



Schlussbericht

zum BMBF-Vorhaben:

Nanometer-Optikkomponenten - NOK

Teilvorhaben:

Ionenstrahl- und Plasmabearbeitungstechnologien

Förderkennzeichen: 13N7931
Zuwendungsempfänger: IOM Leipzig
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2001 – 30.06.2004
Projektleiter: Dr. Axel Schindler
Autoren: Axel Schindler, Thomas Hänsel
Tel.: 0341 235 2234
Fax: 0341 235 2595
E-Mail: axel.schindler@iom-leipzig.de

Leipzig, Dez. 2004

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojektes ist die innovative (Weiter)-Entwicklung von Fertigungs- und Vermessungstechnologien superglatter, ebener und schwach gekrümmter (auch asphärischer) Oberflächen mit Formgenauigkeiten über alle Bereiche der Ortswellenlängen jenseits der gegenwärtigen technologischen Grenzen. Diese Technologien sind vor allem für optische, reflektierende Komponenten des EUV- und des weichen Röntgenwellenlängenbereiches unabdingbar. Weitere Anwendungen liegen im Bereich harter Röntgenstrahlung. Einsatzbedarf dafür besteht sowohl in der Forschung (Beamline-Optiken für Strahlung höchster Brillanz) als auch in künftigen Technologien die auf EUV-Strahlung und Röntgenstrahlung basieren, wie z.B. die EUV-Lithographie und der Röntgengerätetechnik. Die zur Realisierung der Zielstellung erforderlichen Mess- und Bearbeitungsverfahren sind zu entwickeln bzw. zu optimieren und gegebenenfalls auf bekannte konventionelle Verfahren materialbezogen abzustimmen. Schließlich ist deren Leistungsfähigkeit durch zu definierende produktnahe Demonstrationsoptiken nachzuweisen.

Das IOM-Teilvorhaben verfolgte vier Ziele zur nichtkonventionellen lokalen Bearbeitung der Optikoberflächen mit Nanometer- und Sub-Nanometertiefengenaugigkeit:

- i. Materialbezogene Prozessoptimierung der Ionenstrahlformgebung insbesondere unter Berücksichtigung der Vorbearbeitungseinflüsse zur Erzielung einer hohen Prozesskonvergenz und -stabilität für Sub-Nanometer Bearbeitungstoleranzen.
- ii. Optimierung der Ionenstrahlglättung mit planarisierender Hilfsschicht für gekrümmte Oberflächen
- iii. Materialbezogene Evaluierung und Applikationsentwicklung des lokalen Hochrateplasmaätzens (PACE) für die Asphärisierung,
- iv. Beiträge zur Leistungssteigerung der Sub-Apertur-Stitching-Interferometrie

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt wurde in zwei Bereiche unterteilt:

1. Bearbeitungsverfahren
2. Messtechnik

Das IOM gehörte zusammen mit den Partnern Jenoptik LOS Jena, Optikkomponenten und Kristalle Berlin und der Universität Jena zu den Bearbeitungsverfahren. Hier wurden nach aufeinander abgestimmten Bearbeitungsplänen (Prozessketten) Prozessoptimierungen von der Vor-

bearbeitung schleifen über läppen, polieren sowie fortgeschritten Verfahren der Endbearbeitung (Computer kontrolliertes Polieren – CCP, magneto-rheologisches Formbearbeiten – MRF sowie Ionenstrahlformkorrektur – ion beam figuring -IBF, Ionenstrahlglättung ion beam smoothing – IBS oder ion beam planarization – IBP und das Plasmajet-Ätzen – plasma assisted chemical etching - PACE) durchgeführt.

Die beiden Bereiche bzw. Gruppen arbeiteten in der ersten Hälfte des Projektes weitestgehend unabhängig voneinander. Danach kam es zu einer sehr intensiven Kooperation zwischen den Gruppen um die neu geschaffenen Messmöglichkeiten bei BESSY (NOK-Messmaschine) und bei der PTB für die Oberflächenendbearbeitung, die als letzten Schritt die mehrfache lokale Formkorrektur beinhaltet, voll zum Tragen zu bringen. Nur auf diese Weise konnten die entscheidenden Fortschritte an Oberflächenqualität bei der Herstellung der Demonstrator-Optiken für Synchrotronstrahlung (SR) für BESSY II erreicht werden. Abb. 1 zeigt das Schema des Zusammenwirkens der Verbundpartner

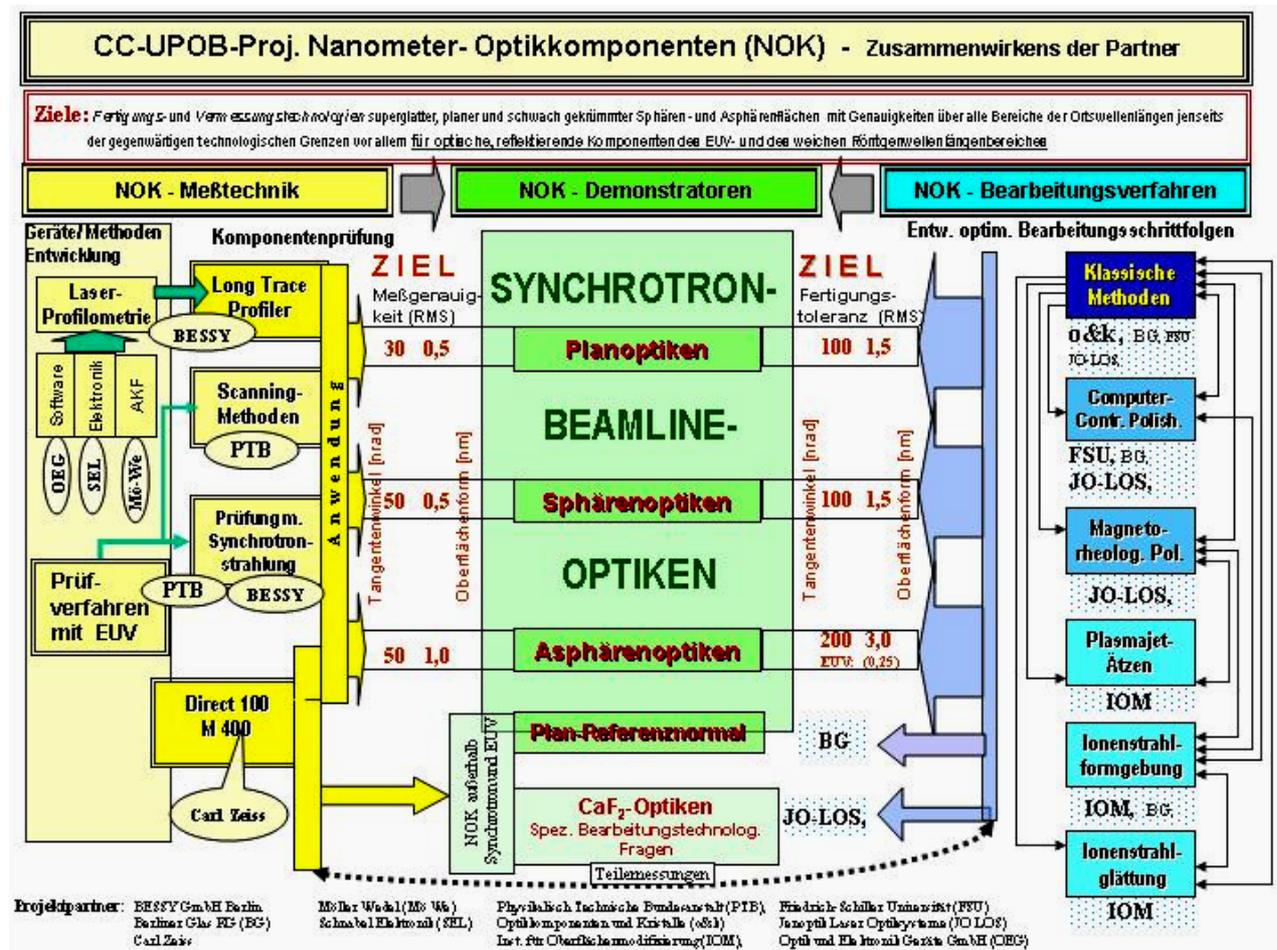


Abb. 1 Schema des Zusammenwirkens der Verbundpartner im Projekt. Die beiden Gruppen Messtechnik und Bearbeitungsverfahren wirkten zunächst getrennt und tauschten Informationen bei gemeinsamen Projekttreffen aus. In der Endphase, bei der Herstellung der Synchrotron-Demonstrator-Optiken brachte die intensive Zusammenarbeit zwischen beiden Gruppen auf der Basis der neu geschaffenen Messtechnik und neuer Verfahrensschritte des Ionenstrahlenbearbeitens den Projekterfolg.

Die Qualifizierung der Bearbeitungsschritte erfolgte zwischen den Teilnehmern sehr effektiv. Die Optimierung der Bearbeitungsprozesse erfolgte zunächst an Dummy-Proben vom Schleifen bis zur Ionenstrahlformgebung. Für die erfolgreiche Endbearbeitung der Demonstrator-Proben war einerseits die direkte und schnelle Zusammenarbeit zwischen IOM und BESSY (Nutzung der neu entwickelten Nanometer-Messmaschine NOM) und andererseits die notwendig gewordene Entwicklung zur deterministischen Bearbeitung kleiner Ortswellenlängen mit Millimeterausdehnung mittels der neu entwickelten Ionen-Feinstrahlquelle ausschlaggebend. Ebenso wichtig war die Verbesserung der interferometrischen Messtechnik im IOM durch die Weiterentwicklung der Stitching-Methode.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Projekt wurde ausgehend vom technologischen Stand der Qualität von Synchrotronstrahlungsoptiken zielführend geplant um bei Projektende einen Qualitätssprung bei der Verbesserung des Tangentenwinkelfehlers durch die Verbesserung der Messtechnik als grundlegende Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz der Bearbeitungstechnologie einerseits und durch Optimierung der Folge der Bearbeitungsschritte bzw. der Weiterentwicklung von Bearbeitungsprozessschritten andererseits, zu erreichen (vgl. Abb. 2).

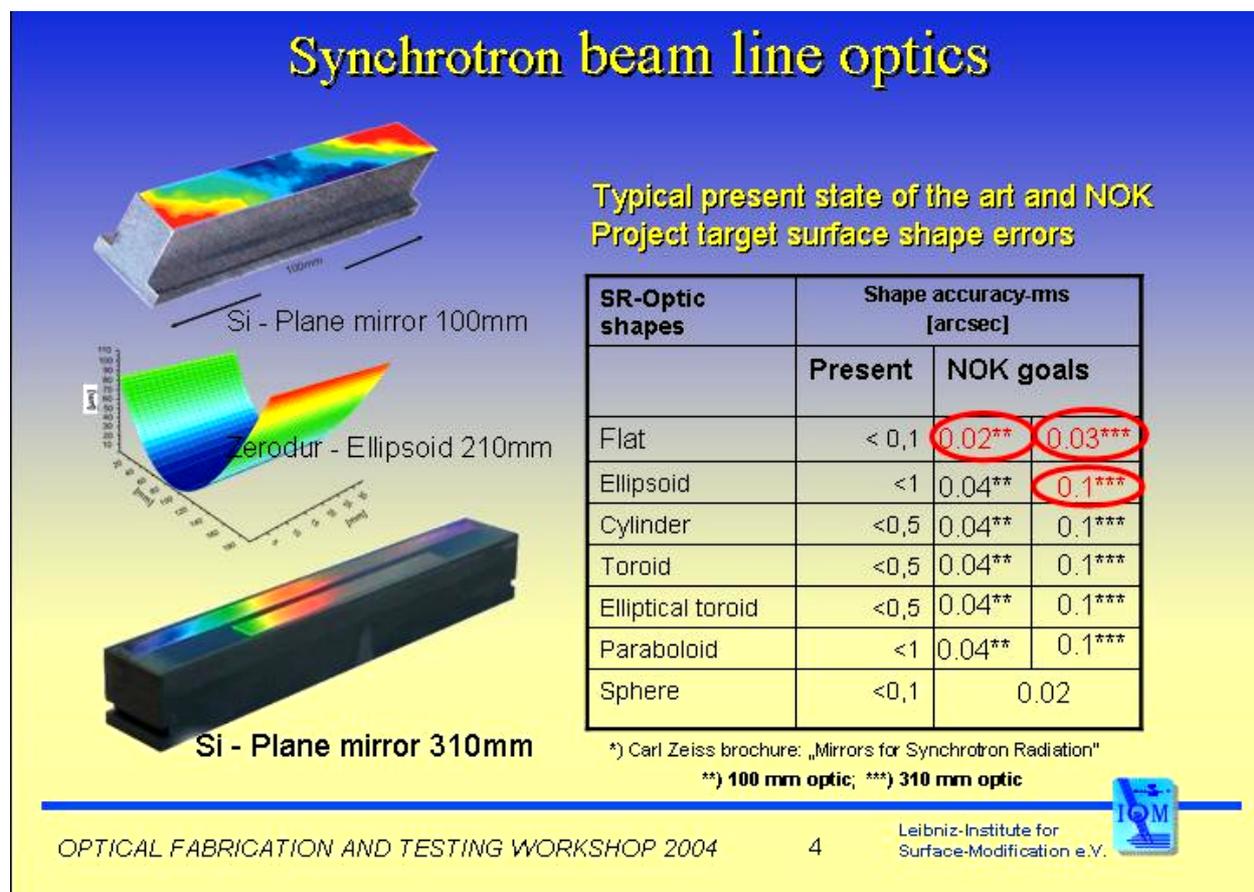


Abb. 2 Vergleich zwischen dem Stand der SR-Optiken zu Projektbeginn und den Projektzielen

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie bereits oben beschrieben erfolgte in allen Projektphasen eine sehr intensive Zusammenarbeit mit diversen Projektpartnern. In der ersten Phase der Qualifizierung und Optimierung der Technologieschritte vor allem mit den Partnern der Gruppe „Bearbeitungsverfahren“. In der Endphase erwies es sich als erfolgsträchtig, sehr eng mit BESSY bei der Herstellung der Demonstrator-Optiken zusammenzuarbeiten um dabei vor allem die im Projekt neu entwickelte leistungsstarke Nanometermessmaschine NOM zur Messung der Tangentenwinkelfehler der mehrfach mit dem Ionen(fein)strahl zu korrigierenden Optiken zu nutzen. Messvergleiche mit der ebenfalls im Projekt weiterentwickelten Messtechnik der Sub-Apertur-Stitching-Interferometrie (SASI)- im IOM erwiesen sich als sehr fruchtbar zur Interpretation der Messresultate insbesondere im Hinblick auf die unterschiedliche laterale Auflösung zwischen NOM und dem Stitching Interferometer.

Als Demonstratoren wurden folgende SR-Optiken gemeinsam mit den Partnern Optikkomponenten und Kristalle GmbH, Jenoptik L.O.S. GmbH und BESSY GmbH zum Einsatz in BESSY Strahlrohren hergestellt:

1. Substrat für plan/sphärisches Gitter 100 mm mit dem Genauigkeitsziel der Winkeltangentenabweichungen von 0,02 arcsec rms und
2. Spiegel mit elliptischer Zylinderfläche 210 mm mit dem Genauigkeitsziel der Winkeltangentenabweichungen von 0,1 arcsec rms
3. Planspiegel 310 mm, mit Genauigkeitsziel der Winkeltangentenabweichungen von 0,03 arcsec rms,

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse

2.1.1 *Prozessoptimierung der Ionenstrahlformgebung*

Aus der während der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten heraus gereiften Erkenntnis, dass mit zunehmender Verbesserung der langwelligen Oberflächenformfehler nach Ionenstrahlformbearbeitungsschritten mit gaußförmigen Strahlprofilen größer 10 mm HWB der verbleibende Fehler der kurzen Ortswellenlängen die Performance der Optiken begrenzt, führte zu der Entwicklung einer Ionenstrahltechnik mit kleinem Strahlwerkzeug. Dazu wurde im Projekt aufbauend auf vorausgegangenen Entwicklungsergebnissen des IOM eine Feinstrahlquelle an die neuen Erfordernisse angepasst, getestet und zur Feinstbearbeitung eingesetzt. Als Basis dient eine HF-Ionenquelle, die mit Blenden unterschiedlicher Öffnung für unterschiedliche Strahlquerschnitte bestückt werden kann. Weiterentwickelt wurde die Strahlneutralisation.

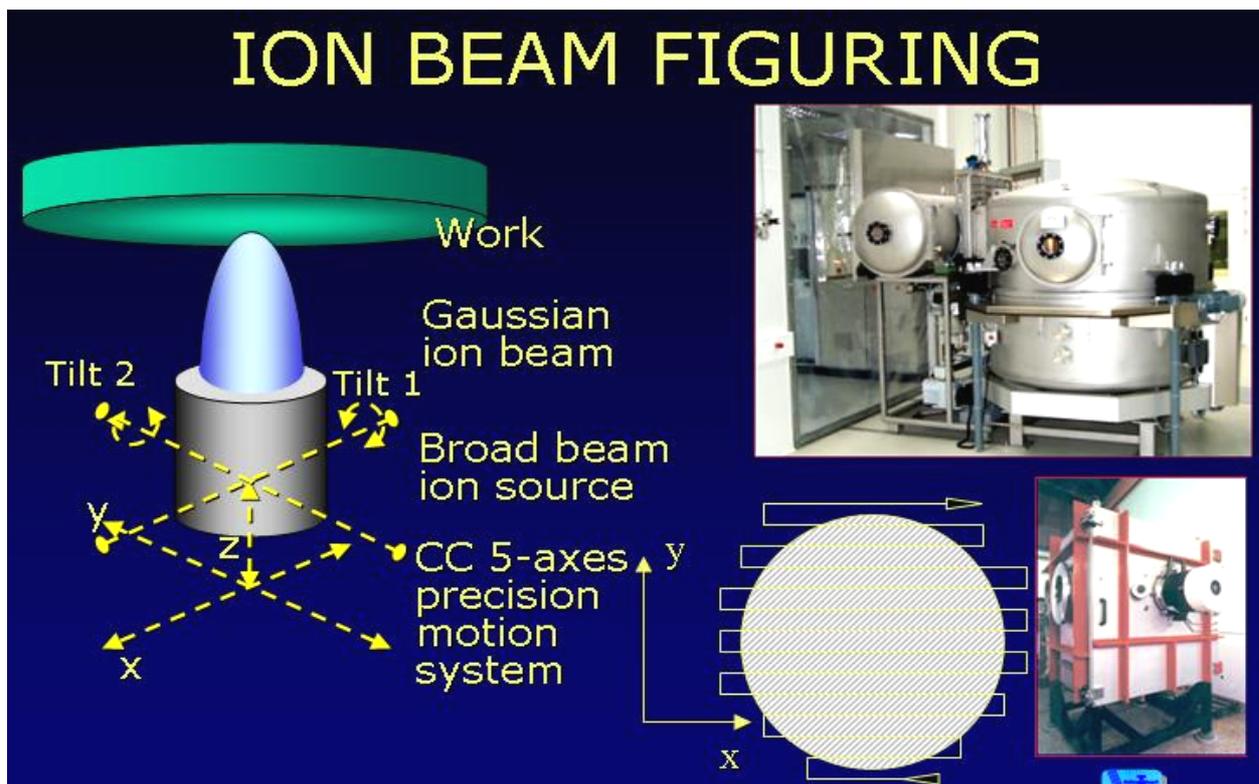


Abb. 3 Prinzip der Ionenstrahlformbearbeitung nach dem Verweilzeitverfahren mit konstantem und langzeitstabilem Ionenstrahl. Rechts unten ist die Laboranlage zu sehen, auf der die Projektarbeiten durchgeführt wurden. Rechts oben ist eine Anlage für eine spätere Fertigung. Sie wurde in einem anderen Projekt unter Mitwirkung des IOM zur Technologieimplementierung entwickelt.

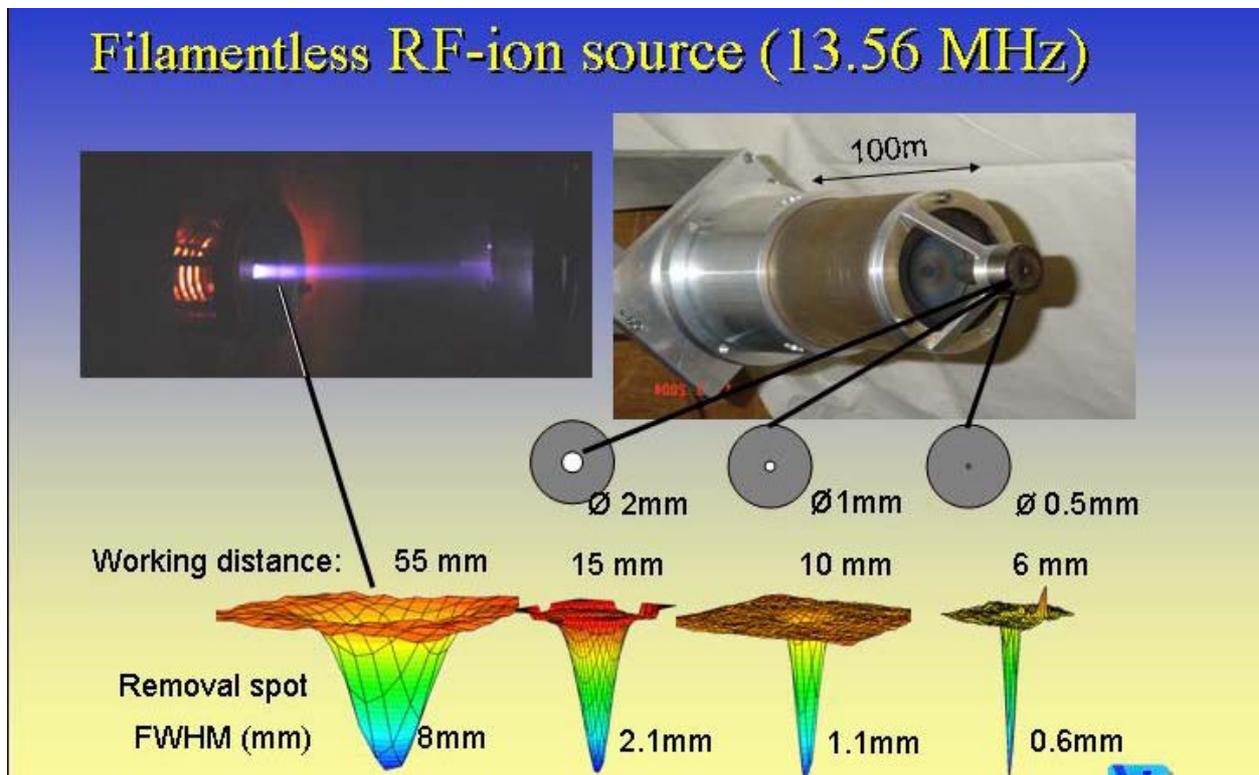


Abb. 4 Entwickelte Feinstrahloptionen basierend auf einer HF-Ionenquelle aus dem IOM. Die untere Reihe zeigt in Falschfarbendarstellung 3D-Plots der Interferometer-Messungen von ionenstrahlgeätzten „Footprints“ unter Verwendung von Strahlblenden. Der Arbeitsabstand Blende – Werkstück und die jeweilige Halbwertsbreite des Strahles ist angegeben.

2.1.2 Optimierung der Ionenstrahlglättung

Neben den Formfehlern in den Bereichen langer und mittlerer Ortswellenlängen, erstere verursachen optische Abbildungsfehler und letztere eine Konturunschärfe der Abbildung, spielt die Mikrorauheit eine wichtige Rolle. Sie verursacht Streulichtverluste.

Techniken zur Oberflächenglättung /1, 2/ mittels Ionenstrahlätzen sind die Direktglättung, wo unter bestimmten Strahlparametern (Ionenenergie, Ionensorte, Ioneneinfallswinkel) eine Glättung bis in den Bereich von kleiner 0.2 nm rms erreicht wird, und die Planarisierung /3/. Bei letzterer wird die Oberfläche zunächst mit einer Hilfsschicht „planarisiert“ d.h. das Schichtmaterial (typischerweise ein Fotoresist) füllt als Flüssigkeit beim spin coating die Vertiefungen aus, die raue Fläche „planarisiert“. Danach wird unter dem Planarisierungswinkel die Oberfläche ionenstrahlgeätzt. Dabei wird unter Aufzehrung der Planarisierungsschicht deren glatte Oberfläche in das zu glättende Material übertragen. Der Planarisierungswinkel ist der Ioneneinfallswinkel bei dem für einen vorher bestimmten Satz von Strahlparametern die Ätzrate von dem Schichtmaterial gleich der Ätzrate des zu glättenden Substratmaterials ist.

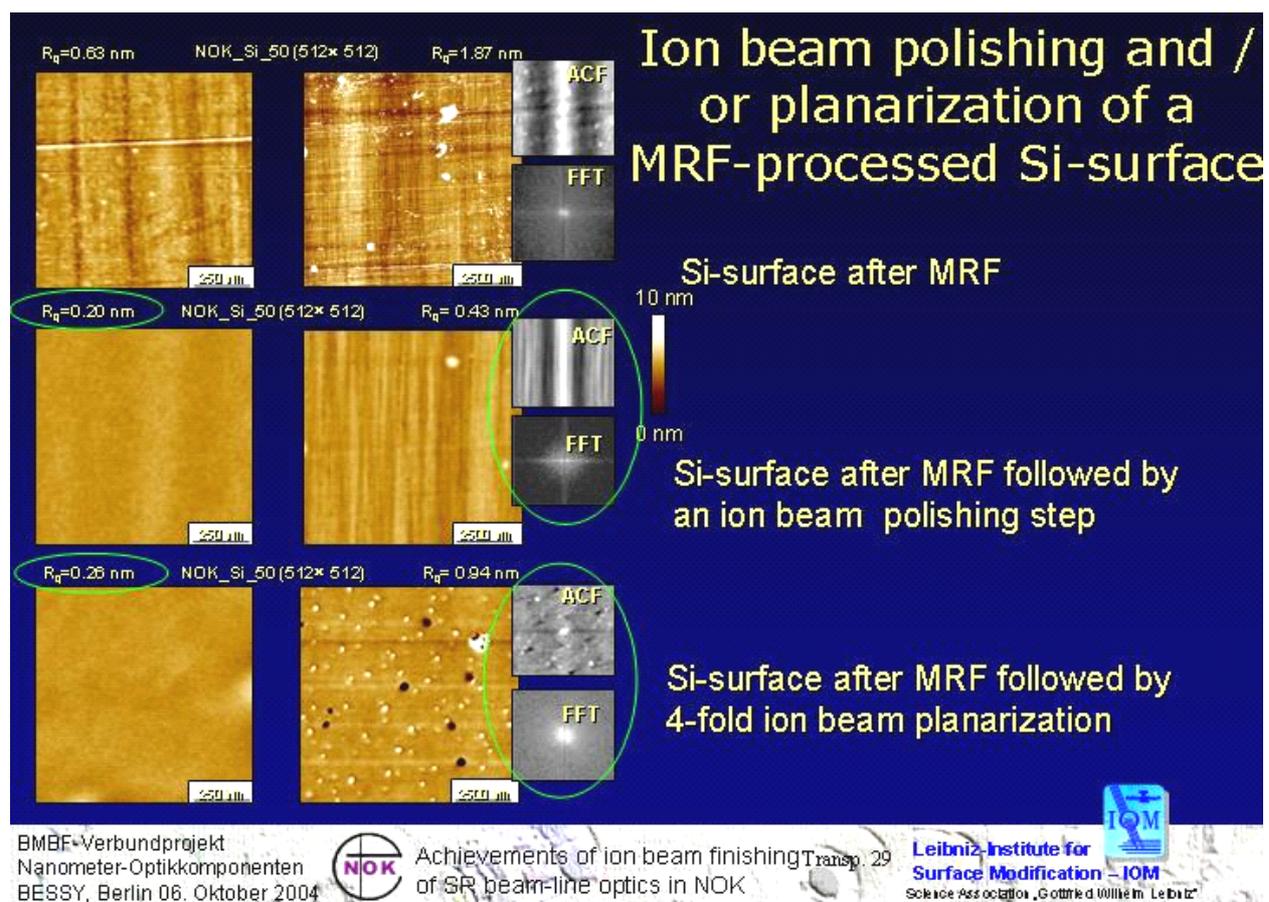


Abb. 5 Glättung von Si, dass mit MRF bearbeitet wurde, obere Reihe: MRF-bearbeitet, Mitte: nach Ionenstrahl-Direktglättung, unten nach zusätzlich mehrfacher Planarisierung. Beide Bearbeitungsschritte glätten. Erst im Planarisierungsschritt verschwindet die MRF-Linienstruktur, wie das Fouriemuster zeigt. Die Punktstruktur im AFM-Bild unten rechts ist eine nicht prozessbedingte Oberflächenverunreinigung.

Abb. 5 zeigt ein Ergebnis des Projektes. Eine mit magneto-rheologischem finishing bearbeitete Si Oberfläche zeigt in den oberen AFM-Abbildungen die typische Linienstruktur mit einer rms-Rauheit nahe 1 nm. Die AFM Aufnahmen in der Mitte zeigen die gleiche Fläche nach einer Ionenstrahl-Direktglättung. Die Rauheit wurde deutlich verbessert, jedoch verbleiben Linienstrukturen längerer Ortswellenlängen, wie auch deutlich die Fourieranalyse dieser Messung in Fig. 5 zeigt. Nach mehrfacher Planarisierung verschwindet auch diese Struktur (AFM-messungen und Fourieranalyse im unteren Teil von Abb. 5). Die Punktstruktur unten rechts in Abb. 5 ist eine nicht prozessbedingte Verunreinigung der Oberfläche.

2.1.3 Evaluierung und Applikationsentwicklung des lokalen Hochoberflächenplasmas (PACE)

Im IOM wurde vor wenigen Jahren das so genannte PACE-Verfahren zur zum lokalen Hochoberflächenätzen von Si-basierten optischen Materialien (SiO_2 , Si, Si_3N_4 , SiC u.a.) entwickelt /4, 5/. Anwendungsziel ist die Asphärisierung von Oberflächen mit großen Bearbeitungstiefen. Der Vorteil gegenüber abrasiven Bearbeitungsverfahren ist, dass es aufgrund der rein chemischen Ätzwirkung kein sub-surface damage erzeugt.

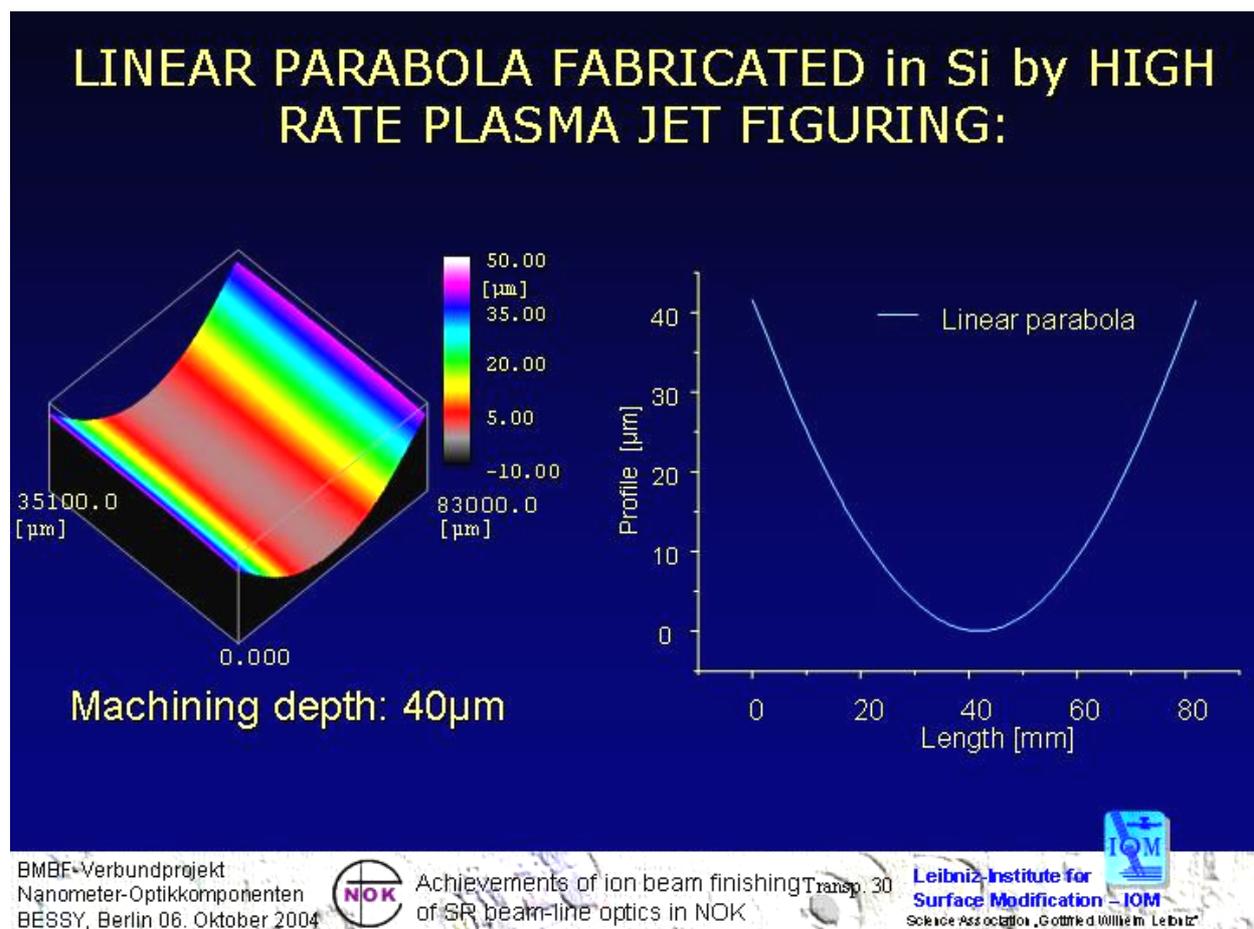


Abb. 6 Mit PACE hergestellte Linearparabel-Asphäre.

Im Rahmen dieses Projektes wurden frühere Entwicklungsarbeiten fortgesetzt. Ziel dabei war neben der Variante, möglichst sehr hohe Volumenabtragraten (bis zu ca. $20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$) zu erreichen, eine Variante geringerer Leistung und damit geringerer Abtragrate (einige $\text{mm}^3 \text{ min}^{-1}$) und Werkzeugfunktionen mit Halbwertsbreiten im Bereich von Millimetern zu entwickeln um damit an bereits mit der Hochratevariante bearbeiteten Asphärenflächen Formkorrekturen durchführen zu können. Abb. 7 zeigt das Ergebnis einer solchen Korrektur an der Fläche aus Abb. 6.

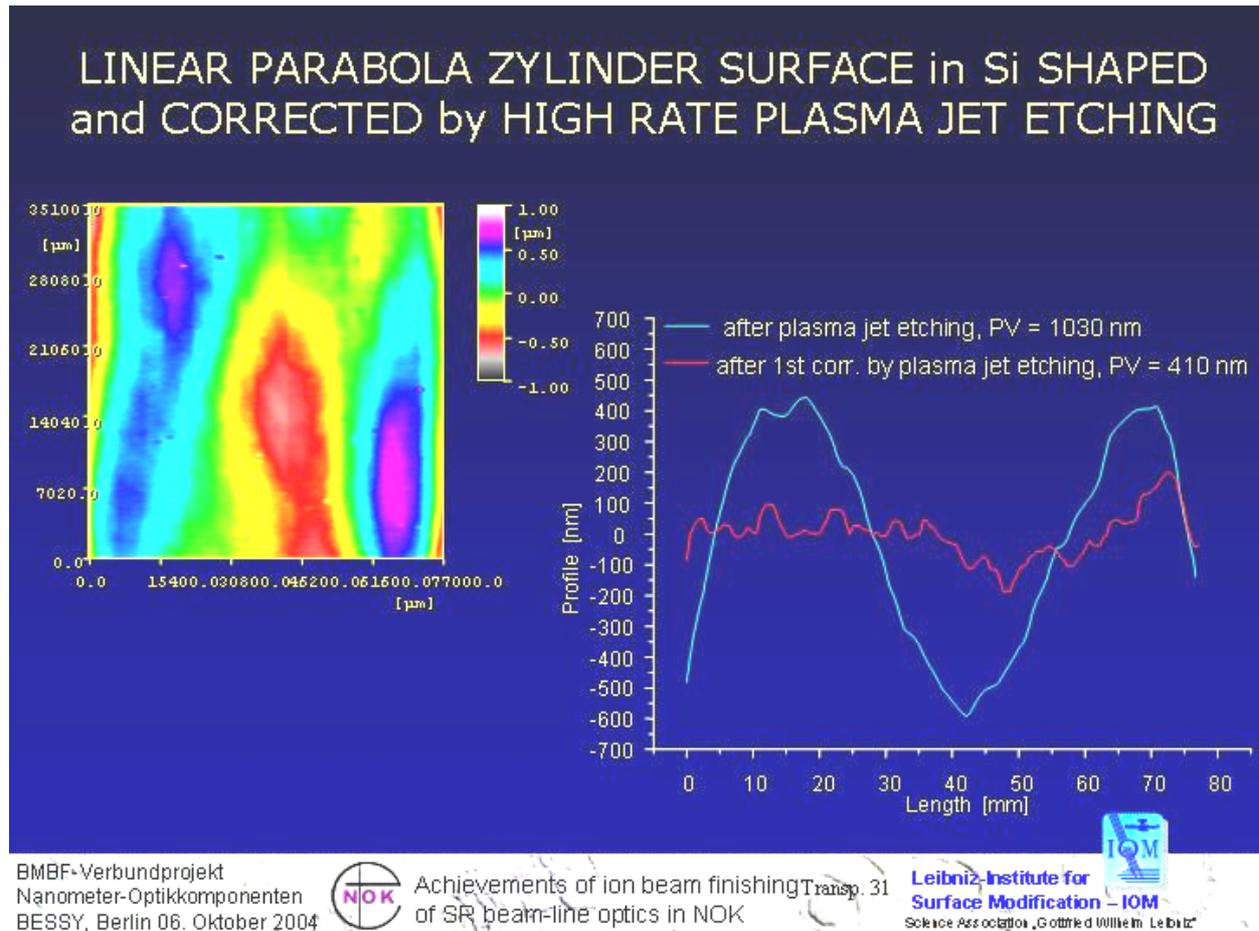


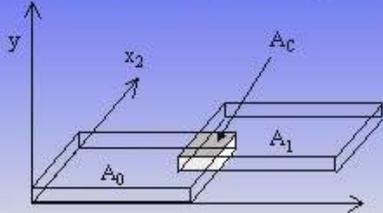
Abb. 7 Oberflächenformkorrektur mittels PACE in der Variante kleiner Plasmaleistung und kleiner Plasmajet-Halbwertsbreite.

2.1.4 Leistungssteigerung der Subapertur-Stitching-Interferometrie

Die in einer Variante im IOM entwickelte Sub-Aperture Stitching Interferometrie (SASI) wurde im Projekt weiterentwickelt [6]. Der experimentelle Aufbau der Messanordnung wurde verbessert und die Software zur Zusammensetzung der Messflächen wurde überarbeitet. Das Messverfahren wurde dann im weiteren Projektverlauf sehr intensiv zur Flächenformmessung der SR-Beam-line-Optiken und der Demonstratoren eingesetzt. Es wurden dabei viele Vergleiche mit den NOM- Messungen bei dem Verbundpartner BESSY vorgenommen. Abb. 8 zeigt Anordnungen zum Messaufbau und zum SASI-Messprinzip.

Sub-Aperture Stitching Interferometry

Basic principle



• A_0 and A_1 are two single sub-aperture measurements $y_0(i,j)$ and $y_1(i-b_1, j-b_2)$.

• Tilts a_1 , a_2 and vertical displacement a_0 of A_1 are estimated by using the measurements

$$\Delta y_1 = y_0(i,j) - y_1(i-b_1, j-b_2)$$

of the common overlap area A_0 .

• Basic equation: $\Delta y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$.

The following data are estimated by regression theory:

- Parameter a_0 , a_1 , a_2
- Standard deviation σ of the measurements
- Connected planes,
- Confidence ellipsoid of parameter,
- Confidence band

Experimental setup

- 4-axis positioning system (computer controlled)
- from AEROTECH INC.
- X/Y-linear ball screw stages:
 - Travel ranges : 750/500 mm
 - Accuracy: 1 μ m/25 mm
 - Repeatability: 1 μ m
- U/Z- Tilt: Gimbal Mount
 - Repeatability: 0,75 arcsec
- Resolution: 0,009 arcsec

Interferometer:

- DIRECT 100 (Carl Zeiss Oberkochen)
- Mode: Direct Measuring Interferometry (DMI)
- Magnification in 6 fixed steps (1:10),
- Reproducibility: < 0,0005% rms
- Accuracy: < 0,002 % rms
- Lateral resolution: 30, 50, 82, 128, 206 and 323 μ m

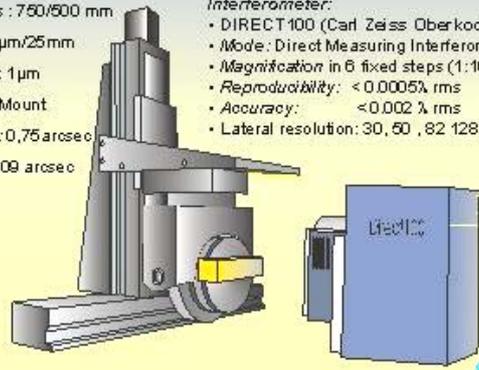
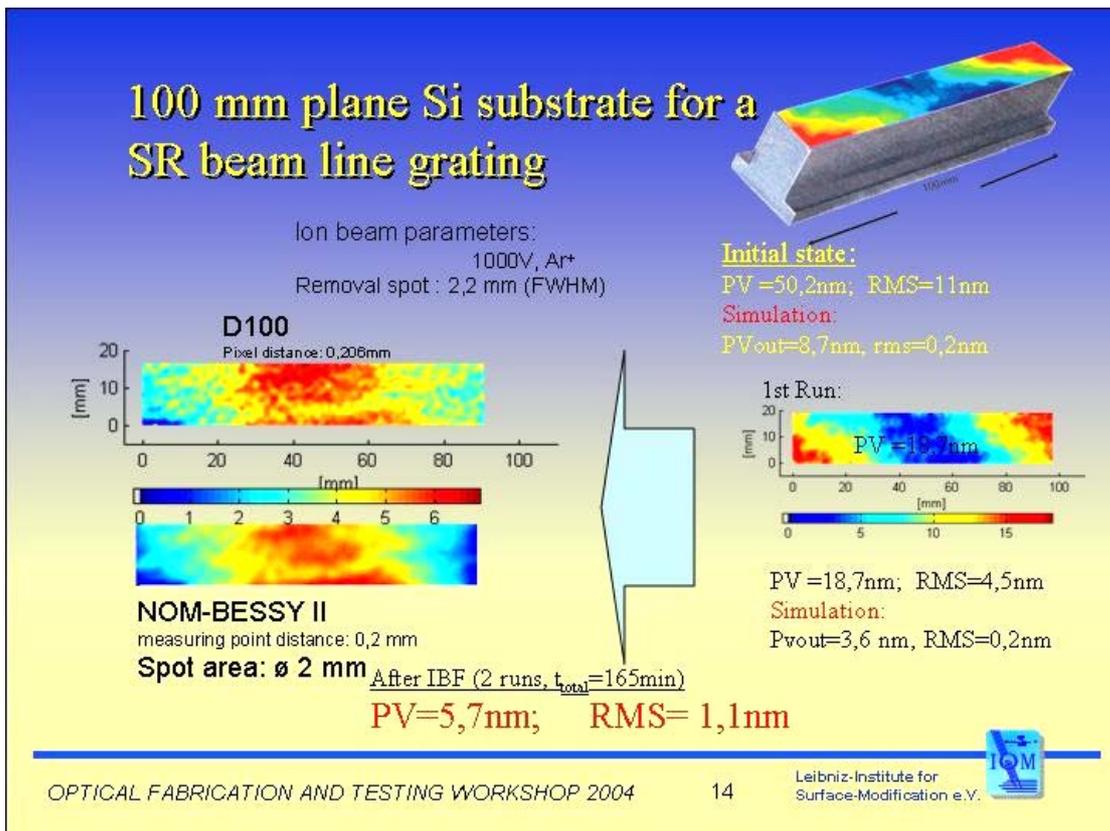


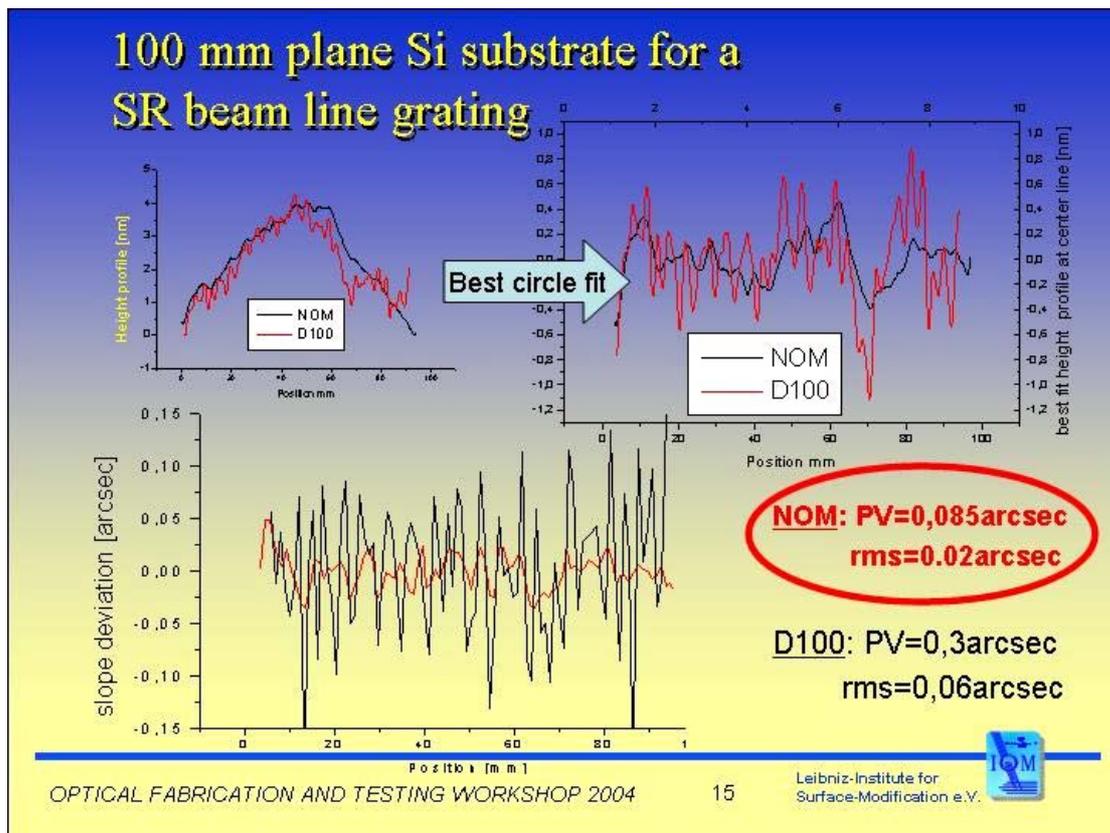
Abb. 8 Sub-Aperture Stitching Interferometry SASI

2.1.5 Demonstratoren von Synchrotron-Beam line-Optiken

Es wurden in der Endphase des Projektes drei Demonstrator-Optiken hergestellt. Die folgenden Abbildungen zeigen die dabei erreichten Ergebnisse der z. T. mehrfachen Ionenstrahlformkorrektur. Die geringen Tangentenwinkelfehler dieser SR-Optiken konnten nur mit kleinem Strahlwerkzeug von 2 mm HWB erreicht werden [7]. An diesen Demonstratoren wurden sowohl Messungen mit SASI im IOM und mit der neu entwickelten NOM bei BESSY II in Berlin gemacht. Der 210 mm lange Planellipsenspiegel wird bereits in einem Strahlrohr bei BESSY eingesetzt und übertrifft die bisherigen Leistungsdaten der Beam-line-Optiken. Die Weiterführung der Arbeiten im IOM ist vorgesehen, da die Modellierungen zeigen, dass mit noch kleinerem Strahlwerkzeug weitere Verbesserungen der optischen Oberflächen möglich sind.



a)



b)

Abb 9 a, b 100 mm langes, planes Si Substrat für ein SR beam line Gitter. Die Endbearbeitung zur Korrektur des Tangentenwinkelfehlers erfolgte mit IBF mit einem \varnothing 2.2 mm Ar-Ionenstrahl in insgesamt drei IBF Bearbeitungen mit jeweiligen Zwischenmessungen der Flächenform. Das Projektziel von 0.02 arcsec rms wurde erreicht. Der Unterschied in den Messergebnissen zwischen NOM und DIREKT100 (D100) Interferometer resultiert aus der höheren lateralen Auflösung des letzteren.

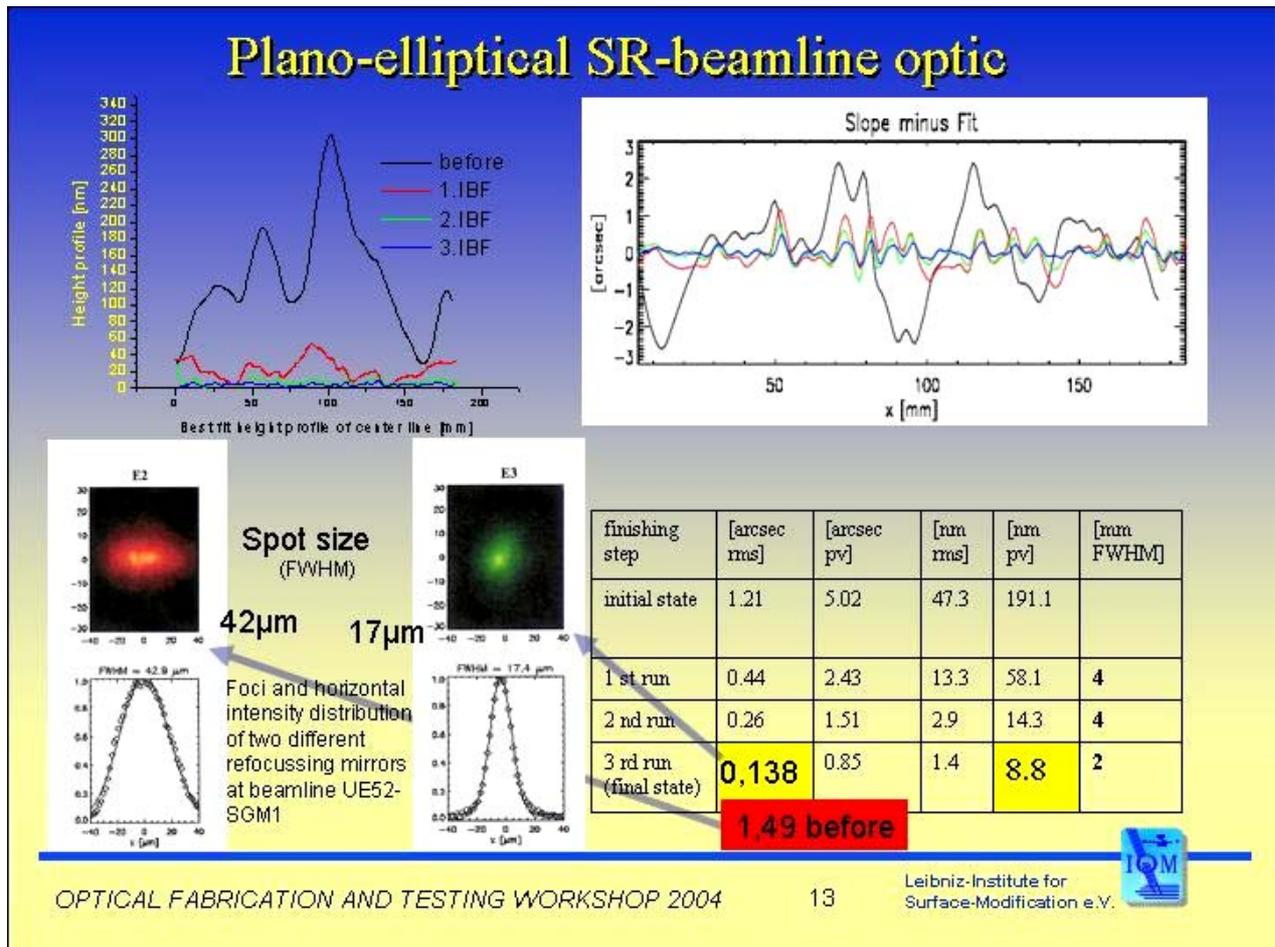


Abb. 10 IBF Formkorrektur eines 210 mm langen Planellipsenspiegels für Synchrotron-Strahlung.. Die Formkorrektur auf einen Wert von 0.138 arcsec wurde in drei aufeinander folgenden IBF-Bearbeitungen und Interferometermessungen nach jeder Bearbeitung erreicht. Die in der beam-line bei BESSY gemessenen Foki sind zusammen mit den SR-Querschnitten sowohl vor der OF-Fehlerkorrektur als auch danach dargestellt.

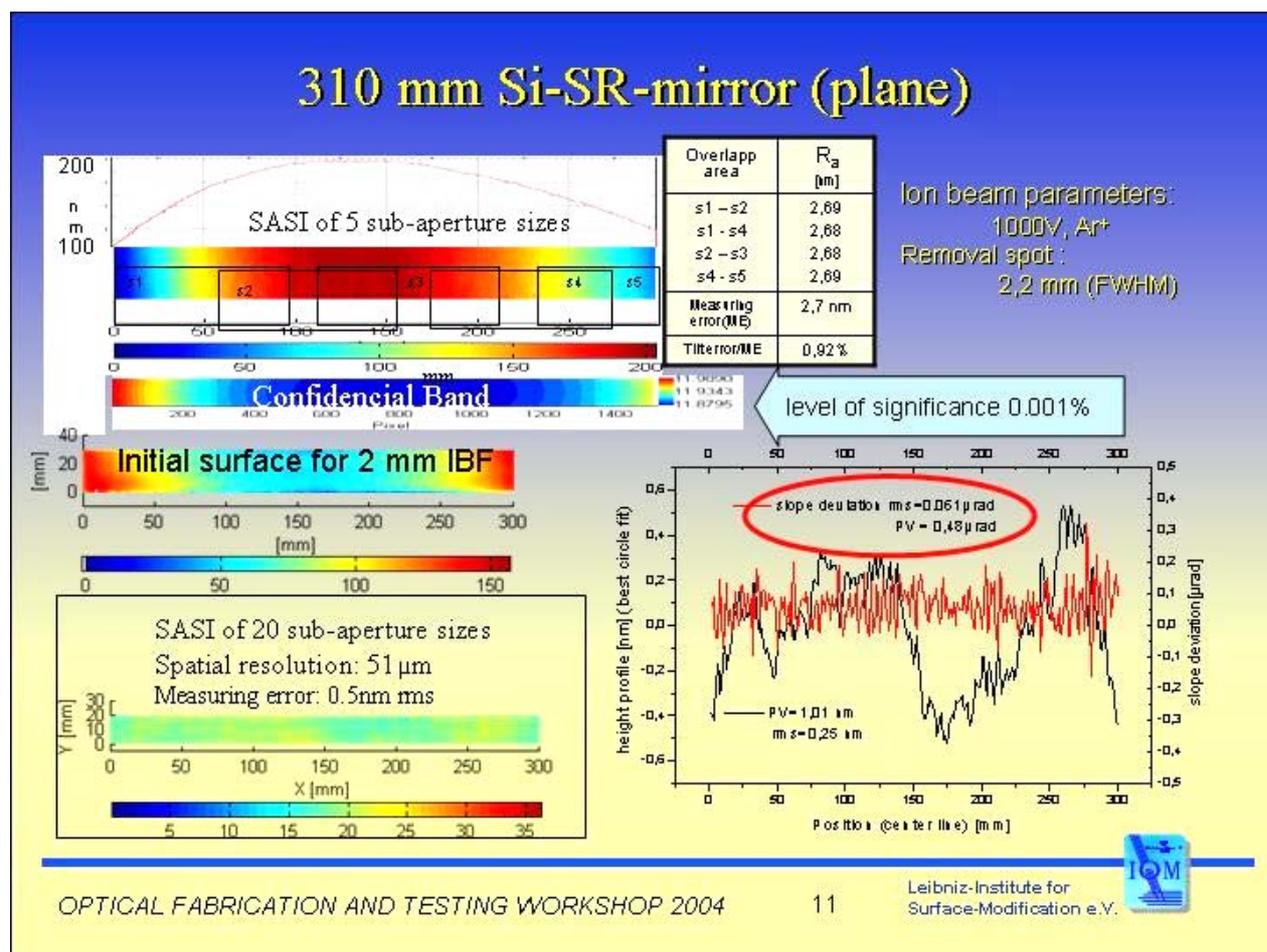


Abb. 11 310 mm lange Si Planoptik. Zur Erzielung einer für die lokale Bearbeitung mit einem Ionenstrahl von 2 mm HWB hinreichend hohen lateralen Auflösung wurde bei der Stitchingmessung mit 20 Sub-Aperture-Teilflächen gearbeitet.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Bereits durch die Nutzung der Demonstratoren in den Beam-lines von BESSY II ist ein wissenschaftlich technischer Nutzen entstanden. Alle anderen Ergebnisse von IOM sind technologisch im Bereich von Hochleistungsoptik und -mechanik verwert- und nutzbar. Die Fortschritte bei der Entwicklung von der Ionenquelle mit kleinem Strahlquerschnitt als auch die Stitching Interferometrie haben das Potential einer späteren Vermarktung.

2.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Ähnliche Bearbeitungsziele höchstgenauer Flächen in allen Ortswellenlängenbereichen an SR-Optiken werden in der Universität Osaka im Precision Engineering Lab von Prof. K. Yamauchi angestrebt und etwa zu gleicher Zeit wie in diesem Projekt wurden erste erfolgreiche Ergebnisse publiziert [8, 9]. Dort werden zwei andere Bearbeitungsverfahren entwickelt und angewandt – das Chemical vapor machining (CVM) und das elastic emission machining (EEM).

2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes wurden durch Tagungsbeiträge und Publikationen

veröffentlicht. Das sind die Positionen in der folgenden Literatur-Referenzliste /6, 7, 10, 11/.

3 Literatur

- /1/ F. Frost, R. Fechner, B. Ziberi, D. Flamm, A. Schindler, **Large area smoothing of optical surfaces by low-energy ion beams**, Thin Solid Films 459 (2004)100-105.
- /2/ F. Frost, B. Ziberi, T. Höche, B. Rauschenbach, **The shape and ordering of self-organized nanostructures by ion sputtering**, Nucl. Instrum. Meth. B 216 (2004)9-19.
- /3/ R. Fechner, A. Schindler, T. Haensel, F. Bigl, **Sub-nanometer polishing of optical surfaces by Ion beam planarization technique**, Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, eds. Y. Furukawa, Y. Mori & T. Kataoka, The Japan Society for Precision Engineering, Tokyo (Proc. of the 9th ICPE, Osaka/Japan, 29.08.-01.09.1999) (1999)249-254.
- /4/ G. Boehm, W. Frank, A. Schindler, A. Nickel, H.-J. Thomas, F. Bigl, M. Weiser, **Plasma jet chemical etching - a tool for the figuring of optical precision aspheres**, Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, eds. Y. Furukawa, Y. Mori & T. Kataoka, The Japan Society for Precision Engineering, Tokyo (1999) 231-236 (Proc. of the 9th ICPE, Osaka/Japan, 29.08.-01.09.1999) (1999)
- /5/ Axel Schindler, Georg Boehm, Thomas Haensel, Wilfried Frank, Andreas Nickel, Bernd Rauschenbach, Frieder Bigl, **Precision optical asphere fabrication by plasma jet chemical etching (PJCE) and ion beam figuring**, Proc. SPIE Vol. 4451, p. 242-248, Optical Manufacturing and Testing IV; H. Philip Stahl; Ed.,1
- /6/ Thomas Haensel, Andreas Nickel, Axel Schindler, **Stitching interferometry of aspherical surfaces**, Proc. SPIE Vol. 4449, p. 265-275, Optical Metrology Roadmap for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries II; Angela Duparre, Bhanwar Singh; Eds., Dec 2001
- /7/ Axel Schindler, Thomas Haensel, Andreas Nickel, Hans-Juergen Thomas, Heiner Lammert, Frank Siewert, **Finishing procedure for high-performance synchrotron optics**, Proc. SPIE Vol. 5180, p. 64-72, Optical Manufacturing and Testing V; H. Philip Stahl; Ed., Dec 2003
- /8/ Kazuya Yamamura, Hidekazu Mimura, Kazuto Yamauchi, Yasuhisa Sano, Akira Saito, Takehiko Kinoshita, Katsuyoshi Endo, Yuzo Mori, Alexei Souvorov, Makina Yabashi, Kenji Tamasaku, Tetsuya Ishikawa, **Aspheric Surface Fabrication in nm-level Accuracy by Numerically Controlled Plasma Chemical Vaporization Machining (CVM) and Elastic Emission Machining (EEM)**, Proc. SPIE Vol. 4782, p. 265-270, X-Ray Mirrors, Crystals, and Multilayers II; Andreas K. Freund, Albert T. Macrander, Tetsuya Ishikawa, James L. Wood; Eds., Dec 2002
- /9/ Kazuto Yamauchi, Kazuya Yamamura, Hidekazu Mimura, Yasuhisa Sano, Satoshi Matsuyama, Hirokatsu Yumoto, Kazumasa Ueno, Masafumi Shibahara, Katsuyoshi Endo, Makina Yabashi, Kenji Tamasaku, Yoshinori Nishino, Tetsuya Ishikawa, Yuzo Mori, **Fabrication technology of ultraprecise mirror optics to realize hard x-ray nanobeam**, Proc. SPIE Vol. 5533, p. 116-123, Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications II; Ali M. Khounsary, Udo Dinger, Kazuya Ota; Eds. Oct 2004
- /10/ A. Schindler, T. Hänsel, F. Frost, A. Nickel, R. Fechner, B. Rauschenbach, **Recent achievements on ion beam techniques for optic fabrication, Conference on Optical Fabrication and Testing**, Optical Society of America - OSA, Rochester, 10. - 13. 10. (2004)OMD3
- /11/ T. Hänsel, A. Nickel, A. Schindler and H.-J. Thomas, **Ion beam figuring surface finishing of x-ray and synchrotron beam line optics using stitching interferometry for the surface topology measurement**. Optical Society of America - OSA, Rochester, 10. - 13. 10. (2004)OMC5.