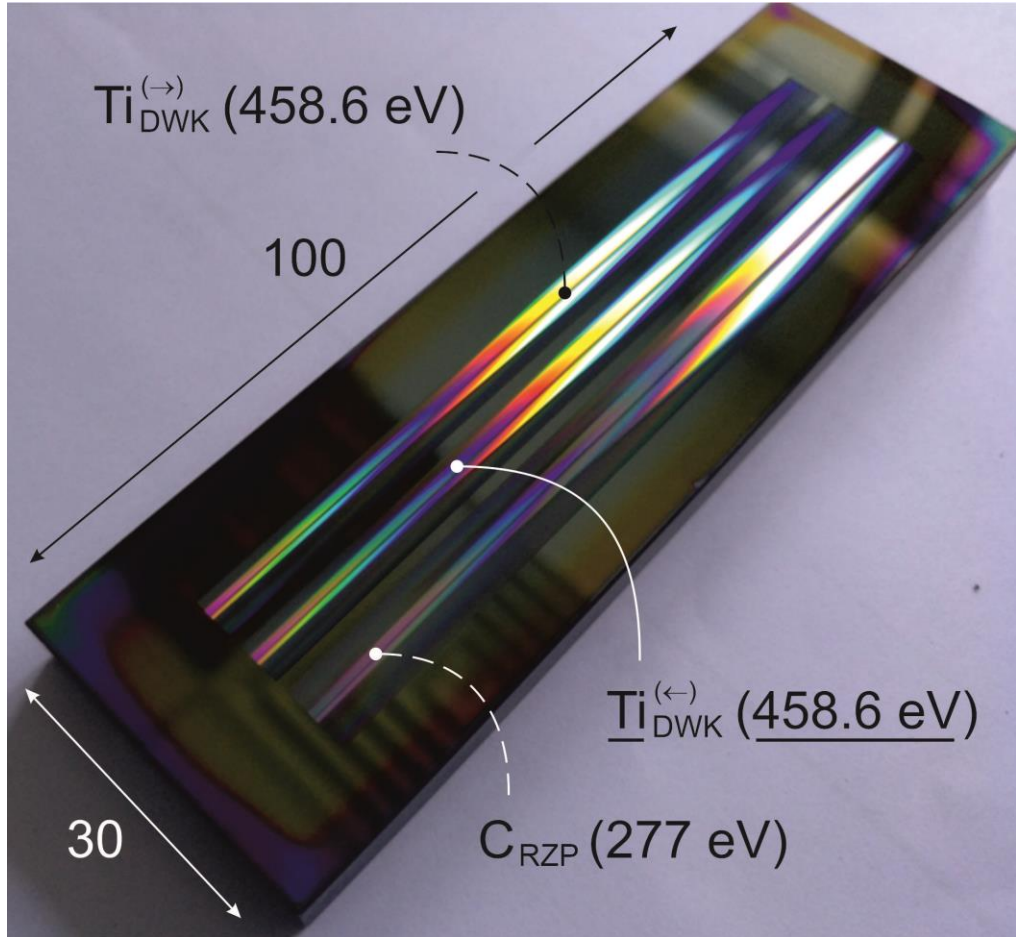


Aberr. (Koma)



$$(E/\Delta E)_{RZP} = 2.76 \times 10^3 \text{ vs. } (E/\Delta E)_{DWC} = 4.49 \times 10^4$$

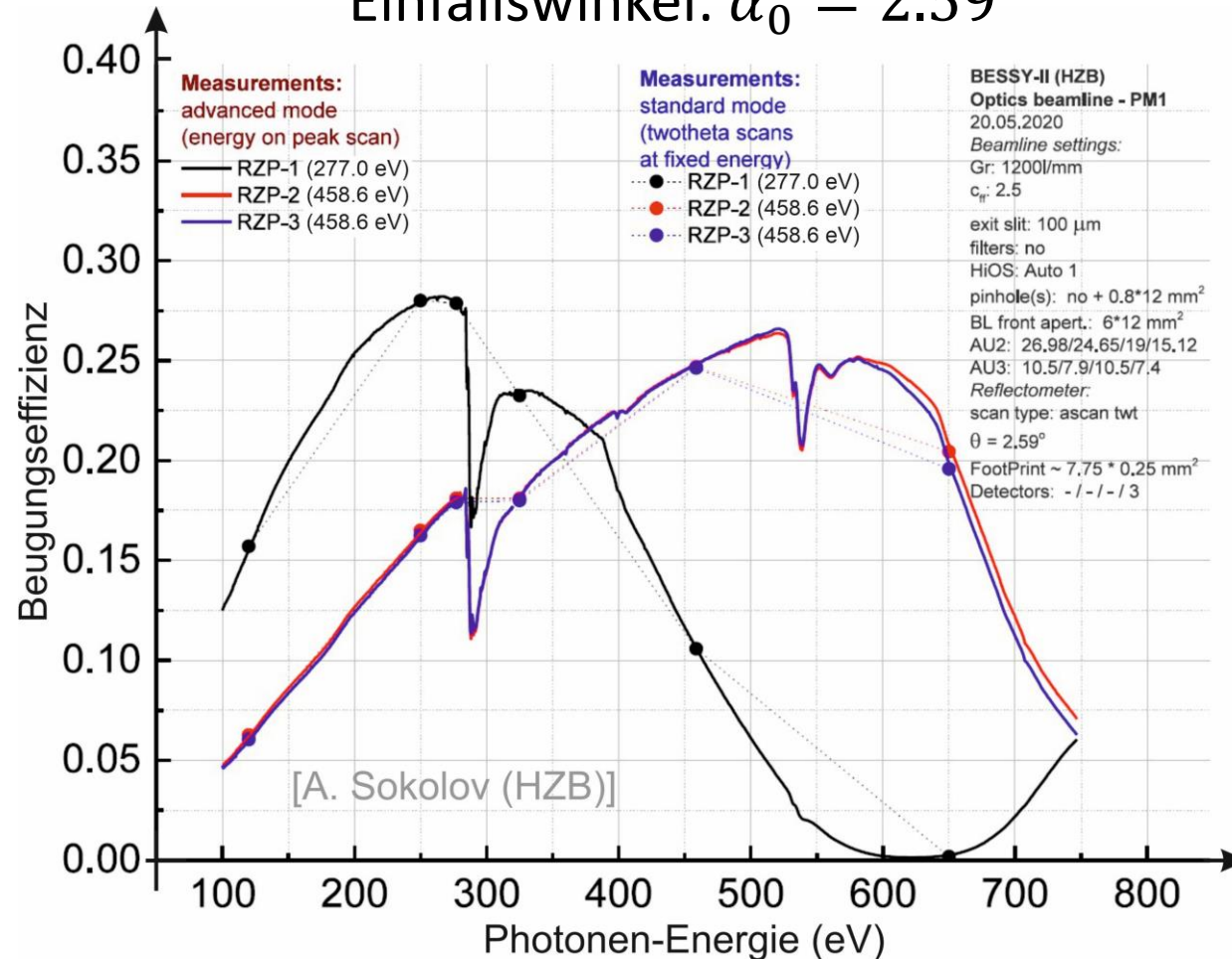
Fertigung und experimenteller Aufbau



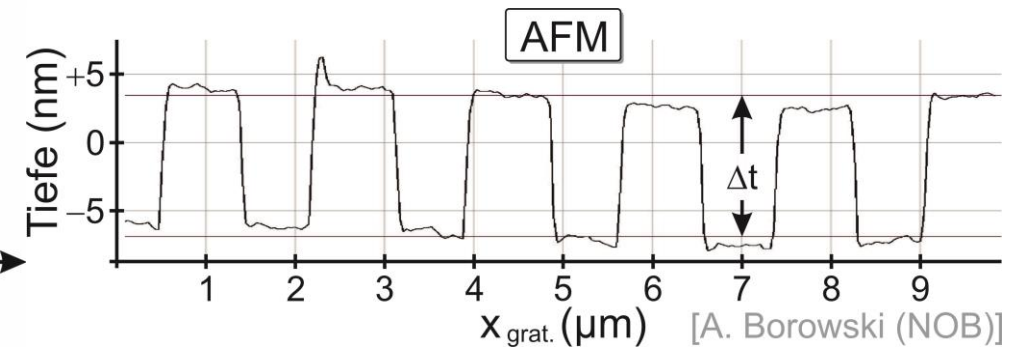
J. Probst et al., "[Flat Field Soft X-ray Spectrometry with Reflection Zone Plates on a Curved Substrate](#)," Appl. Sci. **10**, 7210 (2020).

Charakterisierung der RZP-/DWK-Gitterstruktur

Einfallswinkel: $\alpha_0 = 2.59^\circ$



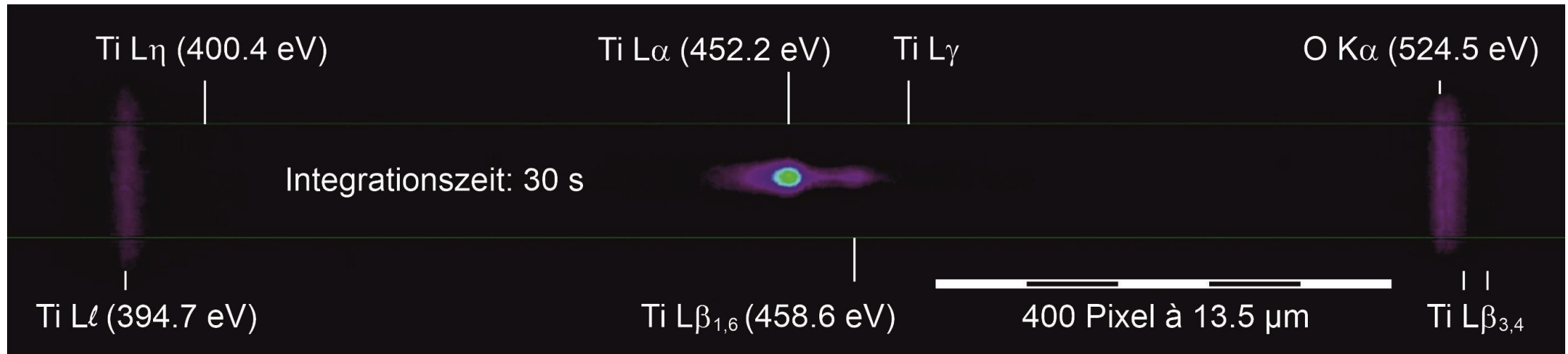
- Laser-Lithographie ([4Pico](#))
- Ar / O₂ Vektor-Ätzung (~ 1 mm/s)
- Laminarprofil & Ni-Beschichtung
- zentrale Periode: 1.74 μm
- Grabentiefe Δt: 10.4 nm
- Füllfaktor: 46 %



CCD-Aufnahme: TiO₂-Fluoreszenz im „Sub-keV“

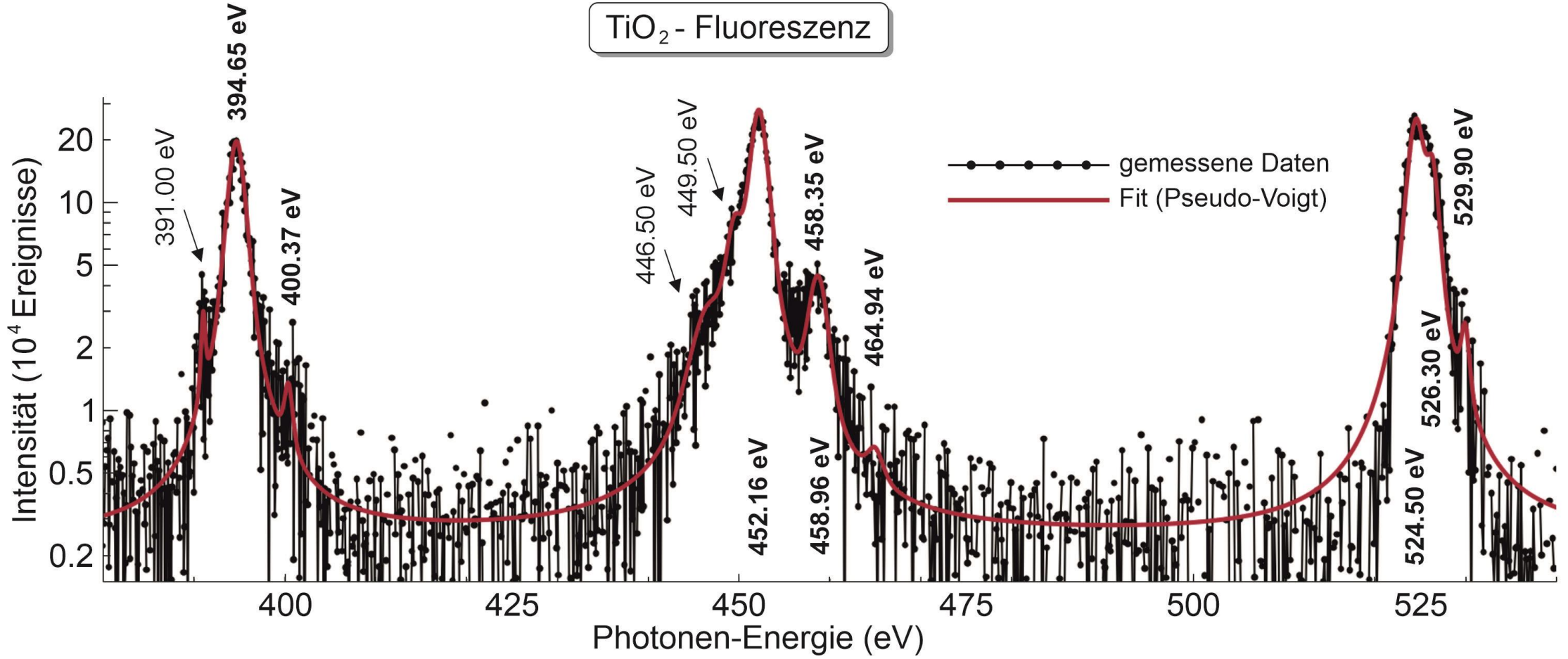
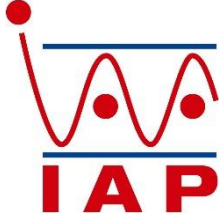
greateyes ALEX-s 2k512 BI UV1

effektive Ortsauflösung mutmaßlich $\approx 25 \mu\text{m}$ (Streuung in benachbarte Pixel)



- 2D-Fokussierung → Doppelkegel, vgl. LPP-Spektrum
- sphär. Krümmung → spektrale Breitband-Tauglichkeit

TiO₂-Emissionsspektrum @ $E/\Delta E \geq 230 \pm 30$



hervorgehoben: identifizierte TiO₂-Linien (Abweichung ~ 0.1 % oder weniger) | normal: unbekannt, Artefakt, ...

Ein Demonstrationsexperiment am PSI ...

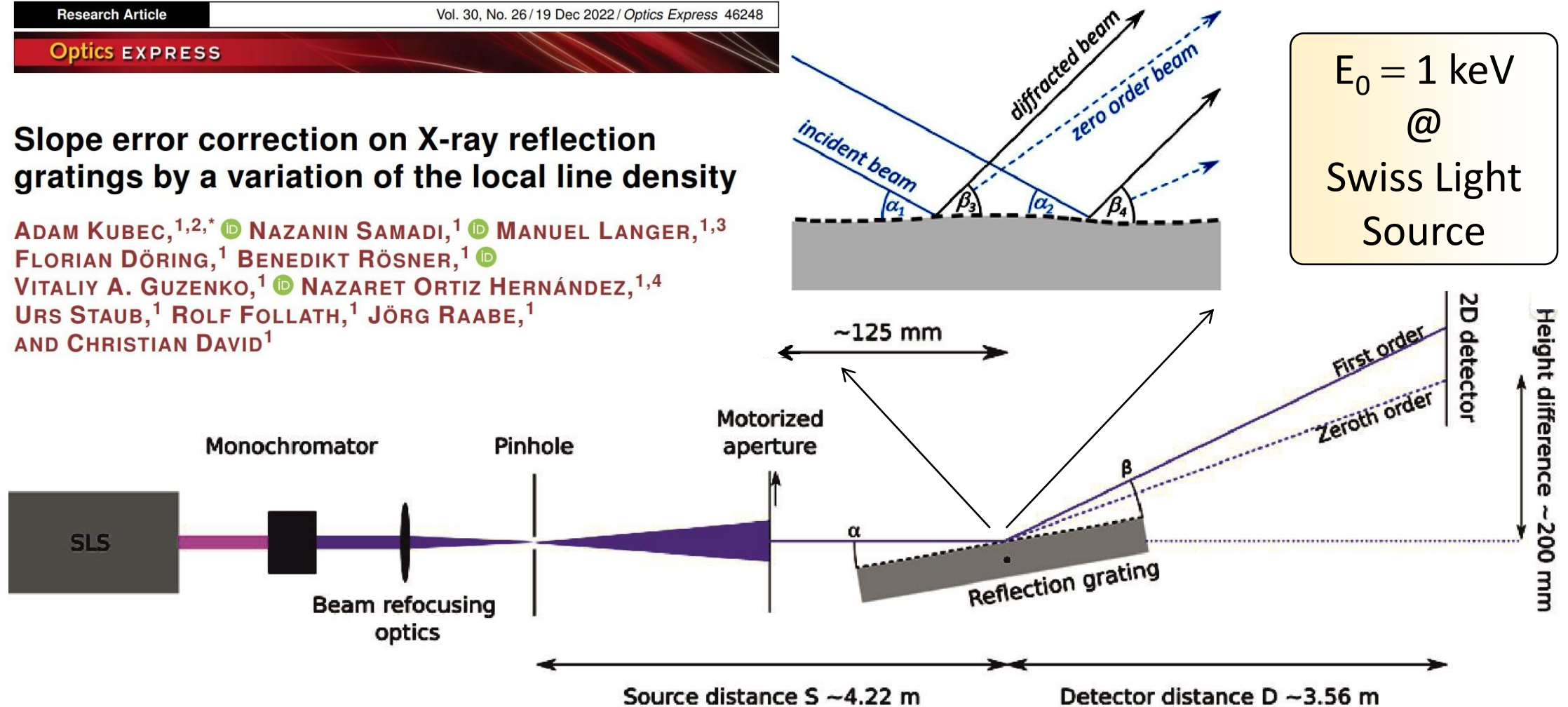
Research Article

Vol. 30, No. 26 / 19 Dec 2022 / Optics Express 46248

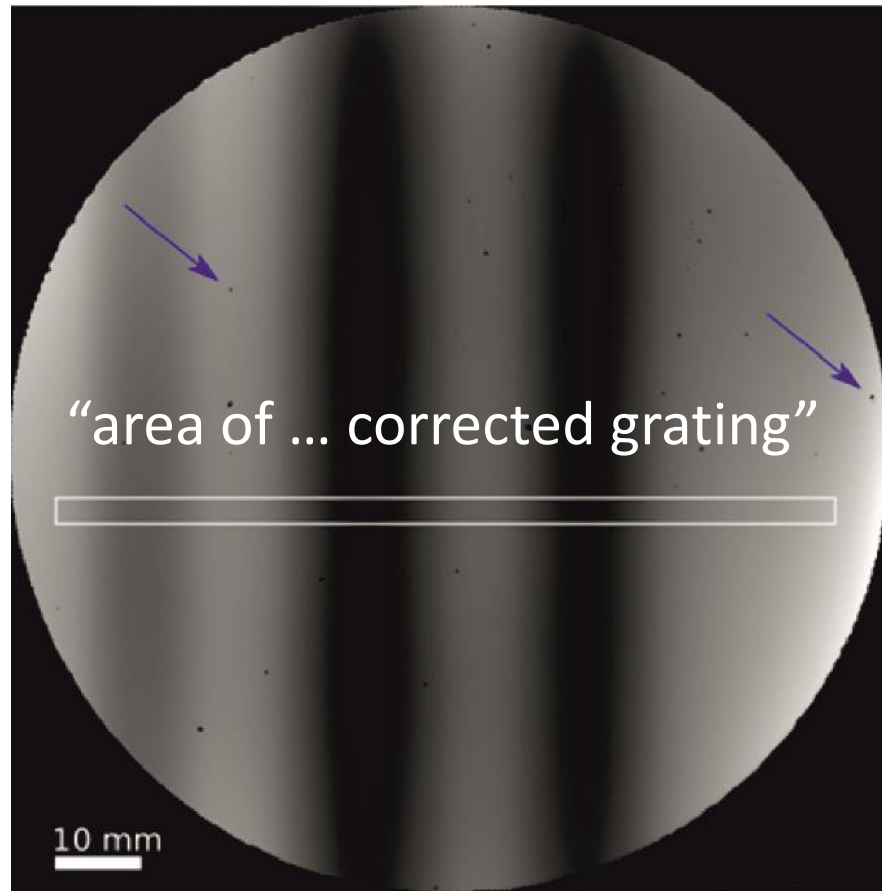
Optics EXPRESS

Slope error correction on X-ray reflection gratings by a variation of the local line density

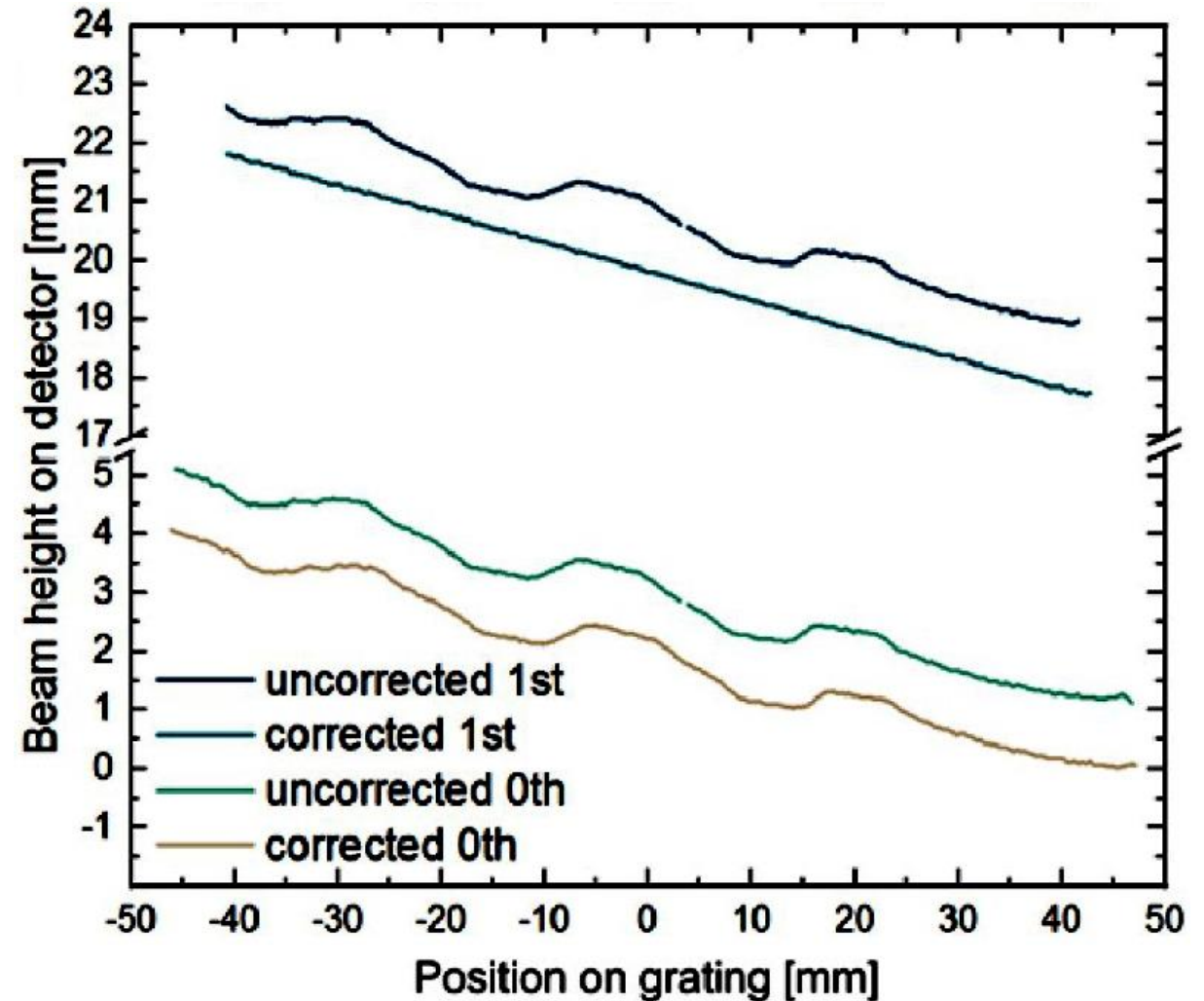
ADAM KUBEC,^{1,2,*} NAZANIN SAMADI,¹ MANUEL LANGER,^{1,3}
FLORIAN DÖRING,¹ BENEDIKT RÖSNER,¹
VITALIY A. GUZENKO,¹ NAZARET ORTIZ HERNÁNDEZ,^{1,4}
URS STAUB,¹ ROLF FOLLATH,¹ JÖRG RAABE,¹
AND CHRISTIAN DAVID¹



... zur 1D-Korrektur eines „welligen“ Substrats



“Height map of a grating substrate”



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Förderung: [Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz](#) – Projekt „NeuGaR“, Nr. ZF4302303SY8 (2018 – 2021).

[Alexei Erko](#)[†]

Christian Seifert
Reiner Wedell



Diana Matthies
Frank Wagner
Norbert Langhoff



Thomas Krist
Jürgen Probst
Heike Löchel

...



Peter Baumgärtel
Thomas Zeschke
Gregorz Gwalt

...



Michael Kühnel
Enrico Langlotz
Ilko Rahneberg

...