

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Heiner Lammert, Frank Siewert, Thomas Zeschke

## Subnanometergenaue Messungen der Formabweichungen ausgedehnter, gering gekrümmter optischer Flächen für die Finish-Bearbeitung bis zu Genauigkeiten von $< \lambda/1000$

Dr.-Ing. Heiner Lammert  
Dipl.-Ing. Frank Siewert  
Dipl.-Ing. Thomas Zeschke  
Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft  
für Synchrotronstrahlung mbH  
-BESSY-  
Albert-Einstein-Straße 15  
D 12489 Berlin-Adlershof  
Tel.: 030 6392 4658  
Fax: 030 6392 4850  
E-Mail: [Lammert@Bessy.de](mailto:Lammert@Bessy.de)  
[WWW.BESSY.de](http://WWW.BESSY.de)



## **50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium** **an der TU Ilmenau**

Beitrag zum Vortrag:

### **Subnanometergenaue Messungen der Formabweichungen ausgedehnter, gering gekrümmter optischer Flächen für die Finish-Bearbeitung bis zu Genauigkeiten von $\lambda/1000$**

**von**

**Heiner Lammert, Frank Siewert, Thomas Zeschke**

Berlin, den 31. Mai 2005

Die hier dargestellten Inhalte und Ergebnisse entstammen in wesentlichen aus dem bei BESSY abgeschlossenen Forschungsprojekt „Arbeiten zur hochgenauen Vermessung von Nanometer-Optik-Komponenten und Koordinierung des Verbundprojekts“. Es ist Teilvorhaben des von BESSY koordinierten Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten – NOK – (Kordinator: Heiner Lammert.). Die NOK-Partner sind am Schluss dieses Beitrages angeführt. Förderkennzeichen 13N7929 BMBF, Projektträger VDI. Die Förderung erfolgte im Schwerpunkt Nanotechnologie, Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung, CC-UPOB.

Konzeption

und Projektleitung: Dr. Ing. Heiner Lammert,

Wiss.-techn. Dipl.-Ing. Frank Siewert, Stellv. Projektleitung

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Zeschke

Dipl.-Ing. Thomas Schlegel

Dr.-Ing. Tino Noll

BESSY-Leitung: Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Eberhardt, Wiss. Direktor

Prof. Dr. Wolfgang Gudat, Wiss. Direktor bei Projektstart

Prof. Dr. William B. Peatman, Stellv. Wiss. Direktor

Dr. Fred Senf, Leiter Optikgruppe

Kontaktadresse: Dr.-Ing. Heiner Lammert,

BESSY – Berliner Elektronenspreicherringgesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH  
Berlin- Adlershof, Albert-Einstein-Straße 15, 12489 Berlin, Tel. 030 6392 4658;

[Lammert@Bessy.de](mailto:Lammert@Bessy.de)

[www.BESSY.de](http://www.BESSY.de)

## Vorwort

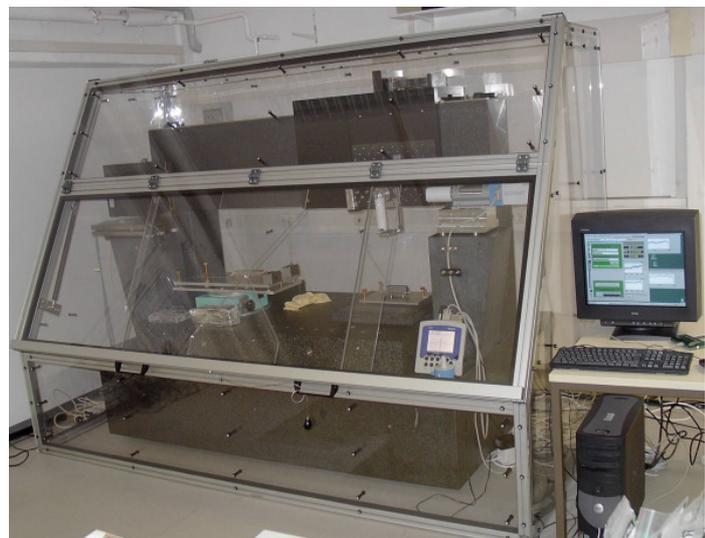
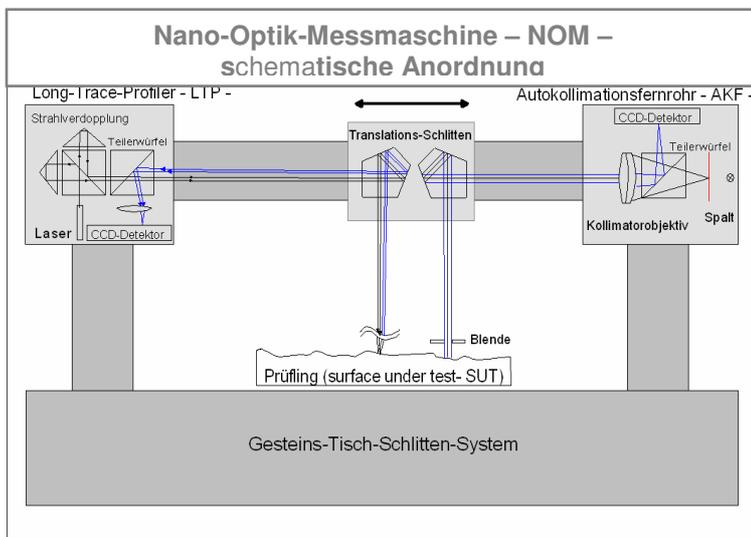
Die Voraussetzungen für die vorgestellten Arbeiten basieren auf der finanziellen Förderung durch das Forschungsministerium und auf einem ausgezeichneten Zusammenarbeiten bei der Berliner Elektronenstrahlgesellschaft mbH für Synchrotronstrahlung in Berlin und innerhalb des deutschlandweiten Forschungsverbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten. Dadurch gelang es, das Projekt erfolgreich umzusetzen, so dass aus einer Konzeption nun die Nano-Optik-Messmaschine NOM bei BESSY sowie hochgenaue optische Komponenten zur Verfügung stehen und eine Reihe weiterer Ergebnisse zu verzeichnen sind.

In dieser Präsentation sind in einem Teil 1 die wesentlichen Aussagen der Schlussberichtes zur NOM-Entwicklung [15] insbesondere bezüglich der Ergebnisse und deren Auswirkungen dargestellt.

Im Teil 2 dieser Präsentation wird auf das gesamte Verbundprojekt Nanometer-Optikkomponenten – NOK – eingegangen, das vom Verfasser koordiniert worden war. Schwerpunkt sind dabei nicht die Ergebnisse bei den einzelnen Partnern, sondern insbesondere die Ergebnisse, die in Kooperationseffekten von mehreren Partnern erstellt wurden. Diese stellen im Sinne der Aufgabenstellung für das gesamte Verbundprojekt die wesentlichen Ergebnisse dar. Sie sind vorwiegend anhand der in der Anlage befindlichen Vortragszusammenfassung für das NOK-Abschlussmeeting am 6.10.2005 in Berlin [16] erläutert.

Berlin-Adlershof, den 31.5.2005

Heiner Lammert.



**Fig. 1 und Fig. 2** Schema und Foto der Nano-Optik-Messmaschine NOM - vom Projekt zur Realisierung - als Ergebnis der Entwicklung bei BESSY im Rahmen des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten NOK

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b><u>Teil 1</u></b>	
<b>Die Nano-Optik-Messmaschine - NOM -</b>	
<b>1. Motivation und Ausgangssituation</b>	
<b>1.1 Die technologische Grenze für Präzisionskomponenten als Motivation für die Entwicklung der Nano-Optik-Messmaschine</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Ausgangssituation</b>	<b>5</b>
<b>2. Das Hybrid-Deflektometrieprinzip und der Aufbau der NOM</b>	<b>6</b>
<b>3. Ergebnisse der NOM</b>	<b>8</b>
<b>3.0 Zusammengefasste Darstellung der einzelnen Ergebnisse</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Genauigkeit der NOM</b>	<b>10</b>
<b>3.1.1 Zufällige Messabweichungen</b>	<b>10</b>
<b>3.1.2 Systematische Messabweichungen</b>	<b>11</b>
<b>3.1.3 Diskussion der mit der NOM zu erreichenden Genauigkeit</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Vergleich der NOM mit Interferometrie-Verfahren</b>	<b>13</b>
<b>3.3 3-D-Topographie mit der NOM</b>	<b>14</b>
<b>3.4 Die NOM als Messmaschine für den industriellen Einsatz</b>	<b>16</b>
<b>3.5 Die Korrelation von zwei unterschiedlichen Sensoren an einer Messmaschine</b>	<b>18</b>
<b>3.6 Autokorrektur- und Autokalibriermethoden</b>	<b>20</b>
<b>3.7 Erzielung von Messergebnissen mit der NOM, die vorher nicht möglich waren</b>	<b>22</b>
<b>3.8 Voraussetzungen für die Absenkung der technologischen Grenze</b>	<b>23</b>
<b>3.9 Neue Erkenntnisse über die Klassische Optiktechnologie</b>	<b>23</b>
<b>3.10 Asphärenmessgenauigkeit</b>	<b>25</b>
<b>3.11 Kombination mit einem Finishbearbeitungsverfahren</b>	<b>27</b>
<b>3.12 Kontrolle von Komponenten für den SR-Einsatz mit der NOM</b>	<b>27</b>
<b>3.13 Einsatz der NOM für adaptive Komponenten</b>	<b>28</b>
<b>3.14 Einsatz der NOM für hochpräzise Optikkomponenten, die nicht für die Synchrotronstrahlung eingesetzt werden sollen</b>	<b>29</b>
<b>3.15 Messungen von zeitlichen Veränderungen mit der NOM</b>	<b>31</b>
<b>3.16 Mögliche Einsatzerweiterungen der NOM</b>	<b>32</b>
<b>3.17 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>32</b>
<b>4. Nutzen</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Bereits erbrachter Nutzen</b>	<b>33</b>
<b>4.1.1 Der Nutzen für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung</b>	<b>33</b>
<b>4.1.2 Der Nutzen für die Optiktechnologie</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Zukünftiger Nutzen</b>	<b>34</b>

**5. Fortschritt bei anderen Stellen – internationaler Vergleich 35**

**Teil 2**

**Das Forschungsverbundprojekt Nanometer- Optikkomponenten – NOK**

<b>0. Einführung</b>	<b>39</b>
<b>1. Aufgabenstellung und Partner des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten</b>	<b>39</b>
<b>2. Ergebnisse des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten</b>	<b>40</b>
<b>2.1 Zielerfüllung für drei NOK-Demonstratoren</b>	<b>41</b>
<b>2.2 Fortschritte in der Messtechnik durch Deflektometrieverfahren</b>	<b>42</b>
<b>2.3 Fortschritte in der Bearbeitung optischer Komponenten</b>	<b>42</b>
<b>2.4 Neue Messmethoden gegenüber den herkömmlichen Verfahren</b>	<b>44</b>
<b>2.4.1 Vorteile der Deflektometrie</b>	<b>44</b>
<b>2.4.2 Die Vorreiterrolle der Messtechnik in der Entwicklung der Optiktechnologie</b>	<b>45</b>
<b>3. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>46</b>
<b>Danksagung</b>	<b>46</b>
<b>Referenzen</b>	<b>48</b>
<b>Anlage Auszug Vortrag NOK-Abschlussveranstaltung 6.10.2004, Folien 1 bis 20</b>	<b>50</b>

## Teil 1

### Die Nano-Optik-Messmaschine – NOM –

#### 1. Motivation und Ausgangssituation

##### 1.1 Die technologische Grenze für Präzisionskomponenten als Motivation für die Entwicklung der Nano-Optik-Messmaschine - NOM –

Das Absenken der technologischen Grenze bei der Herstellung und Kontrolle von optischen Komponenten, die für den Einsatz bei der Stahlführung und Monochromatisierung von Synchrotronstrahlung im VUV – Wellenlängenbereich ( $\lambda$  im Bereich von 10 bis 0,1 nm) war das wesentliche Ziel der Verbundprojektaktivitäten. Ein fünffacher technologischer Sprung sollte für die Einhaltung der Sollformen der optischen Flächen vollzogen werden: von 0,1 arcsec rms auf 0,02 arcsec rms bei ebenen oder sphärischen Flächen und von 0,5 arcsec rms auf 0,1 arcsec rms für asphärische Flächen. (Die entsprechenden Höhenzuzuordnung der Flächenformabweichungen können aus Tab. 1 entnommen werden.)

Finish-Technologie und Qualitätskontrolle erforderten eine Steigerung der Messtechnik auf mehr als das 10 fache: von Messgenauigkeiten im  $\lambda/100$  – Bereich (5 nm rms) zu Messgenauigkeiten im  $\lambda/2000$  – Bereich (0,3 nm rms).

Im Rahmen des Verbundprojekts NOK wurde bei BESSY die Aufgabe so gelöst, dass ein Prototyp einer Messmaschine mit zwei verschiedenen Sensoren, einem LTP (Long Trace Profiler) und mit einem Autokollimator, projektiert, konstruiert, erstellt und erprobt wurde. Es sollte damit ein Messprinzip realisiert werden, das in hybrider Anordnung und paralleler Anwendung Messdaten unterschiedlicher Antastprinzipien die damals möglichen Genauigkeiten erhöhen sollte. Die hybride Anordnung zweier Sensoren ist prinzipieller Bestandteil der so entstandenen Nano Optik Messmaschine NOM.

#### 1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Ausgangssituation

Der Stand der Technik der Präzisionsoberflächen wurde wesentlich von der vorhandenen Meßtechnik beeinflusst. Durch den hohen Entwicklungsstand der Meßtechnik bezüglich der Mikrostruktur mit Interferenzmikroskopie und Atomic Force Microscopy ist die erforderliche Mikrostruktur im Bereich  $< 0,2$  nm rms erreichbar. Die Problematik bestand im wesentlichen in der Erzielung der makrogeometrischen Genauigkeit, bei Flächengrößen also von mehreren dm<sup>2</sup>. Hochgenaue Interferometer besitzen neben dem Erfordernis einer prüflingsformnahen Referenzfläche die Grenzgenauigkeit von  $< 0,2$  arcsec rms; bei Ausdehnungen von 300 mm und mehr ist die erreichbare Genauigkeit geringer. Die damaligen und gegenwärtigen Gren-

zen für die Messgenauigkeiten dieser Verfahren befinden sich bei 0,1 arcsec rms. Das seit 1988 speziell für Synchrotronstrahlungskomponenten entwickelte Profilometrieverfahren („Long Trace Profilometer“[1];[2]) konnte gegenwärtig bei Ausdehnungen  $< 100$  mm Meßgenauigkeiten  $< 0,05$  arcsec rms erzielen[3].

Bei industriellen Herstellern wurden und werden für Synchrotronoptiken interferometrische Verfahren und Koordinatenmeßverfahren angewendet. Bei der 1999 in Betrieb gegangenen Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II wurden optische Komponenten erfolgreich eingesetzt, die mit dem LTP vermessen worden waren. Der Einsatz von diesen damals bestmöglichen Optiken führte unter anderem zu nachgewiesenen spektralen Energieauflösungen bei BESSY II, die seit dem Jahre 2000 bis heute Weltspitze sind. Die in Tabelle 1 dargestellten Werte repräsentieren sowohl die damaligen technologischen Grenzen für die Fertigungsgenauigkeit der Komponenten deutscher und auch weltweit ausländischer Hersteller als auch die damals möglichen Meßgenauigkeiten[4].

Optikkomponenten	Dimension der Optikkomponente	Tangentenwinkelabweichungen	Oberflächenformabweichungen	
			rms [nm]	p-v [nm]
Flächenform	[mm]	rms [arcsec]	rms [nm]	p-v [nm]
Plan / Sphäre	300	0,1	10	25
Asphäre	200	0,5	15	50

**Tabelle 1:** Bis zum Jahre 1999 erreichbare Fertigungs- und Messtoleranzen bei Synchrotronstrahlungsoptiken

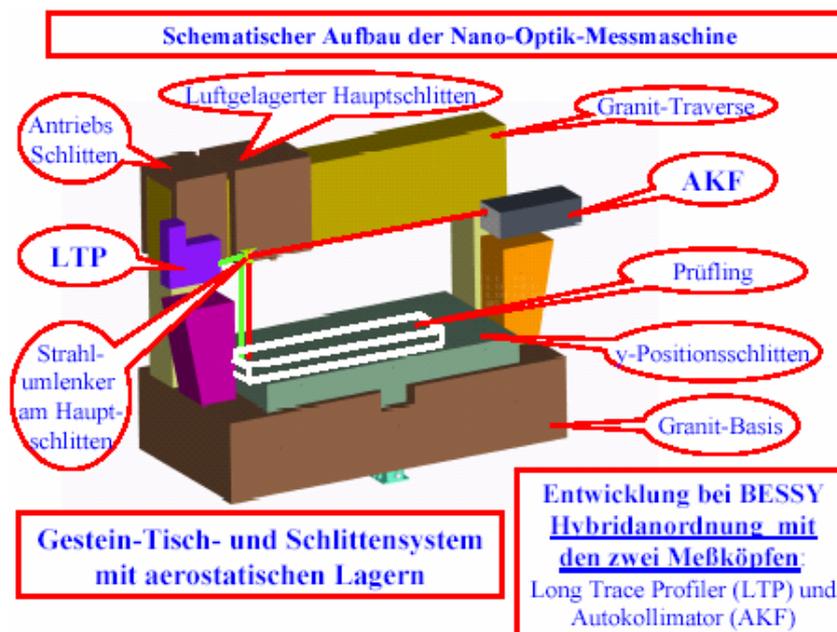
Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass nach dem wissenschaftlichen und technischen Stand der Ausgangssituation für die erforderlichen Ausdehnungen der optischen Komponenten bis 300 mm die technologische Grenze für die Tangentenwinkelabweichungen von 0,1 arcsec rms für ebene oder sphärische Komponenten beziehungsweise von 0,5 arcsec rms für asphärische Komponenten in der Regel nicht unterschritten werden konnte. Allein messtechnisch wären seinerzeit mindestens 5 fache Genauigkeiten erforderlich gewesen.

## 2 Das Hybrid-Deflektometrieprinzip und der Aufbau der NOM

Deflektometrie-Verfahren für Präzisionsmessungen wurden mit dem Long Trace Profiler zur Charakterisierung von hochgenauen optischen Komponenten für die Synchrotronstrahlung seit 1989 mit dem Long Trace Profiler (LTP) angewendet [1];[2];[3]. Die Lageabweichung des von einem Prüflingsflächenelement reflektierten Doppelstrahls von 1 bis 2 mm Durchmesser interferiert am Ort eines Detektors und stellt ein Maß für die Neigung („slope error“) dieses Prüflingselements gegenüber den Nachbarelementen dar. Dieses scannende Verfahren

wurde bisher für die Messung von Neigungsabweichungen entlang einer Linie angewendet. Das LTP-Prinzip ermöglicht Aussagen über eine in Messrichtung liegende Neigungskomponente durch Messung von Neigungsabweichungen des Prüflings. Neigungsabweichungen auch in der dazu orthogonalen Richtung also in zwei Richtungen ermöglicht die Anwendung eines Autokollimationsfernrohrs [5].

Das im Rahmen dieses Projektes mit der NOM neu angewendete Hybrid-Prinzip beruht auf der Anordnung sowohl eines LTP-Sensors als auch eines AKF-Sensors auf ein und der selben Messmaschine [6]; [7].



**Fig. 3:** Schematischer Aufbau der NOM mit den Hauptkomponenten LTP, AKF, GTSS (Gestein- Tisch- und Schlittensystem)

Die in Fig. 3 gezeigte schematische Darstellung der NOM läßt die grundsätzliche Anordnung der wesentlichen Komponenten erkennen. Die Sensoren LTP und AKF sind ortsfest angeordnet. Der Hauptschlitten stellt das einzige bewegte Element während des Messprozesses dar, um den Prüfling in Längsrichtung abzutasten. Dabei werden Winkelabweichungen der aus den Sensoren austretenden und am Prüfling reflektierten Messstrahlen in beiden Sensoren detektiert. Der Messbereich beträgt 1200 mm (Hauptschlitten x 300 mm (y-Schlitten) x 2000 arcsec (Sensoren). Der Hauptschlitten ist als luftgelagerter Präzisionsschlitten mit einer elastischen Kupplung vom Antriebsschlitten getrennt, so dass nur Bewegungskräfte in Antriebsrichtung übertragen werden, jedoch keine weiteren Kräfte und Momente vom An-

triebsschlitten übertragen werden. Außerdem ist der Führungsbalken sehr biegesteif gestaltet. Somit sind die restlichen systematischen Kippbewegungen des Hauptschlittens, die von der Hauptrichtung abweichen,  $< 1$  arcsec. Die zufälligen Abweichungen des Hauptschlittens sind nachgewiesen als  $< 0,006$  arcsec. Durch die Strahlverkipfungsinvarianz des Strahlumlenkers auf dem Hauptschlitten wegen seiner konstruktiven Ausbildung als Doppelspiegel werden Winkelabweichungen 1. Ordnung infolge Schlittenverkipfung vermieden; die restlichen Abweichungen höherer Ordnung sind  $< 1\%$ . Somit ist der Haupteinfluß der Bewegung auf die wesentliche Messgröße  $< 0,0001$  arcsec rms und beträgt damit weniger als 10 % der angestrebten höchsten Messgenauigkeit. Eine Reihe weiterer Maßnahmen zur Genauigkeitseinhaltung sind konzeptionell berücksichtigt. Dazu gehören beispielsweise die Ausführung des Tisch- und Schlittensystems aus massivem Gestein, wobei dessen schwingungsdämpfende Eigenschaften ebenso ausgenutzt werden, wie seine die Temperaturleitfähigkeit, -kapazität und -ausdehnung betreffenden Materialkonstanten genauigkeitsoptimierend bei der Konstruktion berücksichtigt wurden. Die gesamten systemeigenen Wärmequellen wurden streng limitiert, der gesamte Messraum einschließlich des GTSS temperaturisoliert gegenüber den sehr geringen Schwankungen des äußeren klimatisierten Laborraums. Während der Messprozesse werden zeitliche Temperaturgradienten von  $< 0,1$  mK/min eingehalten und durch ständiges Monitoring überwacht.

Die wesentlichen technischen Kenngrößen sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Die wichtigsten technischen Parameter der NOM		
Messfeld	1200 mm x 600 mm	
Schlittenführungs- genauigkeiten	reproduzierbar $< 0,006 \dots 0,0010$ arcsec	
zufällige Messabweichungen	Je nach Messaufgabe bis zu $< 0,005 \%$ . $< 0,05$ nm rms /100 mm nachgewiesen	
Systematische Messabweichungen	je nach Messaufgabe bis zu $< 0,04 \%$ . $< 0,2$ nm rms /100 mm nachgewiesen	
	LTP	AKF
Winkelmessbereich	$\pm 1360$ arcsec	$\pm 1000$ arcsec
Gegenwärtig messbarer Krümmungsradius	1 m	10 m
Laterale Ortsauflösung	1 mm	2 mm
Reflexionsgrad	4 ... 100 %	4 ... 100 %

**Tabelle 2** Die wesentlichen technischen Parameter der Nano-Optik-Messmaschine NOM.

Außer einer hohen Messgenauigkeit sind mit verschiedenen Mess- und Auswertemethoden mit der NOM auch 3D-Topographie, also über die gesamte Fläche ausgedehnte Höhenprofile erstellbar.

### 3 Ergebnisse mit der NOM

Die Ergebnisse des Projektes bei BESSY, das Arbeiten zur hochgenauen Vermessung von Nanometer-Optikkomponenten als Aufgabe enthielt, konzentrieren sich auf die Errichtung der Nano-Optik-Messmaschine - NOM - im Optik-Messlabor bei BESSY und deren Anwendung.

Im Zuge der Errichtung und Anwendung der NOM wurde eine Konzeption realisiert, die einerseits auf den Erfahrungen und Kenntnissen bei BESSY über die Anwendung deflektometrischer Messverfahren für die Charakterisierung hochpräziser optischer Komponenten für die Synchrotronstrahlung (Nanometer-Optikkomponenten) beruhte und die andererseits eine Reihe von bekannten und neuartigen messtechnischen Grundsätzen des wissenschaftlichen Gerätebaus berücksichtigte.

### 3.0 Zusammengefasste Vorstellung der einzelnen Ergebnisse

Das wesentliche Ergebnis besteht in dem Nachweis, dass Deflektometrie-Verfahren geeignet sind, hochgenaue optische Komponenten mit Ausdehnungen bis zu  $1 \text{ m}^2$  zu charakterisieren und zwar ausschließlich mit dem Direktbezug auf die messtechnischen Grundgrößen für Weg und Winkel ohne erforderlichen Bezug zu Referenzflächen.

Dieses Hauptergebnis resultiert aus folgenden Einzelergebnissen, wie sie mit der NOM nachgewiesen wurden:

1. Steigerung der Genauigkeit gegenüber den herkömmlichen Deflektometrie-Verfahren (LTP) um mehr als das Zehnfache.
2. Genauigkeit im Vergleich mit den genauesten Interferometrie-Verfahren im selben Bereich ( $< 1 \text{ nm rms}$ ) oder genauer, jedoch unter Vermeidung der Nachteile der Interferometrie-Verfahren, die grundsätzlich von der Genauigkeit einer Referenzfläche abhängen.
3. 3 D – Topographie im Subnanometer-Genauigkeitsbereich im Gegensatz zu den herkömmlichen Deflektometriemessvorrichtungen (LTP), die prinzipiell für Linienprofilometrie ausgelegt sind.
4. Aufbau der NOM bis zu dem technischen Reifegrad einer für den industriellen Einsatz geeigneten Messmaschine.
5. Ein neues Prinzip der Korrelation von zwei Sensoren unterschiedlicher Messprinzipien für die selbe Messgröße an der selben Messmaschine wurde erfolgreich erprobt.
6. Eine Reihe von Autokontroll- Autokorrektur- Autokalibrier- Methoden wurde erfolgreich angewendet.
7. Erzielung von Messergebnissen mit der NOM, die bis dato nicht möglich waren. Damit kann der Grundsatz, dass man 3- bis 10 mal genauer messen sollte, als die Fertigungstoleranzen vorgeben, besser als bisher befolgt werden.
8. Die Voraussetzungen für die Absenkung der technologischen Grenze um das Fünffache für die Fertigung von optischen Komponenten zum Einsatz mit Synchrotronstrahlung sind nachgewiesenermaßen gegeben.
9. Neue Erkenntnisse über Erreichbarkeit von Komponentengenauigkeiten, die ausschließlich mit klassischer Optiktechnologie gefertigt werden.
10. Die Asphärenmessgenauigkeit ist von der selben Größenordnung wie die Messgenauigkeit von sphärischen Flächen.
11. Die Kombination NOM mit Endbearbeitungsverfahren (zum Beispiel mit Ionenstrahlen – IBF) ermöglicht Komponentengenauigkeiten im Subnanometerbereich.
12. Die NOM wurde bereits vielfach angewendet für die Kontrolle von unterschiedlichen optischen Komponenten zum Einsatz mit Synchrotronstrahlung.
13. Die NOM wurde eingesetzt zur Messung an adaptiven Komponenten und deren Formoptimierung.

14. Die NOM wurde eingesetzt zur Kontrolle von Referenznormalen für Präzisionsinterferometer, zur Vermessung eines sphärischen Probeglasses aus der Optikproduktion und für ein AKF-Kalibriernormal.
15. Feststellungen von Zerodur-Langzeitformveränderungen mit der NOM.
16. Neue Einsatzgebiete der NOM können sich erschließen für Messungen an optischen Schichten, für Homogenitätsmessungen von optischem Glas, für Formveränderungen von optischen Flächen infolge von elastischen Verformungen durch Halterungssysteme und deren Kombinationen, von optischen Gittern in Littrowanordnung, zum Beispiel auch von VLS-Gittern, immer mit höheren Genauigkeiten, als bisher möglich.

Die hier angeführten Ergebnisse 1 bis 15 wurden im einzelnen nachgewiesen und werden im folgenden in dieser Reihenfolge zusammengefaßt zum Nachweis der allgemeinen Aussagen dargestellt.

### 3.1 Genauigkeit der NOM

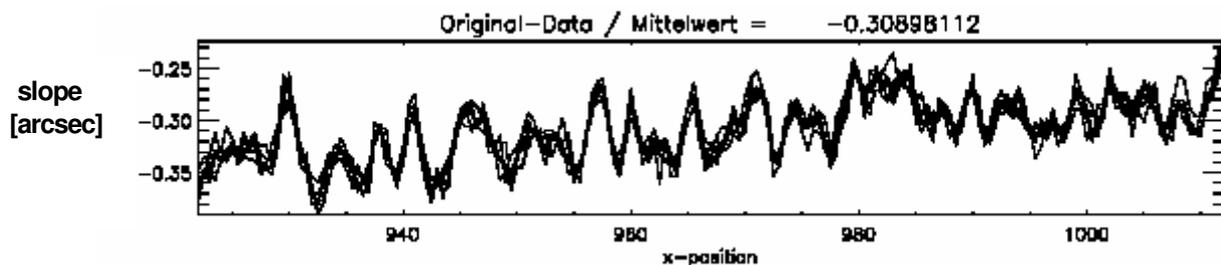
#### 3.1.1 Zufällige Messabweichungen

Ein entscheidendes Kriterium für die erreichte hohe Genauigkeit der NOM besteht in der deutlichen Minimierung der zufälligen Abweichungen. Diese wiederum sind im wesentlichen verursacht durch das Rauschen, durch Prüflingsdrifterscheinungen höherer Ordnung und durch Schlittenkippen während der Messbewegung. Bei Einhaltung normaler Bedienungsvorschriften und bei normalen Umweltbedingungen sind folgende Werte nachgewiesen:

1. Rauschen als Summe von mechanischen Vibrationen, elektronischen Schwankungen der Sensoren und Schwankungen des Luftbrechungsindex im Messstrahl während der Antastung einer Linie:  $< 0,01$  arcsec rms.
2. Schlittenwinkelabweichungen während der Messbewegung: in Messrichtung (yaw)  $0,008$  arcsec rms und wegen der Messstrahlumlenkinvarianz  $< 0,0001$  arcsec rms; rechtwinklig zur Messrichtung (roll)  $0,008$  arcsec rms mit Einfluss auf das Messergebnis  $< 0,01$  arcsec rms.
3. Drifterscheinungen höherer Ordnung bei  $0,350$  arcsec/h lineare Drift: Einfluss auf das Messergebnis:  $< 0,0001$  arcsec rms, entsprechend einer Höhendifferenz von  $< 0,05$  nm p-v auf  $100$  mm Messlänge. Die Driftauswirkungen erster Ordnung werden durch entsprechenden Messstrategien a priori kompensiert.

Als mittlerer Wert dieser wesentlichen Quellen für die zufälligen Abweichungen ergeben sich die zufälligen Abweichungen zu  $< | +/- 0,006 |$  arcsec. Dieser Wert stellt einen mittleren Richtwert dar und ist selbstverständlich auch abhängig von den Prüflingsparametern und von den jeweiligen Umweltbedingungen. Mit diesem Wert kann in vielen Fällen gerechnet werden, er läßt sich jedoch bei sehr günstigen Umweltbedingungen (nachts bei minimalen äußeren Vibrationen und bei hoher Temperaturkonstanz) sowie bei erhöhtem Messaufwand verringern. Mit den nachgewiesenen zufälligen Abweichungen läßt die NOM hochpräzise Messergebnisse erwarten.

In dem folgenden Beispiel (Fig. 4) sind die Rohdaten einer 6 mal gescannten Linie in einem Bereich von 100 mm dargestellt [8]. Die Reproduzierbarkeit dieser Messung beträgt 0,007 arcsec rms, entsprechend einer Höhenabweichung von 0,08 nm rms über 100 mm Messlänge. In diesen Messwerten sind bereits sämtliche die zufälligen Abweichungen beeinflussenden Ursachen enthalten. Sie sind ein Nachweis dafür, dass mit den oben genannten Werten für die Zusammenfassung aller möglichen zufälligen Messabweichungen eine Reproduzierbarkeit vom selben Wert möglich ist, obgleich die Durchführung dieser Messung weniger als eine Stunde in Anspruch genommen hat.



**Fig. 4** Rohdaten einer 6 mal gescannten Linie im gemessenen Bereich von 100 mm: Ergebnis 0,14 arcsec p-v. Die Reproduzierbarkeit beträgt 0,007 arcsec rms entsprechend Höhenabweichungen von 0,08 nm rms.

### 3.1.2 Systematische Messabweichungen

Die systematischen Abweichungen sind in dem Genauigkeitsrahmen der zufälligen Abweichungen weitgehend bestimmbar und darüber hinaus nach möglichen Ursachen abschätzbar. Im Zuge der NOM-Entwicklung wurden mit einer Reihe von verschiedenen Untersuchungen systematische Abweichungen der jeweiligen Messergebnisse bestimmt. Dazu wurden Methoden der Autokontrolle, der Autokalibrierung, des NOM-internen Sensor-Vergleiches LTP-AKF sowie Vergleiche mit anderen Messverfahren verschiedener anderer Messlabors im Rahmen des NOK-Verbundprojekts angewendet. Im Rahmen der zufälligen Abweichungen ( $< 0,01$  arcsec rms) ergaben sich sehr gute Übereinstimmen bei den Vergleichen, so dass im Ergebnis der Ermittlung die systematischen Abweichungen für die jeweils angewendeten Fälle von der selben Größenordnung wie die zufälligen waren.

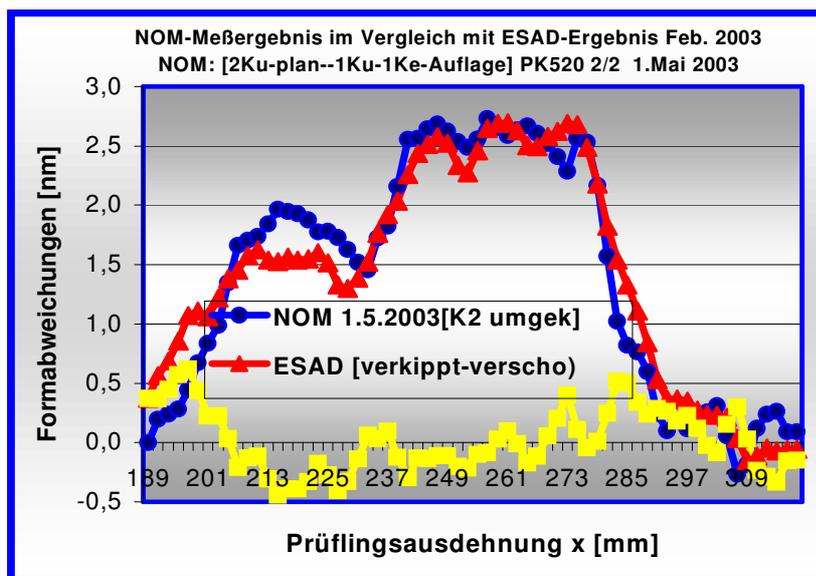
Dabei traten zwei unterschiedliche Probleme auf:

1. Die Ermittlung der systematischen Abweichungen hängt im wesentlichen von den zu messenden Prüflingsflächen ab, insbesondere von ihrer Größe und von ihrer Krümmung.
2. Weil die Genauigkeitserwartungen und -ergebnisse der NOM sich an den Grenzen der Messgenauigkeiten herkömmlicher Messverfahren bewegen, ist es in vielen Fällen schwer möglich, bei Vergleichen die Ursachen für festgestellte Abweichungen zu diskutieren. Es ist gegenwärtig keine Messvorrichtung bekannt, die garantiert genauer ist als die NOM. Das von der PTB auch im Rahmen des NOK-Verbundprojekts angestrebte Ebenheitsnormal läßt im gegenwärtigen Zustand einen sehr guten Vergleich für Linienmessungen zu. Für ebene Flächen in 3-D-Ausdehnung, für sphärische Flächen mit unterschiedlichen Kugelradien oder gar für die unendliche Vielfalt von asphärischen Flächen stehen keine Messvorrichtungen zu Vergleichszwecken in diesen Genauigkeitsbereichen zur Verfügung. Es ist jedoch gerade eine Stärke der NOM, dass sich unter Anwendung der

unterschiedlichen angewendeten internen Vergleichsstrategien die systematischen Messabweichungen nachgewiesenermaßen in sehr geringen Grenzen halten.

Aus diesen Gründen sind die systematischen Abweichungen weitgehend auf die unterschiedlichen Anwendungsfälle und auf die externen Vergleichsmöglichkeiten beschränkt nachweisbar. Sie sind jedoch für alle Anwendungsfälle des breiten NOM-Einsatzspektrums gut abschätzbar. Für diese Abschätzung waren die NOM-internen Vergleiche ( AKF-LTP, Autokalibrierung, Autokontrolle) von entscheidender Bedeutung.

Als Beispiel für einen externen Vergleich sind zwei unterschiedliche Messergebnisse an einem identischen ebenen Prüfling von (500 x 110) mm<sup>2</sup> (NOK-Prüfkörper aus Zerodur, unverspiegelt, Hersteller Berliner Glas KG) über einer Messstrecke von 130 mm bei einem Messfleckdurchmesser von 5 mm verglichen. Die eine Messung wurde zu Jahresbeginn 2003 mit der Laboranordnung zur Präzisionsmessung von optischen ebenen Flächen nach dem ESAD-Verfahren (Extended Shear Angle Difference) bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig durchgeführt. Die andere Messung wurde 2 Monate später bei BESSY auf der NOM vorgenommen. In dem Diagramm Fig. 5 sind die beiden Messergebnisse übereinandergelegt, und die Differenz wurde dargestellt. Der Verlauf der Differenzkurve hat eine Abweichung von  $< 0,3$  nm rms. Aus dieser Übereinstimmung kann mit einer hohen Sicherheit geschlossen werden, dass die Messunsicherheiten beider Ergebnisse kleiner als 0,3 nm ist und dass die systematischen Abweichungen der NOM auch in diesem Rahmen  $< 0,3$  nm rms sein muss. Die festgestellten Reproduzierbarkeiten betragen bei der PTB 0,16 nm und bei BESSY 0,14 nm (0,0067 arcsec rms). Der halbe Anteil der Unterschiede beider Messungen wäre also bereits durch die beiden zufälligen Abweichungen erklärbar. Wenn man annimmt, dass die systematischen Abweichungen von beiden Messungen annähernd gleich sind, ergeben sich systematische Anteile von je 0,15 nm rms:  $U = \sqrt{(0,16^2 + 0,14^2 + 0,15^2 + 0,15^2)} \approx 0,3$  nm rms.



**Fig. 5** Vergleich der Messergebnisse nach dem ESAD-Verfahren bei der PTB in Braunschweig und auf der NOM bei BESSY in Berlin-Adlershof mit einer Differenz beider Ergebnisse von  $< 0,3$  nm rms

Messungen anderer Prüflinge auf der NOM bestätigen dieses Ergebnis der systematischen Abweichungen, wenn verschiedene Methoden der Autokontrolle beziehungsweise der Autokalibrierung angewendet werden. Vergleiche mit interferometrischen Verfahren wurden ebenfalls durchgeführt, können jedoch zur Beurteilung systematischer Abweichungen im Genauigkeitsbereich um 0,2 nm rms nicht herangezogen werden, weil die Referenzflächen auch sehr genauer Interferometer nicht bis in diesen Genauigkeitsbereich von  $\lambda/3000$  hineinreichen.

### 3.1.3 Diskussion der mit der NOM zu erreichenden Messgenauigkeiten

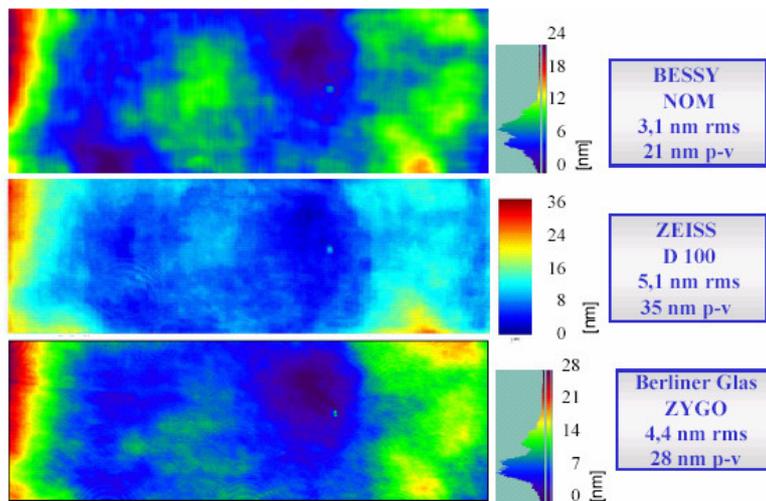
In dem Beispiel des Vergleichs mit der PTB konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die zufälligen als auch die systematischen Anteile der Messabweichungen jeweils bis 0,15 nm rms klein sein können. Das bedeutet, dass eine Messunsicherheit  $U = 0,2$  nm rms mit der NOM nachgewiesenermaßen erreichbar ist. Wenn solche hohen Genauigkeiten erzielt werden sollen, ist nicht nur geringfügig erhöhter Messaufwand erforderlich, sondern die Prüflingsbedingungen bestimmen auch wesentlich die erzielbaren Messunsicherheiten mit. Außer den Abmessungen und der Krümmung ist von entscheidender Bedeutung, dass der Prüfling bereits eine entsprechende Qualität bezüglich seiner Formeinhaltung und bezüglich seiner Mikrostruktur aufweist. Es würde in der Regel keinen Sinn machen, Prüflingsformabweichungen von ca. 10 arcsec rms ( ca.  $1 \lambda$  ) mit einer Genauigkeit von 0,01 arcsec rms (  $< \lambda/1000$  ) zu messen. Anders verhält es sich bei regelmäßig gekrümmten sphärischen oder asphärischen Flächen. Für Ihre genaue Messung sind entsprechende Autokalibriermethoden beziehungsweise Autokontrollmethoden anzuwenden. Diese wurden bei BESSY auf verschiedene Weise mit der NOM erprobt und haben sich bewährt. Für exakte Radienbestimmungen ist eine Winkelkalibrierung erforderlich, die wiederum jenseits der Nachweisbarkeitsgenauigkeiten von Interferometern liegt. Daher wird bei BESSY daran gearbeitet, ein referenzflächenunabhängiges Winkelkalibrierverfahren zu entwickeln. Der gegenwärtige Kalibrierzustand erlaubt bereits sehr hohe Genauigkeiten mit Radiengenauigkeiten für Planflächen von  $dR > 10.000$  km, also wesentlich genauer als das gegenwärtige Erfordernis für Synchrotronoptikkomponenten.

Zusammenfassend sei festgestellt, dass durch die mit der NOM nachgewiesenen Messgenauigkeiten von 0,01 arcsec rms beziehungsweise 0,2 nm rms die bisherigen Deflektometrie-Verfahren um das ca. Zehnfache übertroffen werden können.

## 3.2 Vergleich der NOM mit Interferometrie-Verfahren

Die in Abschnitt 3.1 gezeigte Genauigkeit der NOM von bis zu 0,2 nm rms (  $\lambda/3000$  ) ist auch mit Interferometrie-Verfahren kaum zu erreichen. Dem Vorteil der Deflektometrie, nämlich der Unabhängigkeit von speziellen Referenzflächen, insbesondere bei asphärischen Prüflingen, steht hier zunächst der Nachteil gegenüber, dass die herkömmlichen Deflektometrie-Verfahren vorwiegend Linienscans, also eindimensionale Abweichung von der Sollform, vorsehen. Weiterhin erfordert punktweises Prüflingabrastern erhöhten Messzeitaufwand gegenüber Interferometrie-Verfahren. Wie bei der NOM-Entwicklung diesen beiden deflektometrietypischen Merkmalen begegnet wurde, wird in den nachfolgenden Abschnitte 3.3. und 3.4 erläutert.

Im Rahmen von gemeinsamen Messungen an identischen Prüfkörpern wurden außer den oben angeführten Linienmessvergleichen zwischen NOM und PTB-ESAD auch zwischen verschiedenen Interferometern Direct 100, und verschiedenen ZYGO-Interferometern und der NOM bei BESSY Vergleichsmessungen vorgenommen. Die Darstellung in Fig. 6 zeigt die Ergebnisse einer ca. 30.000 mm<sup>2</sup> großen Planfläche auf einem sogenannten NOK-Prüfkörper. Die Übereinstimmung der drei Flächenmessungen im Rahmen von 2 nm rms ( $\lambda/300$ ) entspricht dem gegenwärtigen Entwicklungsstand bezüglich der Genauigkeiten der Interferometriemethoden, ca. dem 10 fachen der NOM-Messunsicherheit.



**Fig. 6** Vergleich von drei Messungen an einem Prüfling NOK-PK8-310, Zerodur, Fläche 300 cm<sup>2</sup>, ungefittet in drei verschiedenen Messlaboren

Wesentlich für den Vergleich der NOM mit Interferometrie-Verfahren bleibt der Vorteil der Referenzflächenunabhängigkeit, der besonders dadurch zum Tragen kommt, dass eine unendliche Vielfalt von asphärischen auch nicht-rotationssymmetrischen Flächenformen mit vergleichbarem Aufwand und mit der selben Genauigkeit gemessen werden kann wie sphärische Prüflinge oder wie solche, die nur geringfügig davon abweichen. Dieser Umstand ist besonders von wesentlicher Bedeutung, wenn (bei vergleichbarer Genauigkeit von  $\lambda/1000$ ) der Kostenanteil für ein spezielles Interferometer für nur einen EUV-Lithographie Komponententyp die fünffachen Kosten von denen einer NOM erfordert. Allerdings kann heute nicht der erforderliche Messbedarf zur Vermessung stärker gekrümmter Prüflinge mit der Deflektometrie abgedeckt werden. Eine zukünftige Weiterentwicklung des Deflektometrieprinzips auf der Basis der vorhandenen NOM-Entwicklung würde auch den Messtechnikbedarf an EUVL-Komponenten mit überdecken können. Zumindest wäre damit eine unabhängige Messung für die Herstellung von unterschiedlichen asphärischen Referenznormalen möglich. Diese Tatsache hat eine wesentliche Bedeutung für die Optiktechnologie, die weit über den Bedarf an Optikkomponenten für den Synchrotronstrahlungseinsatz hinausgeht. Aber auch für den zukünftigen Einsatz in neuen Synchrotronstrahlrohren werden Komponenten mit stärkeren Krümmungen als bisher erforderlich. Deren Messung kann gegenwärtig und wohl auch in absehbarer Zukunft kaum mit Interferometriemethoden abgedeckt werden.

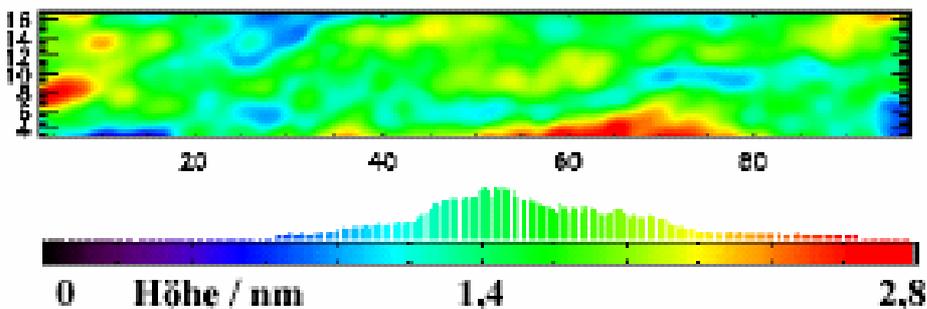
### 3.3 3-D-Topographie mit der NOM

Ein wesentliches Ergebnis der NOM-Entwicklung besteht darin, dass mit Abschluss dieser Entwicklung routinemäßig sowohl 3-D-Profile bestimmt werden können, die darüber hinaus auch von mit Linienprofilometrie vergleichbaren Genauigkeiten gekennzeichnet sind. Damit

liegen zwei Ergebnisse der Entwicklung vor, die für das Teilprojekt bei BESSY nicht als Aufgabe definiert waren. Diese Ergebnisse waren dadurch möglich, dass mit der Konzeption des Gestein- Tisch- und Schlittensystems GTSS hochgenaue Positionierbewegungen angestrebt und ermöglicht wurden, die mit einer zugeschnittenen Messstrategie und der Entwicklung zugehöriger Software verknüpft wurden. Es wurden zwei unterschiedliche Messstrategien für die 3-D-Topographie entwickelt:

1. Eine Vierschrittstrategie, die den Prüfling in zwei orthogonalen Richtungen mit Parallelspuren in vergleichbarem Spur-Längen-Anzahl-Verhältnis abscannt, die einzelnen Spuren jeweils durch Verkippen und Verschieben in den Abweichungen zu der resultierenden Fläche minimiert, diese Fläche weiterhin mit einer Diagonale durch „Verwindung“ weiterhin minimiert und mit einer zweiten Diagonale kontrolliert. Die Diagonalenvergleiche erfolgen dabei jeweils zwischen der direkt gemessenen und der aus dem Flächenmessergebnis gewonnenen Diagonale.
2. Eine Einschnittstrategie, die bei Messung von parallelen Längsspuren beide orthogonalen Komponenten der Winkelabweichungen des Prüflings im AKF auswertet und daraus die Flächendarstellung generiert, wobei die Rollbewegungen des Messschlittens und die Pitchbewegungen des Positionierschlittens durch Referenzkurven zu kompensieren sind.

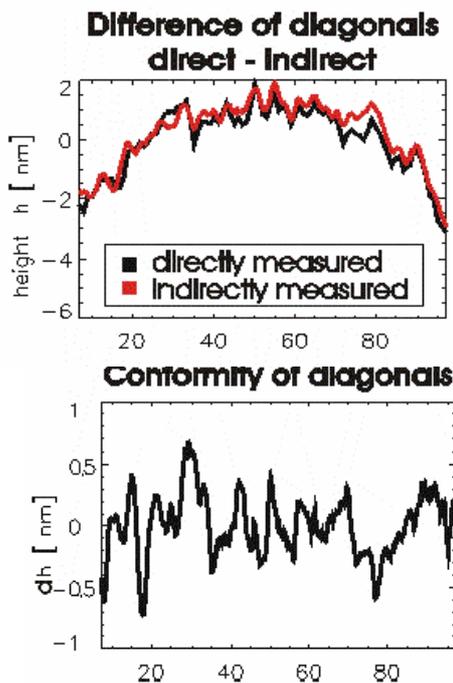
Höchste Genauigkeiten sind durch die Vierschrittstrategie erreichbar, die Einschnittstrategie hingegen erfordert geringeren zeitlichen Messaufwand, beschränkt sich in der Genauigkeit auf  $< \pm 1 \text{ nml p-v}$ .



**Fig. 7** Messergebnis einer 3-D-Profilmessung auf der NOM eines 100 mm langen Plangittersubstrats (Fläche 200 mm<sup>2</sup>) mit einer Genauigkeit des Prüflings von 0,02 arcsec rms beziehungsweise von  $< \pm 0,5 \text{ nml p-v}$  und  $< 0,4 \text{ nm rms}$ . Die Messunsicherheit beträgt  $U < 0,4 \text{ nm rms}$ ; die Reproduzierbarkeit der Messung:  $\pm 0,045 \text{ nm rms}$  beziehungsweise  $\pm 0,007 \text{ arcsec rms}$ .

Das in Fig. 7 dargestellte Ergebnis eines 2000 mm<sup>2</sup> großen Plangittersubstrats wurde nach der Vierschrittstrategie auf der NOM mit dem AKF vermessen. Während bei einem Linienscan aus der Messung dieser Fläche mit einer Messunsicherheit von  $< 0,01 \text{ arcsec rms}$  gerechnet werden kann, wurde die Unsicherheit bei dieser Fläche aus der Diagonalkontrollmessung des vierten Schrittes bestimmt. Die Überdeckung der Diagonallinie, die aus der Flächengenerierung der ersten drei Schritte indirekt ermittelt wurde, mit der direkt als Linie gemessenen Diagonale ist in Fig. 8 dargestellt. Der Verlauf der Differenzen weist eine Abweichung von der

Nulllinie von 0,25 nm rms aus. Die so festgestellte Übereinstimmung der auf unterschiedliche Weise gemessenen Kurven stellt eine äußerst geringe Messunsicherheit für eine ausgedehnte Flächenmessung dar, die in dieser Genauigkeitskategorie bereits höchsten Anforderungen an die Bestimmung der Mikrogeometrie entspricht. Die Methode kann ebenfalls sehr gut zur Autokontrolle des Messergebnisses verwendet werden.



**Fig. 8:** Darstellung des Messergebnisses einer Diagonale, das aus der vorher in drei Schritten ermittelten 3-D-Flächenprofilometrie extrahiert wurde (rote Kurve links) im Vergleich mit dem Messergebnis, das aus der direkten Messung der Diagonale als Linienscan ermittelt wurde (schwarze Kurve). Der Differenzverlauf beider Kurven ist unten dargestellt als Maß für die Übereinstimmung der beiden vom selben Prüflingsbereich auf unterschiedliche Weise ermittelten Messergebnisse. Die Übereinstimmung beträgt 0,25 nm rms.

Es handelt sich dabei um die in Fig. 7 dargestellte Planfläche, deren Linienscan-Rohmessdaten in Fig. 4 dargestellt sind.

Die mit dieser 3-D-Darstellung gewonnenen Daten können auch als Ausgangsbasis für anschließend durchzuführende Korrekturbearbeitungsschritte verwendet werden. Die laterale Auflösung beschränkt sich dabei auf den Messfleckdurchmesser 2 mm. Dieses mit Fig. 7 und Fig. 8 gezeigte Beispiel Planfläche wurde auch nach Daten des Interferometers D100 durch Ionenstrahl-Finishing (IBF) in mehreren Iterationsschritten auf diese Genauigkeit gebracht. Auf die gleiche Weise wurden die NOM - 3-D-Topographie-Messergebnisse zum IBF an einer asphärischen Spiegelfläche verwendet, wobei Genauigkeiten von 0,1 arcsec rms, dem Fünftel des bisherigen technologischen Entwicklungsstandes [4], erzielt wurden. Die 3-D-Profilometrie hat aus der Sicht der Steigerung der Finishbearbeitung prinzipielle Bedeutung, um die Genauigkeit der Deflektometrie für die Technologie entsprechend ausnutzen zu können.

### 3.4 Die NOM als Messmaschine für den industriellen Einsatz

Mit der Konzipierung der NOM wurde ebenfalls das Ziel verfolgt, die Messmaschine im industriellen Einsatz anwenden zu können. Dazu wurden besonders die folgenden Aspekte berücksichtigt:

1. Die Universalität der Möglichkeiten für Prüflingsformen, -typen und -größen ist sehr hoch, und sehr kurzzeitiges Wechseln ist möglich.
2. Die erforderlichen Messzeiten sind entsprechend den geforderten Genauigkeiten vergleichbar mit anderen Messeinrichtungen.

- Der Automatisierungsgrad der NOM ist im jetzigen Zustand bereits sehr hoch und sehr erweiterungsfähig. Es ist bei BESSY gängige Praxis, die verkehrsberuhigten und damit vibrationsarmen Nacht- und Wochenendstunden für automatische Messungen ohne Anwesenheit von Personal zu nutzen. Positionierbewegungen für die Vierschrittstrategie beispielsweise können automatisch durchgeführt werden. Denkbar ist sogar der Einsatz in einem vollautomatischen Messlabor mit Roboter-Prüflingsbeschickung und vollautomatischer Prüflingsjustierung und -messung bis zur automatischen Ergebnisauswertung, -registrierung und -protokollierung. Gegenwärtig werden bei BESSY die Messergebnisse so aufbereitet, dass automatisch mehrseitige Messprotokolle mit ca. 50 Einzeldaten, darunter ca. 10 Diagramme erstellt werden.
- Auch größere Stückzahlen von Prüflingen sind gleichzeitig messbar. Es wurde bereits erprobt, 16 Prüflinge mit einer einzigen Beschickung zu messen.
- Die Umweltaforderungen sind nicht höher als bei anderen Messvorrichtungen vergleichbarer Genauigkeit. Durch die Box und durch hohe Gesteinvolumina sind Anfälligkeiten gegen äußeren Temperaturschwankungen, wie die Regelschwankungen einer Klimaanlage, und gegen Schwingungen nicht extrem hoch. Durch ständiges Monitoring werden gegenwärtig bei BESSY Umgebungsschwingungen und Temperaturdifferenzen an mehr als 12 Messstellen registriert, auf einem Monitor angezeigt und gespeichert.

Ein wesentliches Hindernis für den ökonomischen Einsatz von punktwise scannenden Deflektometrie-Verfahren wird in der erforderlichen Messzeit gesehen. Das ist auch beispielsweise gegenüber Interferometrie-Verfahren grundsätzlich vordergründig nachvollziehbar. Bei

Zusammenhang Meßgenauigkeit und Meßzeit bei unterschiedlichen Planflächen	Prüflinge in unterschiedlichen Größenbereichen										
	Durchmesser [mm]:		Ø 6	Ø 50	Ø 250	Ø 500	(Ø 650)				
	Länge[mm] x Breite[mm]:		20x5	100x20	500x100	1000x200	1200x300				
	Fläche [cm²]:		0,5	20	500	2000	3600				
Meßgenauigkeitsbereiche		Meßpunkt-				Erforderliche Meßzeit für eine Planfläche in Flächenmessung (3-D-Darstellung) im vollautomatischen Meßablauf					
Stand.abw.97% Rms	peak to valley p-v	Abstand mm	Anzahl 1/cm²								
$\lambda/25$	50 nm	$\lambda/5$	120 nm	50	0,2				20 min	20 min	
$\lambda/40$	15 nm	$\lambda/8$	80 nm	10	1				40 min	1 h	
$\lambda/60$	10 nm	$\lambda/12$	50 nm	5	4			3 min	1 h	2 h	4 h
$\lambda/300$	2 nm	$\lambda/60$	10 nm	2	25			10 min	4 h	0,5 d	1 d
$\lambda/1200$	0,5 nm	$\lambda/200$	3 nm	1	220			90 min	1 d		
$\lambda/2000$	0,3 nm	$\lambda/600$	1 nm	0,4	1500			20 min	8 h		

**Tab. 3** Zusammenhang zwischen der erzielbaren Messgenauigkeit, der Prüflingsgröße und der daraus resultierenden erforderlichen Messzeit. Eine 500 cm<sup>2</sup> große Messfläche erfordert beispielsweise für eine Messgenauigkeit von 2 nm ( $\lambda/300$ ) eine Messzeit von ca 4 Stunden.

Sehr hohen geforderten Genauigkeiten erfordern Vorbereitungs- und Anpasszeiten jedoch den selben Aufwand, so dass die Unterschiede nicht so wesentlich ins Gewicht fallen. In der Tabelle 3 sind die auf der NOM erforderlichen Messzeiten im Zusammenhang mit den geforderten Genauigkeiten und Prüflingsgrößen für Planflächen zusammengestellt. Daraus ist ersicht-

lich, dass durchaus im Einsatz auch unter Produktionsbedingungen praktikable Messzeiten möglich sind. Bei gekrümmten Flächen verlängern sich allerdings die Vorbereitungszeiten wegen erhöhten Justieraufwandes, besonders bei Asphären. Diese sind jedoch mit interferometrischen Verfahren kaum oder nur bei unverhältnismäßig hohem Aufwand vermessbar.

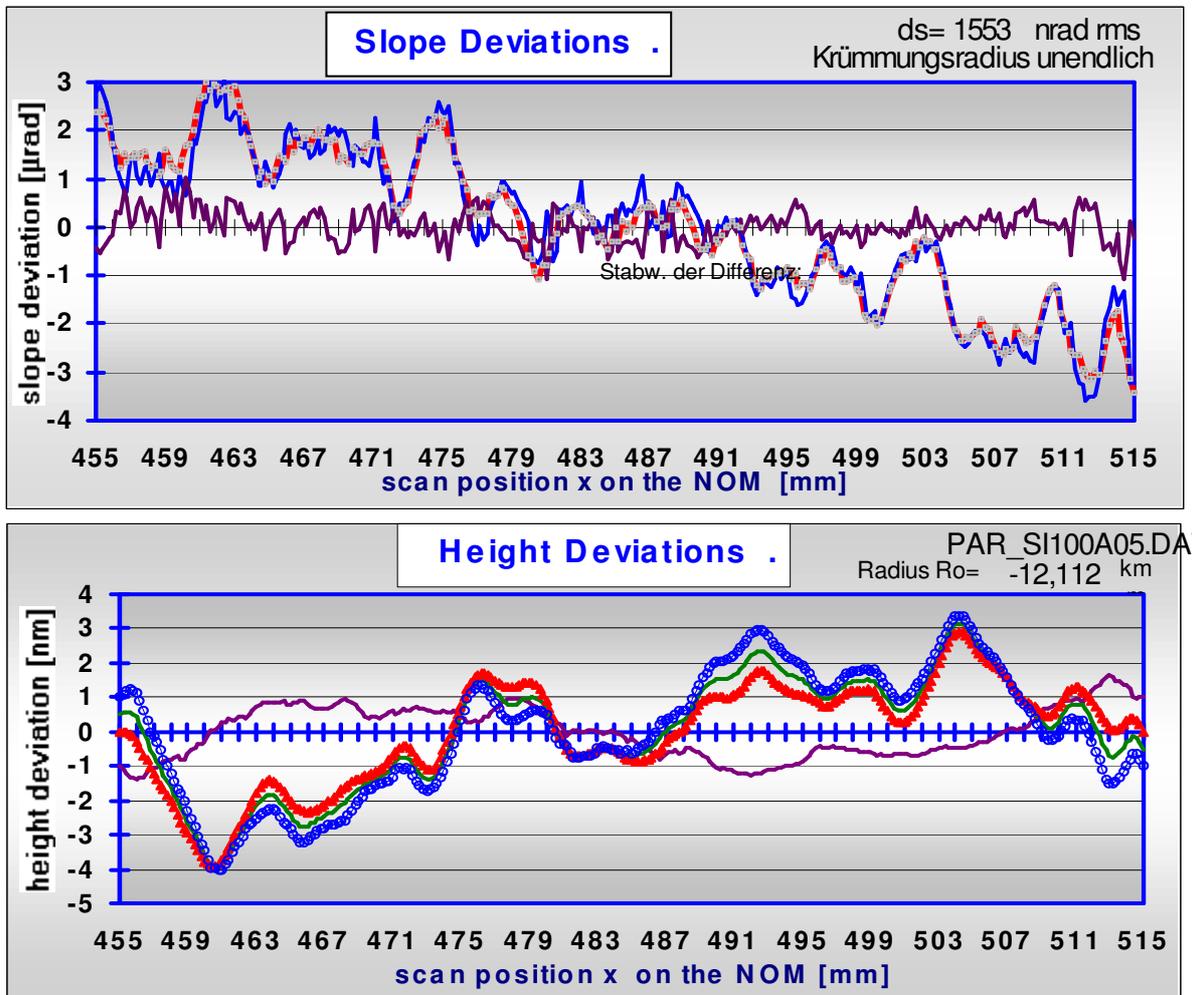
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die NOM unter Produktionsbedingungen in Messlaboren ohne wesentlichen zusätzlichen Aufwand jedoch mit den in den vorigen Abschnitten erläuterten Vorteilen eingesetzt werden kann.

### 3.5 Die Korrelation von zwei unterschiedlichen Sensoren an einer Messmaschine

Das Design der NOM realisiert ein neues Prinzip: das der hybriden Anwendung von zwei unterschiedlichen Sensoren für die selbe Messgröße an einer Maschine. Diese können gleichzeitig oder nacheinander arbeiten. Der wesentliche Sinn besteht darin, die systematischen Messabweichungen gesondert zu registrieren und zu ihrer Minimierung zu verarbeiten. Die für dieses Verfahren und für die NOM von BESSY national und international angemeldete Patentschrift [6] „Optical Measuring Process and Precision Measuring Machine for Determining the Deviation from Ideal Shape of Technically Polished Surfaces“ erläutert in den Ausführungen zu 26 Ansprüchen die Besonderheiten der parallelen Anordnung und Nutzung der beiden Sensoren LTP und AKF und weiterer Details.

Die systematischen Messabweichungen können aus verschiedenen Ursachen entstehen: Die wesentlichen in diesem Fall sind Subpixelabweichungen der Sensoren, Inhomogenitäten und Flächenformabweichungen in den optischen Leitsystemen der Messstrahlen, Blendengröße und –anordnung am AKF, Justierung der Sensoren zur Messbewegung, Kalibrierung der Sensoren. Dabei ist der Unterschied beider Messungen wichtig für die Ermittlung der Messunsicherheit, sowie zur Erkennung und Einflussverringerung der systematischen Abweichungen.

Die Einflussverringerung systematischer Abweichungen kann somit durch Korrekturen bei Justierungen und Kalibrierung, sowie durch Verwenden von Kompensationsfunktionen erfolgen.



**Fig. 9** Vergleich von Messungen auf der NOM mit dem LTP-Sensor (blauer Kurvenverlauf) und mit dem AKF-Sensor (roter Kurvenverlauf), dem Verlauf der Differenzen (violetter Kurvenverlauf) sowie dem Mittelwert (grüner Kurvenverlauf).

**Oberes Diagramm:** Winkelabweichungen ungefittet von 0,321 arcsec rms (LTP) bzw. 0,323 arcsec rms (AKF), der Differenzverlauf weist Abweichungen von 0,056 arcsec rms auf.

**Unteres Diagramm:** Höhenabweichungen nach einem Radiusfit ( $R=12,112$  km konvex). Die grüne Mittellinie beider Höhenmessergebnisse AKF-LTP weist 1,6 nm rms auf, die violette Differenzkurve 0,7 nm rms.

In dem Beispiel nach Fig. 9 können entsprechende Vergleiche der Messergebnisse beider Sensoren vorgenommen werden. In diesem Fall gibt die Korrelation systematische Messabweichungen, die sich um 0,06 arcsec rms unterscheiden, wieder. Dabei wurde eine Neigungsdifferenz von 0,255 marcsec/mm festgestellt. Dieser Wert steht für die Übereinstimmung der Grundkalibrierungen beider Sensoren bezüglich der jeweils gemessenen Krümmung, in diesem Fall entspricht dieser Wert einer zu beachtenden Pfeilhöhendifferenz von 0,6

nm. Die Höhenabweichungen der unterschiedlichen Messergebnisse betragen 0,33 nm rms (ohne Radienfit). Damit können in diesem Fall die systematischen Abweichungen mit großer Wahrscheinlichkeit mit  $< | \pm 0,3 |$  nm angenommen werden. Wenn in speziellen Fällen eine höhere Messgenauigkeit erforderlich ist, sind die Ursachen für diese in Fig. 9 dargestellten Differenzen durch differenzierte Messstrategien ermittelbar. Verschiedene Methoden der Autokalibrierung durch Variierung der Mess- und Positionierbereiche geben über systematische Messabweichungen Aufschluss, die durch Mittelung von Einzelergebnissen und durch Kompensationsfunktionen bis in die Größenordnung der zufälligen Messabweichungen berücksichtigt werden können.

Die Korrelation der Messergebnisse beider Sensoren LTP und AKF an der Messmaschine ermöglicht somit die tiefgehende Berücksichtigung einer Vielzahl von systematischen Abweichungen, die in den Fällen höchster Genauigkeitsanforderungen bis in die Bereiche der zufälligen Messabweichungen, also  $< 0,01$  arcsec rms beziehungsweise  $< 0,02$  nm rms reicht.

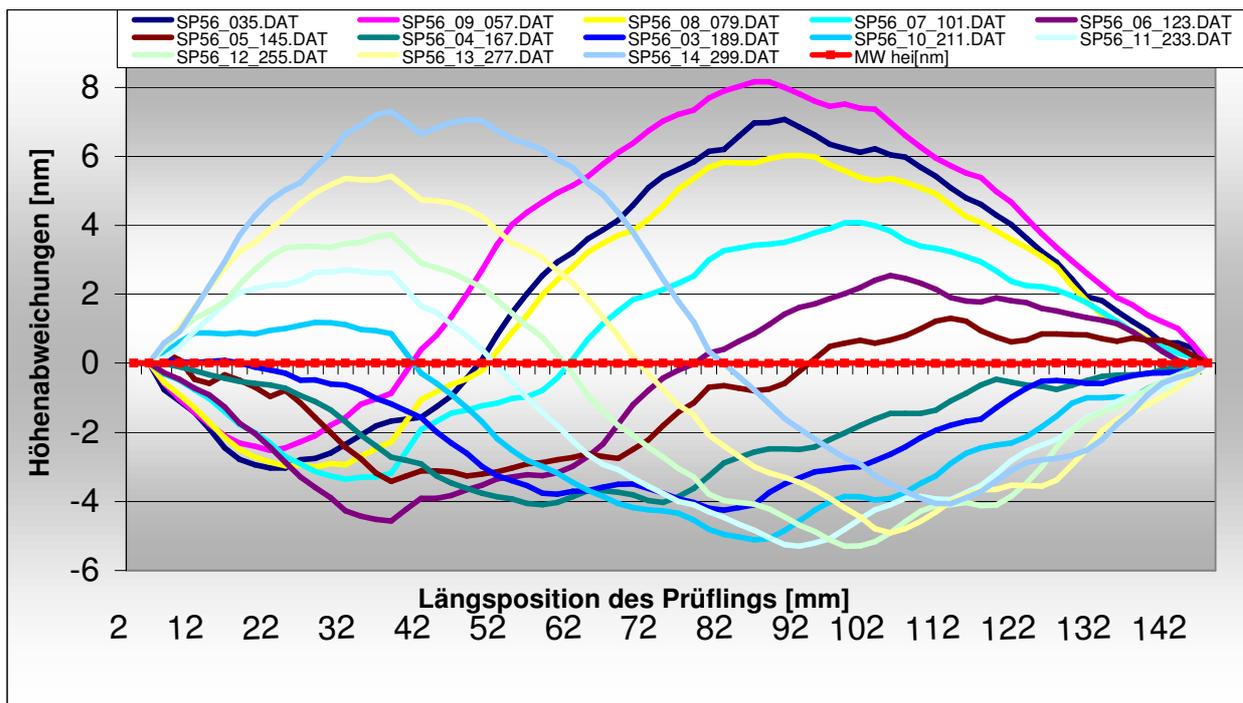
### 3.6 Autokorrektur- und Autokalibriermethoden

Die mit der NOM anwendbaren Autokorrektur- und Autokalibriermethoden dienen der Kompensation von systematischen Abweichungen. Sie lassen sich deshalb so erfolgreich anwenden, weil der Anteil der zufälligen Abweichungen an der gesamten Messunsicherheit so gering ist (siehe Abschnitt 3.1.1). Im Genauigkeitsrahmen der zufälligen Abweichungen sind die systematischen weitgehend eliminierbar.

Als Beispiel werden Autokorrekturverfahren beim Messen mit der NOM angewendet, wenn die 3-D-Topographie nach der Einschrittmethode durchgeführt werden soll (siehe Abschnitt 3.3). Bei dieser Methode sind die systematischen Abweichungen der Rollbewegung des Messschlittens beziehungsweise die Pitchbewegung des Positionierschlittens vom Einfluss erster Ordnung auf das Messergebnis. Diese lassen sich gesondert bestimmen und dienen dann als Referenzkurven, so dass nur noch die zufälligen Abweichungen dieser Referenzkurven von Einfluss auf das Messergebnis sind. Die Feststellung dieser Referenzkurven wurde mit hochgenauen ebenen Prüfkörpern durchgeführt, deren Abweichungen von der Ebenheit wiederum durch Autokorrektur beziehungsweise Autokalibrierung festgestellt wurde. Dazu eigneten sich die im Rahmen des NOK-Verbundprojekts von Berliner Glas hergestellten NOK-Prüfkörper (Beispiel Fig. 6) besonders gut.

Besondere Autokalibrierverfahren ermöglichen die Filterung systematischer Messabweichungen, wenn der Prüfling genauer ist als diese systematischen Abweichungen. In folgendem Beispiel ist ein Schritt einer Autokalibriermethode als Zwischenergebnis in Fig. 10 dargestellt: Eine sphärische Fläche von 56 m Krümmungsradius überdeckt über einer Strecke von ca. 150 mm einen Winkel von ca. 200 arcsec. Innerhalb des Messbereichs der NOM wurde eine identische Prüflingsspur jeweils um diskrete Winkelabstände versetzt gemessen. Das Diagramm zeigt 13 solcher Messergebnisse, die jeweils ca. 22 arcsec versetzt ermittelt wurden, nachdem ein durch alle Messreihen gemittelter Krümmungsradius von jeder Messreihe subtrahiert wird. Die Verschiedenheit der in Fig. 10 dargestellten Kurvenverläufe repräsentiert also die systematischen Abweichungen der gemessenen Winkel in Höhen umgewandelt. Wenn in einem weiteren Schritt der Autokalibrierung die jeweils winkelvesetzten Messreihen wie gemessen versetzt zur Deckung gebracht werden, wobei der Überlapp jeweils ca.

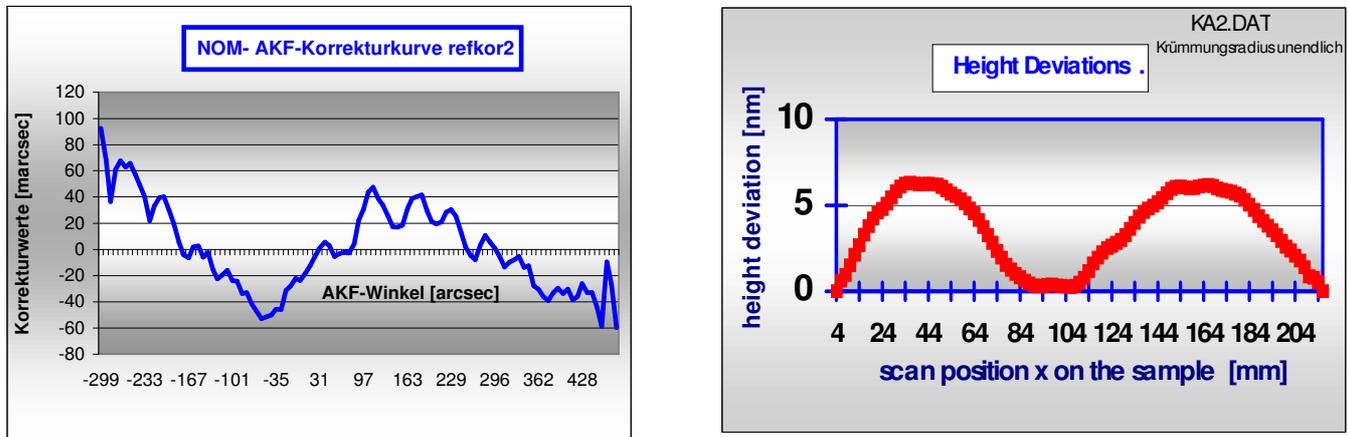
96% ausmacht, liegt bereits eine relativ exakte Korrekturkurve vor. Unter Einbeziehung dieser ersten Kurve ist ein zweiter äquivalenter Autokalibrierzyklus möglich.



**Fig. 10** Winkelautokalibrierung an der NOM mit dem AKF-Sensor: Diese 13 Höhendargestellungen entstanden von einer identischen Prüflingslinie in um konstante Winkelbeträge versetzten Messreihen. Sie sind Maß für die systematischen Abweichungen der Messstrahlführung einschließlich des optischen Systems im AKF. In der Wiederkehr typischer Abweichungen vom stetigen Verlauf der einzelnen Kurvenverläufe (beispielsweise über dem Messpunkt 42 mm) sind prüflingstypische Abweichungen erkennbar, die durch einen hohen Überlappungsgrad der bei der Ermittlung stark untersetzt in das Ergebnis der Autokalibrierung eingehen.

Das Ergebnis der angeführten Autokalibrierung ist in Fig. 11 dargestellt. Die Abweichungen von ca 0,14 arcsec p-v sind von Schwankungen von  $< 0,04$  arcsec p-v überlagert. Als Ursachen für diese systematischen Abweichungen sind vorrangig geometrisch optische Abbildungsfehler für den Gesamtverlauf und Subpixelabweichungen für die Schwankungen plausibel. Das nebenstehende Diagramm zeigt die entsprechenden Höhenauswirkungen der Korrekturkurve reffkor2. Ihr symmetrischer Verlauf läßt auf vorwiegende systematische Einflüsse des optischen Kanals für den Messstrahl auf seinem Weg vom AKF-Spalt über das AKF-Objektiv, den Doppelwinkel-Unlenker, zum Prüfling und zurück schließen. Das Autokalibrierergebnis ist in diesem Fall (6 +/- 0,2) nm p-v mit Winkelgenauigkeit von 10 marcsec rms,

also im Bereich der gegenwärtigen Rauschgrenze. Die Kreisformabweichung des Prüflings wurde mit  $18 \pm 0,3$  nm festgestellt.



**Fig. 11** Das Ergebnis der Autokalibrierung, **links** die Winkelabweichungen, die direkt als Korrekturkurve bei Messungen eingesetzt werden kann, **rechts** die daraus resultierenden Höhenabweichungen. Die Genauigkeit dieser Autokalibrierung befindet sich mit  $0,01$  arcsec rms beziehungsweise mit  $0,1$  nm rms an der Rauschgrenze. Dementsprechend konnten die systematischen Messabweichungen auf ca  $1\%$  in ihren Auswirkungen reduziert und die Kreisformabweichung des Prüflings mit einer Messunsicherheit von  $\pm 0,3$  nm festgestellt werden.

Solche Autokalibriermethoden sind, wie an dem Beispiel Fig. 10 und Fig. 11 gezeigt wurde, besonders effektiv bei gekrümmten Prüflingen mit sehr geringen Formabweichungen und lassen sich auch als Kalibriermethoden bei der Messung anderer Prüflinge, die weniger genau sind, anwenden.

Der geringe Anteil an zufälligen Abweichungen erlaubt es, mit der NOM auch in Dynamikbereichen von  $> 5 \cdot 10^5$  durch gezielte Anwendung von Autokalibriermethoden Messgenauigkeiten bis an die Rauschgrenze, also um  $0,01$  arcsec beziehungsweise um  $0,3$  nm, zu erreichen.

### 3.7 Erzielung von Messergebnissen mit der NOM, die vorher nicht möglich waren

Hohe Genauigkeiten in der 3-D-Topographie sind die Voraussetzungen dafür, dass Messergebnisse mit der NOM erzielt wurden, die vorher nicht möglich waren. Dazu zählen gemessene Komponenten für den Einsatz bei Synchrotronstrahlung, die bei BESSY I, eingesetzt gewesen waren, also in der Zeit 1980 bis ca 1995 gefertigt wurden. Dabei stellte sich heraus, dass einige Komponenten sogar höhere Formeinhaltung aufwiesen, als seinerzeit gemessen werden konnte. Dabei handelte es sich um sphärische oder ebene Flächen, die mit der klassischen Optiktechnologie gefertigt worden waren (siehe auch Abschnitt 3.9).

Aber gerade auch bei asphärischen Komponenten hat sich die Genauigkeitssteigerung erheblich positiv ausgewirkt, so dass die technologische Grenze bei asphärischen Flächen prinzipiell auf fünffache Genauigkeit der Komponenten steigerbar ist gegenüber dem Entwicklungsstand aus der Zeit um das Jahr 2000.

### 3.8 Voraussetzung für die Absenkung der technologischen Grenze

Die Fertigung von optischen Komponenten setzt grundsätzlich entsprechende Messtechnik voraus. Dabei besteht das Ziel, das Messergebnis 3 bis 10 mal genauer zu kennen, als es die Fertigungstoleranzen vorschreiben. Bei der Optiktechnologie wurden im Laufe ihrer 350 jährigen Geschichte immer besondere Fortschritte durch die Entwicklung der Messmethoden erzielt (zum Beispiel die Einführung der Probegläser oder Interferometer für die Optikfertigung). Die deflektometrischen Verfahren wurden für die Kontrolle von optischen Komponenten für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung seit ca 15 Jahren angewendet [2] und haben international bis zur Gegenwart, wenn von der NOM-Entwicklung abgesehen wird, die Messgenauigkeitsgrenze von 0,1 arcsec rms nur in Ausnahmen unterschreiten können. Die für die Fertigung eingesetzten hochspezialisierten Interferometrieverfahren haben diese Grenze in der Regel auch nicht unterschreiten können neben den in Abschnitt 3.2 erläuterten charakteristischen Merkmalen. Mit diesen bekannten Methoden wurde ständig in den Grenzen der Messgenauigkeit gefertigt, und der Qualitätsnachweis der Produkte war durch vielfache Zufälligkeit der Messergebnisse großen Schwankungen erlegen.

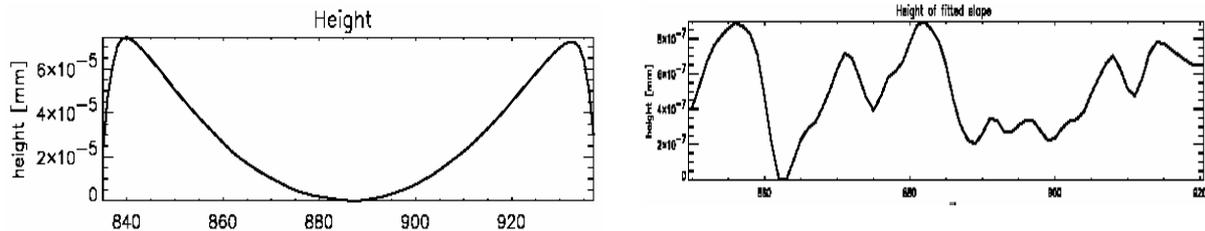
Mit der NOM-Entwicklung jedoch ist ein Durchbruch erzielt [9]. Das haben die mit der NOM vermessenen NOK-Demonstratoren gezeigt (Beispiel Abschnitt 3.3), weil die Steigerung der Messgenauigkeit mit der NOM auf das Zehnfache eine nachgewiesene Komponentengenauigkeitensteigerung um das Fünffache ermöglichte.

Mit der Eignung der NOM zum gegenwärtigen Entwicklungsstand für den industriellen Einsatz (siehe Abschnitt 3.4) ist eine weitere Voraussetzung für die Absenkung der technologischen Grenze gegeben.

### 3.9 Neue Erkenntnisse über die Klassische Optiktechnologie

Durch den Selbstkorrektoreffekt bei der klassischen Optiktechnologie, die dadurch gekennzeichnet ist, dass Werkzeug und Werkstück ständig großflächig im Eingriff sind, ist neben sehr geringer Mikrorauheit ein sehr hoher Genauigkeitsgrad der Formabweichung erreichbar. Diese höchsterreichbare Genauigkeit wurde bisher bestimmt durch den messtechnischen Nachweis in den Messlaboren der Optikhersteller im wesentlichen durch Interferometrie oder in Spezialanwendungen nach der klassischen Schneidmethode, sowie in den Messlaboren von Synchrotron-Strahlung-Anwendern vielfach mit Deflektometrie-Messgeräten LTP. Durch die Genauigkeitssteigerung der Deflektometrie-Anwendung mit der NOM konnten auch Er-

gebnisse von ebenen und sphärischen Prüflingen erzielt werden, die bisher so nicht bekannt waren.



**Fig. 12** NOM-Messergebnis eines Planspiegelsubstrats von 100 mm Länge, das nach der klassischen Poliermethode hergestellt wurde; **links:** ungefitteter Höhenverlauf über die Länge des Werkstücks: 66 nm p-v (0,33 arcsec rms); **rechts:** mit Kreis (R=13 km) gefitteter Höhenverlauf des Mittelbereiches von 70 mm Messlänge, 0,9 nm p-v und 0,23 nm rms (0,021 arcsec rms); Reproduzierbarkeit der Messung: 0,013 arcsec rms bzw.  $< 0,1$  nm rms.

Der Höhenverlauf eines Spiegelsubstrats, das nach der klassischen Methode mittels Pechpolitur hergestellt wurde, zeigt die verfahrensspezifischen Abweichungen dieser herkömmlichen Methode im linken Diagramm der Fig.12. Der Randabfall ist durch den Werkzeugüberhang bei der Politur der Randbereiche erklärbar und ist gut bekannt bei Herstellern und Nutzern. Der Mittelbereich (in diesem Fall von 70 %) jedoch hat einen sehr stetigen Verlauf, so dass nach dem Abzug eines sphärischen Restanteils die Höhenabweichungen nur noch 0,2 nm rms betragen. Das entspricht Winkeltangentenabweichungen von 0,02 arcsec rms.

Diese am Beispiel mit Fig. 12 gezeigten sehr geringen Formabweichungen klassisch hergestellter Flächen wurde an mehreren ebenen und sphärischen Beispielen mit der NOM nachgewiesen. Der typische Höhenverlauf tritt in allen Fällen auf, sogar bei dem Beispiel einer Präzisions-Keilplatte aus Quarzglas, die vor ca. 45 Jahren gefertigt wurde, wie auch bei sphärischen Flächen unterschiedlicher Krümmungsradien.

Aus diesen Ergebnissen sind folgende Schlüsse zu ziehen:

1. Mit dem messtechnischen Nachweis kann die klassische Poliertechnologie so beeinflusst werden, dass der Randabfall sehr geringe Anteile aufweist oder dass die stärker abfallenden Randpartien nicht verwendet werden und dass die restliche Krümmung des Mittelteils gezielt minimiert werden kann, so dass sehr ebene Flächen mit Abweichungen von der Ebenheit  $< 1$  nm erreichbar sind.
2. Die zweite Schlussfolgerung aus diesen Messergebnissen ist, dass für die Beurteilung von optischen Präzisionskomponenten für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung wesentlich genauere Schüsse gezogen werden können. Bisher waren Komponenten mit Winkeltangentenabweichungen unter 0,1 arcsec rms kaum bekannt, und es ist heute anzunehmen, dass mancher Spiegel in Strahlrohren der 80er Jahre wesentlich genauer war, als damals spezifiziert worden war und objektiv messtechnisch exakt nachgewiesen werden konnte.
3. Die dritte Schlussfolgerung betrifft die subjektive „Kunst von Optikern mit den goldenen Händen“, wie hochgenau arbeitende Feinoptiker oft genannt werden. Diese Kunst liegt jedoch im wesentlichen in der Intelligenz dieser Meister, die die komplizierte Umsetzung

von subjektiv kaum wahrnehmbaren Licht- und Schattenverläufen ihrer verschiedenen Prüfmethode mit objektiv oft schwer nachvollziehbaren Eingriffen in den Polierprozess durch die Variation von geometrischen Eingriffsverhältnissen, Poliermitteldosierung, Pechpolierschalenauskratzen, Bearbeitungskräften und anderen verschiedenen individuellen Tricks vornehmen, sehr oft mit geringem oder negativem Erfolg. Jahrzehntelange Erfahrungen der Feinoptiker kommen hinzu. Der kommerzielle Preis der hochgenauen optischen Komponenten ist dadurch sehr angestiegen. Auf dem Wege der seit ca. 20 Jahren in der Optikindustrie angestrebten „Objektivierung“ der Produktion (wie beispielsweise Automatisierung bei der Fertigung mechanischer Produkte), die auf das Ersetzen der „Leute mit den goldenen Händen“ abzielt, könnte die Erkenntnis, dass der klassische Polierprozess höhere Genauigkeiten ermöglicht, als bisher bekannt war, progressive Auswirkungen haben.

4. Die zukünftigen Auswirkungen der möglichen Präzisierung der klassischen Poliertechnik durch Deflektometrie auf den gesamten Ablauf der Optiktechnologie sind gegenwärtig gar nicht absehbar, obgleich die Möglichkeiten mit der NOM messtechnisch nachgewiesen sind. Da die Umsetzung der messtechnischen Erkenntnisse jedoch zunächst weiterhin noch durch subjektive Eingriffe in den klassischen Polierprozess erfolgen wird (siehe Punkt 3), wird dieser Umsetzungsprozess lange andauern, deren Zeitraum in Generationen von Feinoptikern zu ermessen wird. Da jedoch bei Investitionen die Wertschöpfungskette nur weniger Jahre relevant ist, ist zu befürchten, dass sich diese Erkenntnisse über den klassischen Polierprozess nur langsam werden durchsetzen und ökonomisch Früchte tragen können.
5. Trotz beziehungsweise wegen dieser in den Punkten 3 und 4 genannten Hemmnisse ist es von wesentlicher Bedeutung, auf die Tatsache hinzuweisen, dass mit klassischer Poliertechnologie Genauigkeiten von  $\lambda/3000$  (0,2 nm rms) erreichbar sind.

Dieses Ergebnis der NOM-Entwicklung, dass mit neuen deflektometrischen Messverfahren, wie etwa der NOM neue Aussagen über die mögliche Genauigkeit klassischer Optiktechnologie zu treffen sind, wird zukünftig mehr Bedeutung haben als gegenwärtig.

### 3.10 Asphärenmessgenauigkeit

Da das mit der NOM angewendete Deflektometrieprinzip grundsätzlich keine Referenzflächen benötigt, hängt die Messgenauigkeit a priori auch nicht von der zu ermittelnden Flächenform ab. Diese Erkenntnis ist von wesentlicher Bedeutung. Denn in der Optik dominieren, bedingt durch den Selbstkorrekturprozess der klassischen Optiktechnologie, aus technologischer Sicht die ebenen beziehungsweise die Kugelflächen, die in über 400 Jahren die Entwicklung der optischen Fertigungstechnik bestimmt haben. Dieses Phänomen hatte natürlich auch auf die parallele Entwicklung der Messtechnik Auswirkungen. Ebenfalls in der allgemeinen Technik, wie beispielsweise in der Feingerätetechnik, im Maschinenbau, sogar in der Architektur dominieren ebene Flächen, Kugelflächen, Zylinderflächen, die ebenfalls wiederum die entsprechende Messtechnik (Koordinatenmesstechnik) bestimmten. Auch wegen der damit vergleichsweise wesentlich höheren Kompliziertheit asphärischer Flächen in der Optik sind diese hier sehr selten, obgleich bereits vor über 350 Jahren die Bedeutung asphärischer

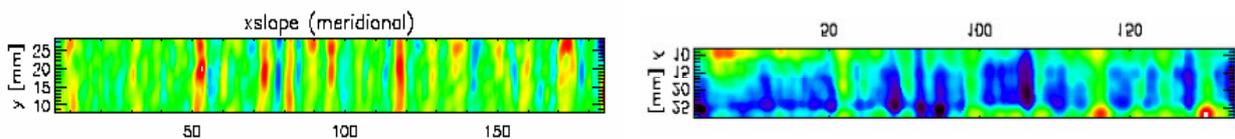
Flächen für die optische Abbildung erkannt war. Die Asphärenmesstechnik ist daher wesentlich komplizierter als die für ebene und sphärische Flächen.

Somit kommt der Tatsache, dass die Asphärenmessgenauigkeit auf der NOM genau so hoch ist wie die bei ebenen oder sphärischen eine große prinzipielle Bedeutung zu.

Jedoch sind dabei einige Einschränkungen zu beachten:

1. Durch den technologisch komplizierteren Prozess für asphärische Flächen sind die Formabweichungen im Allgemeinen eine halbe bis eine Größenordnung größer, und damit wird die Messegenauigkeit eingeschränkt, gegebenenfalls ist diese dann auch nicht immer erforderlich.
2. Ein zweiter Aspekt ergibt sich jedoch aus dem höheren Justieraufwand für asphärische Flächen. Während eine ebene Fläche im Zuge der Justierung zur Messung auf der NOM lediglich um zwei Achsen verkippt werden muss, ist eine torische Fläche zusätzlich noch um die dritte Achse zu verschwenken und in einer Richtung zu verschieben.
3. Wenn dann der Prüfling erheblich von der Sollform abweicht, ist eine bestimmte Justierung in diesen vier Freiheitsgraden schwer möglich.
4. Weil die mathematische Beschreibung von asphärischen Flächen stetes komplexer ist als die einfachere von Ebenen und Kugeln, kompliziert sich das Problem der Erfassung des optimalen Justierzustandes wie auch die Auswertung der Messwerte.
5. Wegen der sehr hohen Vielfalt von möglichen und praktisch verwendeten und demzufolge zu messenden Asphären ist weniger Routine bei der Durchführung und Auswertung der Messungen möglich, und erfordert mehr individuelle Behandlung, also höheren Justier- und Softwareaufwand.

Trotz dieser Einschränkungen sind sehr hohe Messgenauigkeiten von asphärischen Prüflingen möglich und mit der NOM nachgewiesen gegenüber herkömmlichen Messungen.



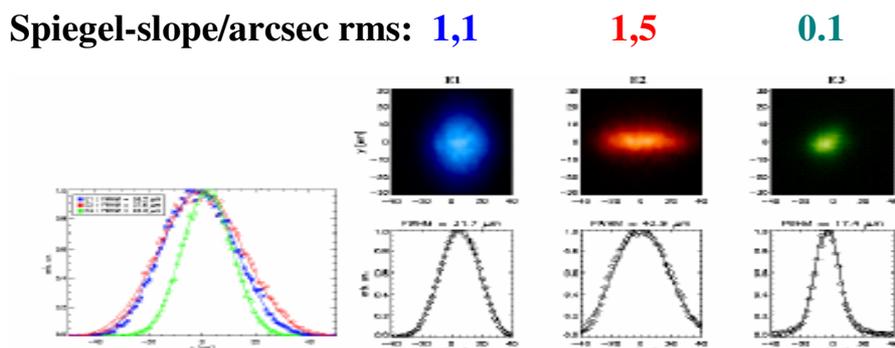
**Fig. 13** Messergebnis der NOM von einer asphärischen Fläche (elliptisch-cylindrischer Spiegel – NOK-Demonstrator 190 mm x 25 mm) nach dem Fitten eines bestangepassten elliptischen Zylinders; **links:** Winkeltangentenabweichungen von 0,1 arcsec rms und 1,2 arcsec p-v (blau bis rot); **rechts:** Höhenabweichungen von 1,4 nm rms und 14,6 nm p-v (blau: 0 nm; rot: 14,6 nm)

Der asphärische Spiegel, dessen auf der NOM gemessenen Winkeltangenten- und Höhenabweichungen in Fig. 13 qualitativ dargestellt sind, wurde beim IOM in Leipzig nach den Messergebnissen von BESSY mit IBF feinbearbeitet. Mit dem Ergebnis 0,1 arcsec rms erfüllt der Spiegel die Einsatzbedingungen zur Synchrotronstrahlfokussierung und erzielte eine dem Strahlrohr entsprechende höchstmögliche Fokussierung. Dabei wurde erstmalig bei BESSY die hohe Qualität des vorhandenen Synchrotronstrahls nicht mehr durch die Optik begrenzt.

Weil dieses Anwendungsziel theoretisch erreicht war, konnte der in Iterationsschritten verlaufende Finishingprozess abgebrochen werden. Damit ist für eine asphärische Fläche fünffach höhere Genauigkeit erzielt worden als der gegenwärtige Stand der Technik ausweist. [4]. Trotzdem wäre in einem weiteren Iterationsschritt noch eine höhere Formgenauigkeit an dieser Asphäre möglich gewesen.

### 3.11 Kombination mit einem Finishbearbeitungsverfahren

Das mit Fig. 13 im vorigen Abschnitt gezeigte Beispiel zeigt, wie Messen und Finishbearbeitung zum Erfolg geführt haben. Dieser elliptisch zylindrische Spiegel erforderte Messungen mit einem referenzfreien Deflektometrie-Verfahren. So wurden die in Berlin-Adlershof gewonnenen Messergebnisse der NOM direkt verwendet, um die erforderliche Abtragssimulation zu berechnen und den Ionenstrahlfinishingprozess in Leipzig zu steuern [10]. Als Ergebnis zeigte der Spiegel im Einsatz mit Synchrotronstrahlung eine erhebliche Verbesserung, siehe Fig. 14.



**Fig. 14** Reduzierung des Fokus von  $42,9 \mu\text{m}$  auf  $17,4 \mu\text{m}$  also um das Verhältnis 3:1 durch Austausch des Fokussierspiegels durch einen neuen (NOK-Demonstrator), bei der die Winkeltangentenabweichungen statt  $1,5 \text{ arcsec rms}$  nun  $0,1 \text{ arcsec rms}$  betragen.

Auch bei ebenen Flächen wurden die Messergebnisse der NOM zur Steuerung des Finishingprozesses im IOM in Leipzig verwendet [10]. Wesentlich dabei war die Kombination der Messergebnisse der DIREKT 100 – Messungen, aus denen die höhere laterale Auflösung für den Finishingprozess von Bedeutung war, während die Formabweichungen zur Bestätigung beziehungsweise zur Korrektur der Interferometerergebnisse verwendet wurde, damit Einflüsse der Referenzfläche des Interferometers keine ungewollten Formabweichungen bewirkten.

Die Zusammenarbeit der NOM bei BESSY mit der Ionenstrahlfinishbearbeitung des IOM Leipzig hat zu wesentlichen Erfolgen geführt und damit bestätigt, wie Messung und Endbearbeitung zusammen für den Herstellungsprozess von hochgenauen optischen Komponenten zu neuen vorher nicht gekannten Ergebnissen führen können.

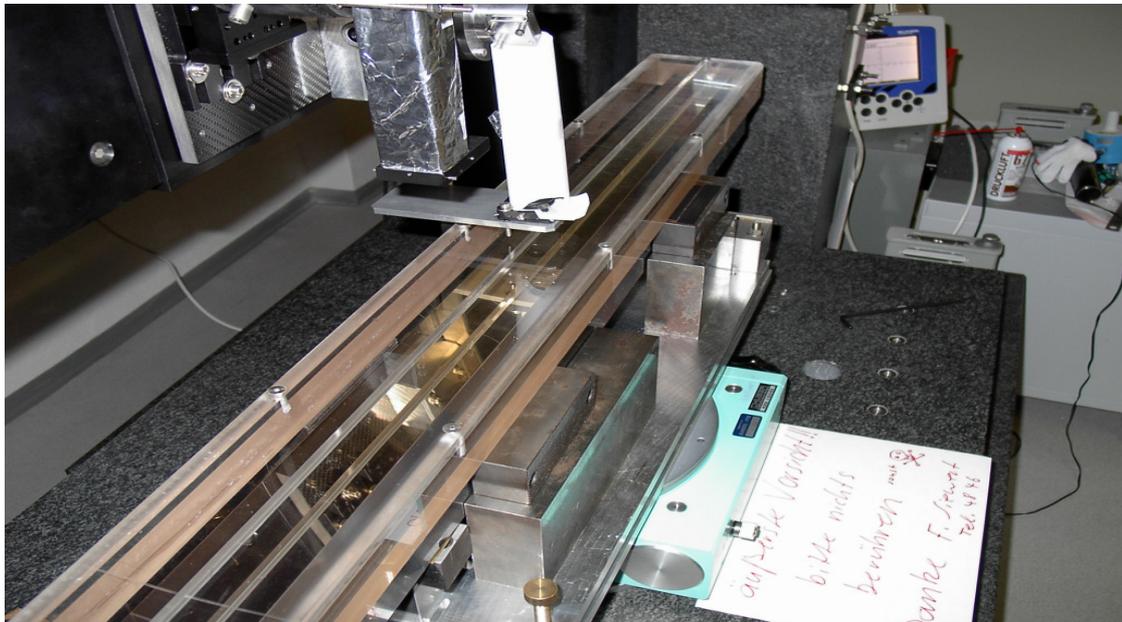
### 3.12 Kontrolle von Komponenten für den SR-Einsatz mit der NOM

Die NOM wurde bereits vielfach eingesetzt, um optische Komponenten, die für den Einsatz bei BESSY vorgesehen waren, zu testen. Dabei wurden Spiegel und Gittersubstrate in den Abmessungen von 100 bis 1000 mm in ihren Längsausdehnungen und von unterschiedlichen

Flächenformen gemessen. Im Ergebnis dieses Einsatzes hat sich in allen Fällen gezeigt, dass die Messergebnisse der Hersteller im Vergleich mit deren Messprotokollen entweder bestätigt werden konnten, oder Nacharbeit oder Rückweisung vereinbart werden musste beziehungsweise ein veränderter Einbau in das Strahlrohr vorgenommen werden konnte.

In den meisten Fällen konnten die Herstellermessergebnisse im Rahmen ihrer angegebenen oder angenommenen Messunsicherheiten bestätigt werden. Bereits während ihrer Montage- und Erprobungsphase wurde die NOM für Routinemessungen an SR-Komponenten eingesetzt. Sie hat dabei nicht nur wegen ihrer Genauigkeit und Aussagefähigkeit gegenüber dem bei BESSY vorhandenen LTP sondern auch wegen der einfacheren Bedienung und komplexen Einsatzfähigkeit den herkömmlichen LTP abgelöst.

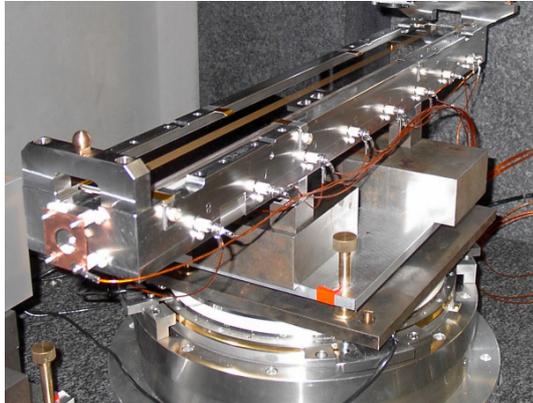
Damit hat sich die NOM vielfach für den routinemäßigen Einsatz bei der Messung von Komponenten, die bei BESSY und auch in anderen Synchrotronlaboren eingesetzt werden sollten, bewährt.



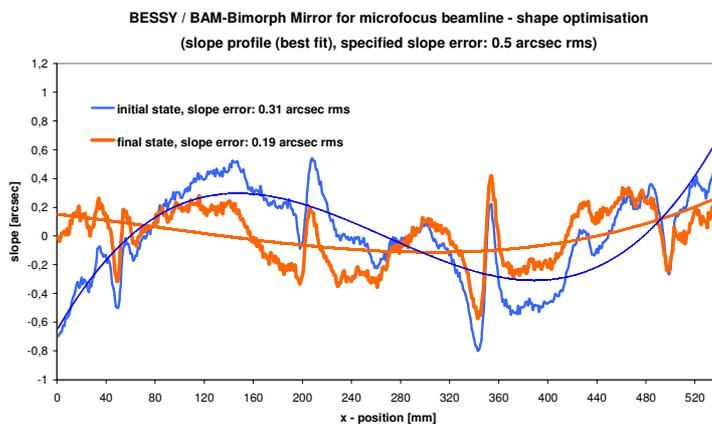
**Fig. 15** Ein 1 m langer asphärischer Spiegel für den Einsatz in einer Beamline bei BESSY zum Vermessen unter der NOM. Bei dieser Spiegelfläche handelt es sich um einen Torus. Die Justierbewegungen sind dabei in vier Freiheitsgraden erforderlich (drei Rotationen und eine Translation)

### 3.13 Einsatz der NOM für adaptive Komponenten

Adaptive optische Komponenten spielen für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung verschiedentlich eine bedeutende Rolle. Die NOM wurde erfolgreich eingesetzt, um solche Komponenten zu entwickeln und zu testen. Die Bestimmung von Formveränderungen eines durch mechanische Hebel zu verbiegenden Stahlspiegels in bestimmte asphärische Formen war das Ziel der Messung in einem Entwicklungsprozess bei BESSY. Ein anderer Spiegel aus Quarzglas (fused silica) ist mit einer Reihe piezoelektrischer Aktuatoren versehen und soll seine Brennweite im Einsatz mit Synchrotronstrahlung verändern können. Seine Formveränderungen wurden ebenfalls erfolgreich auf der NOM getestet. Die Messergebnisse waren dabei wesentlich aussagekräftiger als die des Herstellers.



**Fig. 16** Adaptiver Spiegel, sogenannter Bimorph - Spiegel mit zwei längsgeteilten sphärischen Spiegelteilen unterschiedlicher Krümmungsradien zum Einsatz bei BESSY. An den Längsseiten befinden sich je 8 Piezo-Aktuatoren, mit denen die Spiegelteile gezielt verbogen werden können.



**Fig. 17** Messergebnisse des Bimorph-Spiegels Fig. 16, die mit der NOM gewonnen wurden. Die blaue Kurve zeigt den Ausgangszustand, die orangefarbene den Endzustand nach optimaler Verbiegung durch die 8 Piezo-Aktuatoren. Die Winkeltangentenabweichungen haben sich dabei von 0,3 auf 0,2 arcsec rms verbessert.

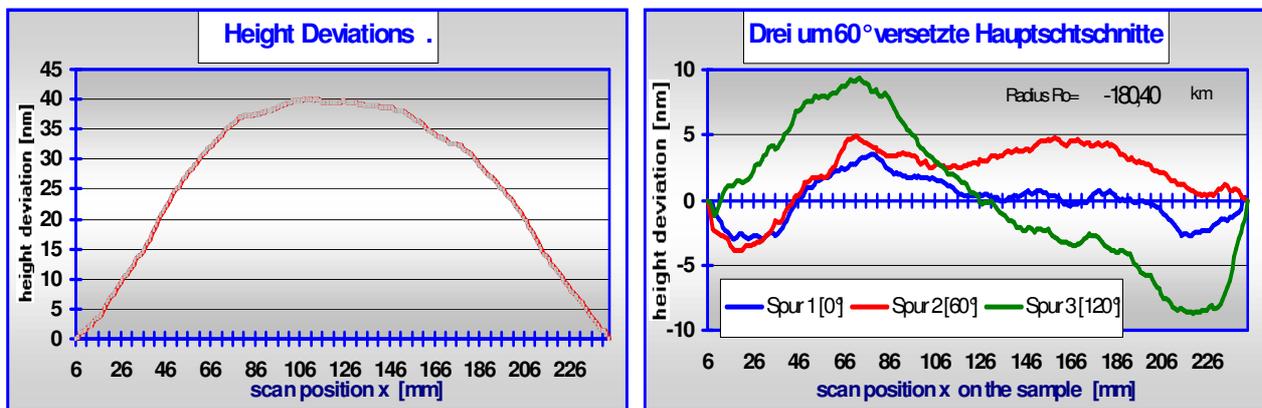
Mit Fig. 16 und Fig. 17 ist an diesem adaptiven Spiegel gezeigt, wie durch exakte Messung mit der NOM die Spiegeleigenschaften verbessert werden können, in diesem Fall die Absenkung der Winkeltangentenabweichungen von 0,3 arcsec rms auf 0,2 arcsec rms.

Mit diesem Einsatz wurde gezeigt, dass mit der NOM erfolgreich Einstellprozesse adaptiver Spiegel beobachtet werden können, wie auch verschiedene optische Komponenten in ihren Halterungs- und Kühlsystemen gemessen werden können, um deren Einflüsse auf die optische Oberfläche zu erkennen.

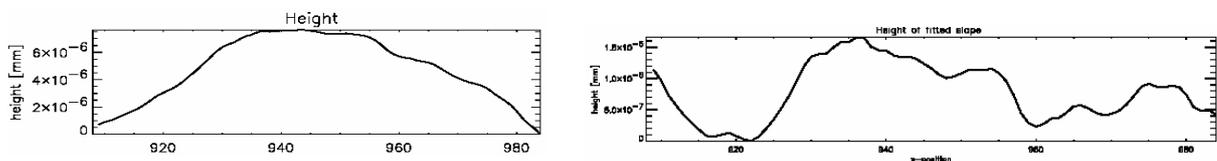
### 3.14 Einsatz der NOM für hochpräzise Optikkomponenten, die nicht für die Synchrotronstrahlung eingesetzt werden sollen

Wegen ihrer hohen Genauigkeit ist die NOM sehr gut einsetzbar für die Prüfung von hochpräzisen optischen Komponenten, die zur Referenz eingesetzt werden sollen. Es wurden auf der NOM Referenznormale gemessen, die für die optische Messtechnik in Präzisionsgeräten eingesetzt wurden, wie ein ebener Kalibrierspiegel, der bei der Ausgangsprüfung hochgenauer Autokollimationsfernrohre verwendet wird, ein sphärisches Probeglas, das als Prüfwerkzeug in der Produktion eines optischen Industriebetriebes eingesetzt wird, sowie eine ebene Zerodurplatte, die als Referenznormal für ein Präzisionsinterferometer dient. Ein Messergebnis für diese Referenzplatte ist in Fig. 18 dargestellt.

An das Referenznormal für ein Präzisionsinterferometer werden höchste Anforderungen gestellt. Bei dem Zerodurkörper, der vor ca 10 Jahren hergestellt worden war, wurden auf der NOM eine annähernde sphärische Abweichung von ca 40 nm Pfeilhöhe einem Krümmungsradius von ca 180 km entsprechend festgestellt (Fig. 18 links). Die Abweichungen von einer mittleren sphärischen Krümmung von 180,4 km in drei um 120° versetzten Diagonalen ist in Fig.18 rechts dargestellt. Diese Formabweichungen von  $\lambda/40$  p-v sind für das Referenznormal eines Präzisionsinterferometers relativ hoch. Es ist möglich, dass der Werkstoff Glaskeramik im Laufe der Zeit seit der Herstellung vor ca. 10 Jahren Formveränderungen erfahren hat. Zum Vergleich wurde auf der NOM eine Quarzglasplatte vom Durchmesser 150 mm, die vor ca 40 Jahren für ein Präzisionsinterferometer hergestellt worden war, auf der NOM vermessen. Das Ergebnis (siehe Fig. 19 links) weist maximal 10 nm p-v  $\lambda/60$  auf (ohne Kreisfit), im Mittelbereich von 50% des Durchmessers sogar nur 1,7 nm p-v (Kreisfitradius 104 km), also  $\approx \lambda/400$  p-v. Es ist möglich, dass die Glaskeramik zeitlichen Formveränderungen unterlegen war. Solche Möglichkeiten sind bekannt, während Quarzglas als sehr formstabil gilt.



**Fig. 18** NOM-Messergebnis eines Referenznormals (Durchmesser 250 mm, Glaskeramik) für ein hochpräzises Interferometer; **links:** ungefitteter Diagonal-Höhenverlauf mit 40 nm p-v beziehungsweise  $\lambda/15$  p-v; **rechts:** drei mit einem Kreisfit von  $r = 180,4$  km versehene um je 60° versetzte Diagonalschnitte, Abweichung 16 nm p-v beziehungsweise  $\approx \lambda/40$ .

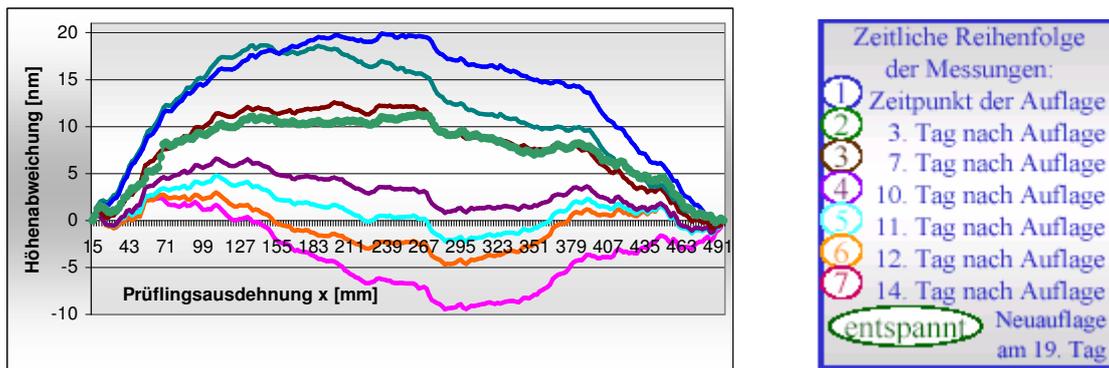


**Fig. 19** Mittelteil von 75 mm Durchmesser eines Referenznormals aus Quarzglas, das vor ca 40 Jahren hergestellt worden war; **links** Höhenabweichungen ungefittet 7,6 nm p-v; **rechts** Höhenabweichungen nach Radiusfit von  $R= 104$  km: 1,7 nm p-v ( $\lambda/400$ ) bzw. 0,47 nm rms ( $< \lambda/1000$  rms).

Im Ergebnis dieses Beispiels konnte nachgewiesen werden, dass Referenznormale ihrer Bedeutung gemäß sehr exakt auf der NOM vermessen werden können.

### 3.15 Messungen von zeitlichen Veränderungen mit der NOM

An der im Abschnitt 3.14 gezeigten Glaskeramikplatte wurden zeitliche Formveränderungen vermutet. Auf der NOM sind auch zeitliche Formveränderungen innerhalb von 19 Tagen festgestellt worden. Ein Glaskeramikkörper (NOK-Prüfkörper) von 510 mm Länge wurde unter der NOM ohne, dass er berührt wurde, beobachtet. Die gemessenen Formveränderungen sind in Fig. 20 dargestellt.



**Fig. 20** Formveränderungen eines 510 mm langen Glaskeramikkörpers innerhalb von 19 Tagen. Als Ursachen dieser Formveränderungen wurden bimorphe Auflagespannungen nachgewiesen. Nach Beseitigung der Ursachen am 19. Tag hat sich nicht sogleich die Ausgangsform wieder eingestellt. Es liegt kein rein elastisches Verhalten vor.

Die Ursachen für die Formveränderungen sind im wesentlichen durch bimorphe Spannungen in der Auflage zu erklären; diese Ursachen wurden auch beseitigt. Warum sich damit der Körper nicht sogleich wieder in seine ursprüngliche Ausgangsform zurück entwickelt hat, war in diesem Fall nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Dieses Beispiel soll jedoch zeigen, dass es möglich ist, Formveränderungen von optischen Komponenten infolge von Spannungen etwa des Halterungssystems, infolge von Temperatureinflüssen, infolge der Schwerkraft oder aus anderen Ursachen in größeren zeitlichen Abständen messtechnisch mit Subnanometergenauigkeiten zu erfassen.

Die Erfassung von kontinuierlichen zeitlichen Veränderungen in zeitlichen Veränderungsgradienten  $dV$  über einer Messlänge von ca. 500 mm mit Empfindlichkeiten von  $dV < 1 \text{ nm/Tag}$ , wie mit der NOM nachgewiesen, stellt eine neue Qualität in der Längenmessung dar und kann für die Erfassung von Materialeigenschaften, wie beispielsweise das Fließverhalten von Glaskeramik, wichtige Aussagen ermöglichen.

### 3.16 Mögliche Einsatzerweiterungen der NOM

Aufgrund der mit der NOM erreichbaren Genauigkeiten ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Einsatzerweiterungen.

1. Der technologische Prozess der Feinbearbeitung mit höchsten Formgenauigkeiten kann mit der Beurteilung großer Werkstückareale im Gesamtformgenauigkeitsbereich von Subnanometern auf eine neue Ebene gestellt werden. Das bezieht sich sowohl auf die Weiterentwicklung der klassischen Poliertechnik (siehe Abschnitt 3.9, zum Beispiel Temperatureinflüsse von Tragkörpern), also Großflächenbearbeitung, wie auf punktuelle Korrekturverfahren, wie das Ionenstrahl-Finishing. Dabei sind auch eine Reihe empfindlicher Kriterien mit der NOM erzielbar, die eine Reihe von Bearbeitungsschritten vor dem Finishing mit erfassen kann. Ebenfalls lassen sich Korrelationen zwischen der Makrogeometrie (NOM im lateralen mm-Auflösungsbereich) und der Mikrogeometrie (in lateralen  $\mu\text{m}$ - beziehungsweise lateralen nm-Auflösungsbereichen) erforschen, weil die Höhenmessgenauigkeiten in allen diesen Bereichen, also auch korrekte Aussagen über große Flächen, im Subnanometerbereich erlauben.
2. Die Materialforschung läßt durch Messungen mit der NOM materialspezifische Differenzierung zwischen elastischer und plastischer Verformung über das zeitliche Verhalten von Formveränderungen  $< 1 \text{ nm/d}$  zu.
3. Die Wirkung von Fassungs- oder Kühlsystemen für hochgenaue optische Komponenten läßt sich mit der NOM im Genauigkeitsbereich von Subnanometern überprüfen.
4. Bewegungssysteme für adaptive Optik und ihre Langzeitstabilität lassen sich mit der NOM bis in den Subnanometerbereich auf ihre Wirkung hin untersuchen.
5. Schichten von Spiegeln sind in ihrer Dicke und in der Konstanz der Dicke prüfbar.
6. Qualitätsprüfung von optischen Gittern, insbesondere auch von VLS-Gittern (varierte Liniendichte), in Littrowanordnung.
7. Die Untersuchungen von optischem Glas mit der NOM könnten Aussagen über Feinschlieren und Inhomogenitäten in Bereichen um  $dn < 10^{-7}$  ermöglichen.

Solche zukünftig möglichen Einsatzgebiete der NOM für Aussagen von bisher kaum möglicher Genauigkeit basieren im Prinzip immer auf der hochgenauen Erfassung der Ablenkung eines Lichtstrahls von 1 bis 2 mm Apertur mit nachgewiesenen Genauigkeiten  $< 0,01 \text{ arcsec rms}$  und bei Reproduzierbarkeiten  $< 0,005 \text{ arcsec rms}$ , die mit der NOM im einfachen Deflektometrieverfahren nachgewiesen wurden. Aus diesem Tatbestand resultieren die in diesem Hauptabschnitt angeführten Ergebnisse der Projektentwicklung.

### 3.17 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das wesentliche Ergebnis besteht in dem Nachweis, wie in den vorangestellten Abschnitten detailliert ausgeführt wurde, dass Deflektometrie-Verfahren geeignet sind, hochgenaue optische Komponenten mit Ausdehnungen bis zu  $1 \text{ m}^2$  zu charakterisieren und zwar ausschließlich mit dem Direktbezug auf die messtechnischen Grundgrößen für Weg und Winkel ohne Zuhilfenahme von Referenzflächen. Damit ist ein neues Messverfahren unter Beweis gestellt.

Die mit der Nano-Optik-Messmaschine NOM nachgewiesenen Ergebnisse beziehen sich nicht nur auf die erfolgreiche Anwendung für die Charakterisierung von optischen Komponenten für die Synchrotronstrahlung, sondern darüber hinaus auf grundsätzlich neue Möglichkeiten und Erkenntnisse für wesentliche Felder der Optiktechnologie, insbesondere für die Herstellung hochgenauer Optikkomponenten.

Die in den vorausgehenden Abschnitten erläuterten 15 Einzelergebnisse stellen nicht nur für BESSY neue Erkenntnisse und Möglichkeiten dar, sondern auch für die Synchrotronstrahlung Community und für Hersteller und Anwender von präzisen optischen Komponenten.

Die Ergebnisse weisen Neuheiten auf den Feldern der Längenmesstechnik, der Optiktechnologie und der Synchrotronstrahltechnik auf.

## 4. Nutzen

### 4.1 Bereits erbrachter Nutzen

#### 4.1.1 Der Nutzen für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung

Der Nutzen für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung im VUV – Bereich, beispielsweise bei BESSY besteht im wesentlichen darin, dass im optischen Messlabor bei BESSY in Berlin-Adlershof die Nano-Optik-Messmaschine NOM zur Verfügung steht, funktionsfähig ist und bereits seit Mitte des Jahres 2002 zunehmend als Messmittel mit allen im Hauptabschnitt 1 angeführten Möglichkeiten eingesetzt werden konnte. Der Nutzen des Einsatzes der NOM erstreckt sich auf folgendes:

1. Einsatz des NOK-Demonstrators asphärischer Spiegel durch Austausch für die Fokussierung an der Beamline U 49 SGM, der eine dreifache Fokussierung zur Folge hatte. Der ursprüngliche Spiegel wies Winkeltangentenabweichungen von 1,1 arcsec rms auf, während der neue 10 mal genauer ist: 0,1 arcsec rms (siehe auch Abschnitt 1.11)
2. Einsatzbereitschaft eines optischen Gitters, dessen Winkeltangentenabweichungen 0,02 arcsec rms aufweisen (NOK-Demonstrator, siehe u.a. Abschnitt 1.3) sowie eines 310 mm langen Planspiegels (0,04 arcsec rms- ebenfalls NOK-Demonstrator) als wesentliche optische Komponenten im Monochromator einer neuen Beamline, die sich gegenwärtig im Aufbau befindet, und damit eine wesentliche bisher nicht erreichte Steigerung der spektralen Auflösung erreichen wird.
3. Nach den NOK-Erkenntnissen ist die technologische Grenze abgesenkt. Die höhere Genauigkeit kann mit der NOM bei BESSY nachgewiesen werden. Diese beiden Aspekte versetzen BESSY in die Lage, bereits gegenwärtig bei Design und Aufbau von neuen Baemlines höhere Grade der Monochromatisierung und Fokussierung der Synchrotronstrahlung anzustreben (Steigerung der Brillanz und der spektralen Auflösung). Damit sind weitere entsprechende Leistungssteigerungen, wie in Punkt 1 und 2 bereits konkretisiert, verbunden.
4. Mit den Erkenntnissen, die durch dieses Projekt gewonnen wurden, ist BESSY in der Lage, die nach Spezifikation von verschiedenen Herstellern gelieferten optischen Komponenten besser zu beurteilen und entsprechend effektiver einzusetzen.

5. Durchführung von Messungen an verschiedenen optischen Komponenten, die bei BESSY eingesetzt wurden und werden. Die mit der NOM-Anwendung einhergehende Ablösung des seit 1994 im Einsatz befindlichen Messgerätes LTP bedeutete nicht nur höhere Qualität der Messergebnisse (Aussagefähigkeit durch 3-D-Profilometrie und höhere Messgenauigkeit), sondern auch weniger personellen Einsatz für die Bearbeitung der routinemäßig anstehenden Aufgaben.
6. Bei BESSY können für Entwicklungsarbeiten beispielsweise an adaptiven Spiegeln erforderliche Messungen durchgeführt werden, die ansonsten nicht möglich gewesen wären.

Der gegenwärtige Nutzen für BESSY ist also im wesentlichen durch die mit den Punkten 1 bis 6 angeführten Nutzenmerkmale, die sich im wesentlichen als wissenschaftlicher Nutzen niederschlagen und dem Hauptziel der gemeinnützigen BESSY mbH dienen, ihren Nutzern verbesserte Synchrotronstrahlung bereitzustellen. Der für BESSY ausgewiesene Nutzen kann allgemein in jedem Synchrotronstrahlungslabor relevant sein. Diese Nutzenmöglichkeiten stehen den Synchrotronstrahlungslabors weltweit entweder durch bereits vielfach erfolgte Kooperation mit BESSY oder durch zukünftige Anwendung der Erkenntnisse zur Verfügung.

#### **4.1.2 Der Nutzen für die Optiktechnologie**

Der Nutzen für andere des bei BESSY durchgeführten Teilprojekts zur Verbesserung der Messtechnik mit der Errichtung der NOM bei BESSY tritt insbesondere bei einer Reihe von Partnern des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten NOK ein, der sich die über den wissenschaftlichen und technischen Informationsaustausch hinaus für jeden unterschiedlich ergab:

1. Messtechnikvergleich mit unterschiedlichen Messverfahren bei Optikherstellern und wissenschaftlichen Instituten zur gegenseitigen Bestätigung von Messergebnissen an identischen Prüfkörpern.
2. Richtmaß für das Finish-Bearbeiten, insbesondere durch Ionenstrahlpolitur bis in den Genauigkeitsbereich von 0,2 nm rms.
3. Neue Beurteilung von klassisch bearbeiteten Präzisionsflächen.
4. Messung von hochpräzisen Prüfkörpern, wie Interferometernormalen, Probegläsern und Kalibriermaßverkörperungen.

#### **4.2 Zukünftiger Nutzen**

Der voraussichtliche Nutzen dieses Projektes besteht im wesentlichen in dem wissenschaftlichen Nachweis, dass es mit Deflektometrieverfahren - verifiziert mit der NOM bei BESSY - möglich ist, die technologische Grenze für Nanometer-Optikkomponenten, also für hochgenaue optische Komponenten, wie sie für Synchrotronstrahlung angewendet werden, auf 20 % der bisherigen Grenze von 0,1 arcsec rms zu senken, indem die Messgenauigkeit um das 10 fache gesteigert wird. Aus diesem Nachweis leitet sich der voraussichtliche Nutzen für die Zukunft in verschiedener Hinsicht ab.

Einschränkend muss hier aber sogleich betont werden, dass der voraussichtliche Nutzen im wesentlichen davon abhängt, wie diese Innovation zukünftig ausgebaut und angewendet wird. Weil es sich bei der NOM nicht nur um eine Messmaschine im herkömmlichen Sinne handelt, sondern weil hier neue Prinzipien angewendet werden, besteht bei der kurzfristigen Umsetzung vielfach gewisse Befangenheit gegenüber dem Neuen, welche sich entwicklungs-

mend auswirkt. Daher wird der Nutzen dieser Entwicklung mit sehr großer Wahrscheinlichkeit erst langfristig auftreten, so wie Ergebnisse von Grundlagenforschung vielfach auch schwer einen in wirtschaftlichen Daten ausdrückbaren Nutzen für kurzfristige Zeiträume nachweisbar sind.

Ungeachtet dieser Einschränkung zur gezielten und konzentrierten Weiterentwicklung der Thematik wird sich der erbrachte Nutzen fortsetzen.

Bei BESSY wird die NOM vielfach zur Bewertung von optischen Komponenten eingesetzt werden. Durch ihre Einzigartigkeit wird sie durch Kooperation mit Komponenten- Herstellern und -Anwendern von Bedeutung sein, die über die interne Nutzung bei BESSY hinausgeht. Der Erfinder der Gleitfocus-Brillengläser und Gründer des Optik-Instituts, das 40 Jahre an der Akademie der Wissenschaften in Berlin-Adlershof bestand, Ernst Lau, sagte mir, dem Verfasser des vorliegenden Berichts, er hätte Ende der Vierziger Jahre des vorigen Jahrhunderts folgenden Satz in einen Bericht geschrieben: „Wer diesen Satz liest, kann sich bei mir einen Beutel Tabak abholen.“ Heute möchte ich einen vergleichbaren Preis für denjenigen aussetzen, der sich bezüglich dieses Absatzes bei mir per e-mail meldet und die Codenummer 120966 nennt. Sowohl Synchrotronstrahlungslabore als auch namhafte Hersteller optischer Komponenten haben bereits Aufträge zur Vermessung von ebenen oder asphärischen Komponenten an BESSY vergeben.

Andererseits werden die Kooperationen mit der NOM international ausstrahlende Wirkungen erzielen. So ist ein über Europa, Amerika und Asien ein ausgedehntes Informationsaustauschprogramm zum Vergleich von Messergebnissen insbesondere in Synchrotronstrahlung- Laboren vereinbart und angelaufen. Dabei besteht international der Wunsch, die Messergebnisse der NOM mit den eigenen zu vergleichen,

Weiterhin wird der bereits erbrachte Nutzen in den nächsten Jahren bei BESSY von Bedeutung bleiben beziehungsweise sich noch verstärken. So wird ein wissenschaftlicher Nutzen auch durch die Anwendung der genaueren optischen Komponenten in Synchrotronbeamlines bei BESSY die Strahlqualität bezüglich der Fokussierung und der spektralen Auflösung wesentlich verbessern, um damit Verbesserungen der Forschung mit Synchrotronstrahlung zu erreichen, (siehe auch [11]). Vielfach werden neue Grundlagenexperimente, so auf dem Gebiet magnetischer Strukturen, zum Beispiel durch stark minimierte Foci erst ermöglicht. Für die zukünftig geplante Errichtung eines Freien Elektronen Lasers bei BESSY ist es möglich, die erforderlichen Genauigkeiten der optischen Komponenten nach dem höchstmöglichen Stand zur Verfügung zu stellen.

Allgemein können sich zukünftig erhebliche Schübe sowohl in der Optikechnologie wie auch bei der Forschung mit Synchrotronstrahlung ergeben, wenn das 10 fache Anheben möglicher Messgenauigkeit in einem breiteren Maße als gegenwärtig für die nächsten Jahre absehbar ist, zum Tragen kommen wird. Damit wird der größte Teil der erläuterten Ergebnisse des Projektes zukünftigen Nutzen erbringen.

## 5 Fortschritt bei anderen Stellen – Internationaler Vergleich

Die internationale Entwicklung wird ähnlich wie bei BESSY intensiv in den einschlägigen Synchrotronlaboren vorangetrieben. Dabei besteht für die Deflektometrieverfahren zur Prüfung von optischen Komponenten zur Anwendung mit Synchrotronstrahlung (Nanometer-

Optikkomponenten - NOK - ) seit ca 20 Jahren ein starker Bedarf an NOK und deren Messtechnik. Es kam eine Erfindung von 1988 aus dem Synchrotronstrahlungslabor in Brookhaven National Laboratory in Brookhaven/USA [2] so zum Tragen, dass heute weltweit ca. 20 Geräte LTP unterschiedlicher Modifikation vorwiegend in den optischen Messlaboren der Synchrotronstrahlung Community (SR) die Grundausstattung bilden. Der Steigerungsbedarf an dieser hochgenauen Messtechnik führte im Jahre 2000 zu einem ersten internationalen Workshop über Erfahrungen im Einsatz des LTP [12], [13] in Argonne/Chicago. Während dieser Zeit zeichnete sich als zusammengefaßter Stand der Messtechnik die damalige technologische Grenze von 0,1 arcsec rms für die Messunsicherheit ab.

Im April 2004 fand ein Fortsetzungsworkshop bei der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble/Fr. statt. Die Weiter- und Neuentwicklung von NOK-Messtechnik war Gegenstand von insgesamt 13 Gruppen aus 8 Ländern Europas, Amerikas und Asiens, die auf diesem Workshop vorgestellt wurden [14]. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse dieser Entwicklungen, wie sie von den einzelnen Gruppen vorgestellt wurden, zusammengefaßt. Es sind vier verschiedene Messprinzipien der Oberflächenmesstechnik angewendet worden: die Deflektometrie (LTP, NOM, ESAD), Interferometrie und Stitching Interferometrie, Shak-Hartmann-Sensor.

Die Deflektometrie-Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie große Messlängen (zum Beispiel 1000 mm oder mehr) und im allgemeinen eine Winkelakzeptanz von 2000 arcsec ermöglichen, minimale Krümmungsradien ab 1 m konvex und konkav. Die erreichte Genauigkeit bewegt sich bei den speziellen LTP-Entwicklungen in Frankreich und in Italien (ESRF und ELETTRA) zwischen 0,04 und 0,1 arcsec rms, während das ESAD-Verfahren bei der PTB und die NOM bei BESSY 0,01 arcsec rms erreicht haben. Dementsprechend genau sind auch die Höhenabweichungen allgemein zwischen 1 und 10 nm rms gegenüber ESAD und NOM mit 0,3 nm rms. Die angegebenen Reproduzierbarkeiten sind entsprechend.

Ebenfalls deutlich wird der Vergleich, wenn Linienmessungen und 3-D-Topographie miteinander verglichen werden. Die Wellenfront-Verfahren Interferometrie und Shak-Hartmann-Sensor, die ja entsprechend genaue Referenzverkörperungen benötigen, lassen zwar 3-D-Profilometrie zu, erreichen jedoch im allgemeinen nicht die Genauigkeit der Deflektometrie-Verfahren. Lediglich die NOM läßt 3-D- Topographie von der gleichen Genauigkeit Ihrer Linescanmessungen zu. Die laterale Auflösung liegt bei den Deflektometrieverfahren im Bereich von 1 bis 2 mm, bei den Wellenfront-Verfahren im 0,1 mm-Bereich.

Entsprechend dem Entwicklungsstatus der einzelnen Verfahren gibt es gegenwärtig auf dem Markt einen LTP (Ocean Optics), einen Shak-Hartman Sensor (Imaging Optics) und eine Stitching-Interferometriemethode (MB Optics). Die übrigen vorgestellten Messverfahren sind in unikalenen Laboraufbauten verifiziert. Die NOM ist zwar auch unikal, sie verkörpert jedoch in Konstruktion und Ausführung den Prototypen einer in kommerziellen Messlaboren einsetzbaren Messmaschine. Insgesamt kann festgestellt werden, dass bei anderen Stellen im internationalen Rahmen bei 12 verschiedenen kommerziellen Firmen und Instituten in 8 verschiedenen Ländern wesentliche Fortschritte zu verzeichnen sind: Sechs Verfahren wurden weiter entwickelt und modifiziert (1;3;4;5;9;10) und neun Verfahren wurden neu entwickelt oder auf neue Weise kombiniert (2;6;7;8;11;12;12;12;13).

The Second International Workshop on Metrology for X-ray Optics, ESRF, Grenoble, F, 1-2 April 2004  
**Compilation of typical parameters of the rejuvnet precision measuring methods and new equipments for characteri-  
 sation of optical SR components.** Nearly 50 participants from 10 different countries with talks of 15 SR-facilities or  
 optic orientated laboratories and industrial organizations. Here assembled of the author papers in the editor pro-  
 ceedings of this workshop Olivier Hignette by Heiner Lammert. Berlin-Adlershof July 6, 2004.

No.	Facility	Country	Persons	Measuring principle	Measuring result	2				3		4		5	6	7			
						measuring range				accuracy		reproducibility					lat.	free of a reference surf. ?	Development status
						Surface cm <sup>2</sup>	length mm	Angle arc-sec	Minima Radius m	rms arcsec	rms nm	rms arcsec	rms nm				Resolu-tion mm		
1	APS	USA	Assoufid	stich.int LTP	3 D mapp. linescans	1300	2000				<5			1...2	no yes	Laboratory device			
2	BESSY (NOK)	D	Lammert Siewert, Zeschke,...	Deflectometry <b>NOM</b>	Linescans + 3 D mapp.	3600 (*2)	1200	2000	1	0.02 <0.01	0.3 <0.3	0.002 0.001	0.1 <0.1	1...2 1...2	yes yes	Measuring machine			
3	BNL	USA	Takacs	LTP	linescans	-	1000	2000		0.1	<3	0.005	<0.5	1...2	yes	Laboratory device			
4	ELETRA	IT	Cocco Bianco	LTP	linescans	-				<0.1		0,01			yes	Laboratory device			
5	ESRF	EU/F	Hignette Peverini, del Rio, Ziegler Rommeveaux	LTP	linescans	-	1500			<0.04	<2	<0.006			yes	Laboratory device			
6	Imaging Optics	F	Levecq	Shack Hartmann	3 D mapp.	1,4	11,7	6000	0,2	0.01	0.6		0.3	0.5		commercial sensor			
7	IOM (NOK)	D	Schindler Hänsel Nickel,...	stiching intereferometry	NOM 3 D mapp. 3 D mapp.	a x 20	a x 100	20	100	-	5	-	0.1	0.1	no	guest NOM comm.Int.			
8	I.I.Astr.oph.	India	Saxena	LTP	linescans	-	900	2000		0.3					no	Laboratory device			
9	MB-Opt.	F	Bray	stich.interefer.	3 D mapp.	-					5			1	no	Commercial method			
10	Ocean Optics	USA	Walters Rose	LTP	linescans	-	1500	2000		<0,1	<10			1...2	yes	Commercial device			
11	PTB (NOK)	D	Weingärtner Schulz Geckler, Illemann	deflectometry ESAD	linescans	-		600	80	<0,01	<0,3	<0,01	<0,1	5	no	Laboratory device			
12	SOLEIL	F	Pollack, Idir Oliviera, Thomaset Moreno	Shack-Hartman LTP Diff.Int-ferom.	3 D mapp. ang.calibr.	1,4	700			0.005			0.1	0,02 25 nrad	no	lab.test			
13	Uni Osaka Spring 8	Jp	Yamauchi Mimura	micro stich. interferometry	3 D mapp.	< 80	100	100	200		>1		1	0.1	no	Laboratory device			

**Tab. 4** Internationaler Vergleich

Im Vergleich dieser unterschiedlichen Verfahren nach Tabelle 4 bezüglich

- des Anwendungsbereiches (Messbereiche Länge, Breite, Winkelakzeptanz und 3-D-Profilometrie),
- der erreichbaren Genauigkeit,
- der Unabhängigkeit von Referenzverkörperungen und
- des Entwicklungsstatus

liegt die BESSY-Entwicklung Nano-Optik-Messmaschine NOM mit den in diesem Bericht diskutierten Ergebnissen an der Spitze. Lediglich in der lateralen Auflösung sind die Wellenfront-Verfahren den Deflektometrie-Verfahren gegenwärtig noch überlegen.

Der zukünftige Fortschritt an anderen Stellen wird gekennzeichnet sein von der Absenkung der lateralen Auflösung mit Zielrichtung  $< 0,2 \text{ nm}$  und von der Erweiterung des Bereichs messbarer Krümmungen in Bereichen für den minimalen Krümmungsradius  $r$  im Bereich von  $1000 \text{ mm} < r < 10 \text{ mm}$ . Diese Zielrichtungen werden zukünftig auch bei BESSY verfolgt.

Entsprechend der führenden Position im internationalen Vergleich stellt die Innovation NOM eine zukunftssträchtige Entwicklung dar. Die Nachhaltigkeit dieser Innovation wird jedoch von einer breiteren Anwendung, vom weiteren Ausbau und von den entsprechenden Fortschritten gekennzeichnet sein.

## Teil 2

### Das Forschungsverbundprojekt Nanometer-Optikkomponenten - NOK -

#### **0. Einführung**

Das Forschungsverbundprojekt Nanometer-Optikkomponenten NOK überdeckte seit seiner Vorbereitung ab Ende 1998 bis zum Abschluss einen Zeitraum von ca. sechs Jahren. Die Bewilligung zur BMBF-Förderung erfolgte zum 1. Februar 2001. In diesem Zeitraum haben die 11 aktiven Partner die Arbeitsaufgaben definiert, durchgeführt und abgeschlossen.

Die mit der Antragstellung für den Verbund definierten Ziele wurden insgesamt seit Projektstart angestrebt und können zum Abschluss als voll erreicht angesehen werden. Mit diesem Ergebnis kann erfreulicherweise insbesondere von BESSY der Erfolg des Verbundprojekts bestätigt werden. Die hier vorliegende zusammengefaßte Berichterstattung zur Koordinierung des Verbundprojekts befaßt sich mit den beiden wesentlichen Teilen Aufgabenstellung, sowie über partnerübergreifende Ergebnisse des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten.

#### **1. Aufgabenstellung und Partner des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten**

Die generalisierte NOK-Aufgabenstellung

„Herstellung und Vermessung superglatte Oberflächen für optische Komponenten mit spezieller Anwendung in der Synchrotronstrahlungsforschung bei Genauigkeiten, die sich jenseits der gegenwärtigen technologischen Grenzen befinden“

war während des gesamten Verlaufs das Leitthema sowohl für die organisatorischen Aktivitäten im Verbundprojekt als auch für seine Inhalte. Dieses Leitthema wiederum läßt sich in einer einzigen Zahl komprimiert darstellen, nämlich der technologischen Grenze von 0,1 arcsec rms als Maß für die Formeinhaltung der Winkeltangentenabweichungen („slope error“) von optischen Komponenten für die Anwendung bei Synchrotronstrahlung, kurz NOK genannt. Der Bedarf für die höheren Genauigkeiten der NOK-Formabweichungen ergab sich aus dem bei BESSY erkannten Erfordernis, Brillanz und spektrale Auflösung von Synchrotronstrahlung bei Strahlführung und Monochromatisierung zu steigern. Für den Nachweis der erfolgreichen Zusammenarbeit waren als sogenannte Demonstratoren drei hochgenaue optische Komponenten für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung definiert.

Die Partner des Verbundprojekts arbeiteten in zwei Arbeitsgruppen:

##### **1. AG Technologie- Entwicklung mit den Partnern**

1.1 Leibniz-Institut für Oberflächemodifizierung Leipzig – IOM (Koordinierung der AG)

1.2 Jenoptik – Jena, Laser Optik Systeme GmbH

1.3 Friedrich Schiller Universität Jena, Technisches Institut

1.4 Optik Komponenten und Kristalle GmbH, Berlin Adlershof

## 2. AG Messtechnik-Entwicklung mit den Partnern

- 2.1 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Labor für Bildmesstechnik Braunschweig
- 2.2 Möller-Wedel Optical GmbH, Wedel
- 2.3 Schnabel – Elektronische Messtechnik, Wedel
- 2.4 Berliner Glas GK, Berlin
- 2.5 Optik und Elektronik Geräte GmbH - OEG - , Frankfurt (Oder)
- 2.6 Carl Zeiss Oberkochen, Laser-Optics GmbH
- 2.7 BESSY - GmbH (Koordinierung der AG)

Die Koordinierung des Verbundprojekts NOK wurde von BESSY durchgeführt. Organisation, zeitlicher Ablauf und wesentliche Ereignisse sind in dem Schlussbericht NOM-NOK [15] näher angeführt.

### 2. Ergebnisse des des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten

Die jeweiligen Ergebnisse der einzelnen Partner des Verbundprojekts sind in den jeweiligen Berichten enthalten und werden hier im Detail nicht genannt und kommentiert. Jedoch haben sich aus dem Verbund heraus verschiedene Ergebnisse als wesentlich herausgestellt. Diese Ergebnisse aus dem Verbundprojekt in ihren komplexen Aussagen sollen hier genannt und in ihrer überinstitutionellen Bedeutung gewürdigt werden. Zur Demonstration der Ergebnisse sind im folgenden in der Anlage befindlichen Auszüge aus dem Vortrag des Koordinators zum Abschlussmeeting des Verbundprojekts am 6. Oktober 2004 bei BESSY in Berlin [16 (Folie 1)] angeführt.

Die Struktur des Verbundprojekts ist durch die zwei Arbeitsgruppen [16 (Folie 2)] Technologieentwicklung und Messtechnikentwicklung gekennzeichnet, deren Kostenaufteilung sich ungefähr wie 60 (T) zu 40 (M) der insgesamt 3,1 Mio Euro Projektkosten aufteilen.

Die Zielstellung war prinzipiell geleitet von der Verschiebung der technologischen Grenze von 0,1 arcsec rms für Komponenten für die Synchrotronstrahlung, damit diese die am Speicherring vorhandenen Eigenschaften der Synchrotronstrahlung hinsichtlich Fokussierung und spektrale Auflösung [16 (Folie 3)] zur Geltung bringen können. Bezüglich der technologischen Grenze ist zu bemerken, dass diese ja vornehmlich durch die Messtechnik bestimmt wird und in der Vergangenheit sich stetig aber sehr langsam entwickelt hat durch die jeweils bestimmenden Messmethoden der Probegläser und durch die Interferometer. Zur Erzielung der Genauigkeitssteigerung um eine Größenordnung waren in der Vergangenheit ungefähr jeweils 100 Jahre Entwicklungszeit erforderlich [16 (Folie 4)]. Wenn mit der in diesem Verbundprojekt entwickelten Deflektometriemethode bereits innerhalb von 15 Jahren die Genauigkeit um eine Größenordnung gesteigert werden sollte, so vermag man eine solche Zielstellung in diesem Jahrhundertrahmen für sehr schwer erreichbar halten. Die nachfolgend angeführten Ergebnisse jedoch belegen, dass diese Zielstellung durchaus erreichbar war.

Wesentliche Etappen der AG Messtechnik sind durch deren Aktivitäten gekennzeichnet, die in [16 (Folie 5)] angeführt sind. Die Koordinierung innerhalb dieser Gruppe aber auch zwischen den beiden Arbeitsgruppen ist durch Messungen bei BESSY gekennzeichnet, die vornehmlich auf der bereits frühzeitig bereitstehenden NOM zu sehr genauen Ergebnissen führten [16 (Folie 6)].

Die Ergebnisse des Verbundprojekts können in 4 unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden [16 (Folie 7)]:

1. Die Demonstratoren
3. Fortschritte in der Messtechnik
4. Fortschritte in der Bearbeitung optischer Komponenten
5. Neue Messmethoden gegenüber den herkömmlichen Verfahren.

Zu bewerten sind diese Ergebnisse nach den im Jahre 2000 mit Antragstellung des Verbundprojekts definierten Ziele, zum Beispiel für eine ebene Komponente 0,02 arcsec rms bzw. 1,5 nm rms oder für eine Asphäre 0,05 arcsec rms oder 3 nm rms [16 (Folie 8)]. Für die Messtechnik war die Zielstellung drei- bis vier mal genauer definiert.

## 2.1 Zielerfüllung für drei NOK-Demonstratoren

### NOK-Ergebnis 1

Die drei mit Projektbeantragung festgelegten NOK-Demonstratoren liegen mit Projektabschluss vor [16 (Folie 9)].

#### NOK-Ergebnis 1.1

Erster NOK-Demonstrator ist ein asphärischer Spiegel von 210 mm Länge. Ziel und Ergebnis sind für die Winkeltangentenabweichungen 0,1 arcsec rms. Bis dato war der Stand der Technik 0,5 arcsec rms als Standardgrenze für solche asphärischen Spiegel. Im Einsatz bei BESSY hat dieser Spiegel eine Fokusreduzierung von 43  $\mu\text{m}$  auf 17  $\mu\text{m}$  erreicht.

#### NOK-Ergebnis 1.2

Der zweite Demonstrator ist ein ebenes Gittersubstrat von 100 mm Länge, Ziel und Ergebnis: 0,02 arcsec rms. Als Einhaltung für die Formgenauigkeit war  $< 1$  nm rms als Ziel definiert, erreicht wurden  $< 0,4$  nm rms. Diese Genauigkeit entspricht auch einem Fünftel gegenüber der vormaligen technologischen Grenze.

#### NOK-Ergebnis 1.3

Für den dritten Demonstrator, einem Planspiegel von 300 mm Länge war eine Zielstellung von 0,03 arcsec rms gestellt, erreicht wurden 0,04 arcsec rms.

Die beiden letztgenannten Demonstratoren werden im Jahre 2005 bei BESSY in einer Beamline eingesetzt, von der wesentlich höhere als bisher mögliche Ergebnisse erwartet werden.

Mit diesen drei NOK-Demonstratoren liegen Komponenten vor, die nicht nur messtechnisch die Zielerfüllung dokumentieren, sondern auch ihre Nützlichkeit und Bedeutung durch wesentliche Qualitätsverbesserung bei der Synchrotronstrahlung nachweisen und damit auch die Bedeutung der nachfolgend angeführten Ergebnisse aufzeigen.

## 2.2 Fortschritte in der Messtechnik durch Deflektometrieverfahren

### NOK-Ergebnis 2.1

Die Fortschritte durch die im NOK-Verbundprojekt angewendeten Messtechnikverfahren sind durch die neuen Deflektometrieverfahren gekennzeichnet [16 (Folie 10)]. Bei Möller Wedel Optical GmbH wurde ein Autokollimationsfernrohr (AKF) neuen Typs entwickelt. Kennzeichnend sind dafür eine kleine Apertur, die bis unter 2 mm reduzierbar ist und somit für Deflektometriemessungen an optischen Präzisionsoberflächen einsetzbar ist. Ein solches AKF wurde bei der PTB in Braunschweig und bei BESSY an der NOM erprobt und eingesetzt.

### NOK-Ergebnis 2.2

Das bei der PTB entwickelte ESAD – Verfahren zielt auf ein nationales Ebenheitsnormal der PTB; es ist unabhängig von Prüflingsverlagerungen beim Scannen über längere Messzeiten. In einem Meßaufbau sind hohe Genauigkeiten  $< 0,2$  nm rms für Linienmessungen einer Planfläche erzielt worden.

### NOK-Ergebnis 2.3

Bei BESSY wurde nach einem Hybrid-Deflektometrieverfahren mit einem AKF-Sensor von Möller Wedel optical und mit einem LTP-Sensor der Prototyp einer Messmaschine entwickelt und erstellt [16 (Folie 11)]. Wesentliche Ergebnisse sind unter anderem die hohen Messgenauigkeiten und die Möglichkeit der 3-D-Topographie-Messung von ebensolchen Genauigkeiten (siehe Teil 1).

Mit einem Genauigkeitsvergleich innerhalb des NOK-Verbundprojekts zwischen den Ergebnissen einer ESAD-Messung bei der PTB und einer NOM-Messung bei BESSY an einem identischen NOK-Prüfkörper, der von Berliner Glas KG hergestellt worden war, wurde Übereinstimmung von  $< 0,3$  nm rms zwischen beiden Messeinrichtungen festgestellt (Messlänge 130 mm; Messfleckgröße 5 mm; Messpunktabstände 1 mm). Damit sind solche hohen Messgenauigkeiten von jeweils  $< 0,2$  nm rms bei ESAD und bei NOM abgesichert.

## 2.3 Fortschritte in der Bearbeitung optischer Komponenten

### NOK-Ergebnis 3.1

Als besonderes Ergebnis der Zusammenarbeit innerhalb des NOK-Verbundes sind die NOK-Demonstratoren anzusehen. Die Zielstellung, eine Planfläche mit 0,02 arcsec rms Winkeltangentenabweichungen zu erstellen, wurde vollständig erreicht. Die in [16 (Folie 12)] dargestellten Messergebnisse zeigen für den Linienscan und für die 3-D-Topographie nicht nur die 0,02 arcsec rms, sondern auch Höhenabweichungen von 0,3 nm rms, also noch unterhalb der Zielstellung von 0,5 nm rms [16 (Folie 8)]. Dieses genaue Ergebnis wurde mit Messergebnissen des Direkt 100 beim IOM in Leipzig mit Ortsauflösung  $< 0,2$  mm und mit Kontrollmessungen der NOM bei BESSY gewonnen.

### **NOK-Ergebnis 3.2**

Als Neuheit wird die Erkenntnis gewertet, dass man mit der klassischen Optiktechnologie bei flächenüberdeckender Pechpolitur mit „Selbstkorrektoreffekt“ sehr glatte Flächen erzeugen kann. Diese Erkenntnis ist zwar nicht neu, aber die quantitative Beurteilung im Subnanometerbereich brachte eine überraschende Bestätigung der bisherigen Annahmen. In [16 (Folie 13)] ist in dem Diagramm links unten ein sehr typischer Verlauf zu erkennen mit einer Form-einhaltung von  $\approx \lambda/15$  (48 nm p-v), eine Genauigkeit, die mit dieser Quantifizierung der Höhenabweichungen bisher als hochgenaues Fertigungsergebnis galt. Betrachtet man jedoch einen Mittelteil (hier 70 %) so zeigt sich, dass eine sehr glatte flache Kreiskrümmung vorliegt. Die Messung mit der NOM zeigt nach einem Radiusfit Höhenabweichungen von 0,9 nm p-v ( $\approx \lambda/700$  p-v) beziehungsweise  $\approx \lambda/2500$  rms und Winkeltangentenabweichungen von 0,02 arcsec rms. Das hier dargestellte Ergebnis resultiert aus einer Planfläche für ein Gittersubstrat, das bei Berliner Glas KG hergestellt wurde. Im NOK-Rahmen von Jenoptik LOS hergestellte sphärische Flächen ( $R = 45$  m; Länge 210 mm) zeigten nach Messung mit der NOM vergleichbare Ergebnisse. Anwendungen dieser Erkenntnis können zukünftig für die Herstellung von Komponenten nach der klassischen Poliermethode wesentliche Fortschritte erbringen, wenn scannende Messverfahren, beispielsweise mit der NOM verwendet werden.

### **NOK-Ergebnis 3.3**

Ein weiteres Ergebnis des NOK-Verbundprojekts wird mit der in [16 (Folie 14)] gezeigten Asphäre, einem NOK-Demonstrator dargestellt. In mehreren Iterationsschritten wurde dieses Ergebnis (0,1 arcsec rms) durch Datentransfer von BESSY-NOM-Messergebnissen zu Berechnung und Abtragsteuerung des Ionenstrahlfinishings beim IOM in Leipzig erzielt (siehe auch Teil 1 Abschnitt 1.3 und 3.10). Zum Tragen kommen hier die beiden prinzipiellen Vorteile, dass Ionenstrahlfinishing quasi frei von Bearbeitungskräften ist und dass für die Deflektometriemessung keine Referenzfläche erforderlich ist.

### **NOK-Ergebnis 3.4**

Die Relation zwischen der Formerhaltung der gesamten Fläche (Makrogeometrie) und der Mikrostruktur („Rauheit“) beträgt in der Technik der optischen Flächen im allgemeinen eine oder mehrere Größenordnungen. Die in Ortswellenlängen von ca 1  $\mu\text{m}$  gemessene Mikrostruktur ist heute nach dem Stand der Polier- und Messtechnik in Bereichen um 0,2 nm rms erzielbar. Die Makrogeometrie war bisher 10 bis 50 mal weniger genau nachweisbar. Im Beispiel [16 (Folie 15)] ist gezeigt, dass sowohl die Makrogeometrie als auch die Mikrostruktur von gleicher Größenordnung sind: 0,38 nm rms und 0,21 nm rms, und das bei einem Flächenverhältnis von 40.000 ( $= 20 \text{ cm}^2 : 0,05 \text{ mm}^2$ ). Bei größeren Komponenten, wie beispielsweise beim NOK-Prüfkörper 510 (Hersteller Berliner Glas KG, NOK-Ergebnis 3.4) ist das Flächenverhältnis sogar 1.000.000 : 1. Zwar läßt diese Relation keine vollständige Aussage über alle Ortswellenlängenbereiche zwischen den lateralen Auflösungen von 2 mm und  $< 0,5 \mu\text{m}$  zu, jedoch zeugt dieses Ergebnis von einer bisher nicht bekannten Qualität für optische Flä-

chen. Dieses Ergebnis wurde erreicht durch Zusammenwirken der Firma Optikkomponenten und Kristalle in Berlin, bei der die am Ende noch vorhandene Mikrostruktur erzeugt wurde (Klassische Poliertechnologie), dem IOM in Leipzig, bei dem die abschließende Makrogeometrie erzeugt wurde (durch Ionenstrahlfinishing) und BESSY, wo die Messungen von Mikrostruktur und Makrogeometrie zwischen allen Bearbeitungsschritten (Mikromap und NOM) erstellt wurden.

### **NOK-Ergebnis 3.5**

Ein weiteres wesentliches Ergebnis des NOK-Verbundprojekts stellen die NOK-Prüfkörper aus Glaskeramik dar. Die kompakten Prüfkörper weisen Längen von 310 mm, 510 mm und 610 mm auf. Sie tragen jeweils zwei ebene Flächen, die als Referenzflächen verwendet werden können, und sind bei Berliner Glas KG gefertigt. Die Finishbearbeitung erfolgte mit Ionenstrahlbearbeitung nach intensiven Interferenzprüfungen mit Autokalibrierverfahren (ZYGO-Interferometer) bei Berliner Glas KG. Weitere Messungen erfolgten anschließend bei verschiedenen NOK Partnern nach unterschiedlichen Messverfahren, nämlich bei ESAD, bei NOM und DIRECT 100. In Teil 1 Fig. 6, Abschnitt 3.2 ist ein Beispiel des Vergleichs der Messungen der NOM mit zwei Interferometern dargestellt. Die Abweichungen untereinander bewegen sich im 2 nm rms – Rahmen entsprechend den höchsterreichbaren Interferometergenauigkeiten. Ein Deflektometrie-Vergleich zwischen ESAD und NOM erbrachte Übereinstimmung von  $< 0,3$  nm rms [16 (Folie 10)] über 130 mm Länge bei einer lateralen Auflösung von 5 mm und zwar an einem 510 mm NOK Prüfkörper, der bei Berliner Glas eine Makrogeometrie von 0,02 arcsec rms eingehalten hatte.

## **2.4 Neue Messmethoden gegenüber den herkömmlichen Verfahren**

### **2.4.1 Vorteile der Deflektometrie**

#### **NOK-Ergebnis 4.1**

Die Erkenntnis, dass die Deflektometrieverfahren Vorteile gegenüber den herkömmlichen Verfahren aufweisen, wurde mit mehreren in den vorigen Abschnitten angeführten Ergebnissen gezeigt. Diese Erkenntnis wird als ein wesentliches Ergebnis im NOK-Verbundprojekt angesehen. Insbesondere leitet sich diese Erkenntnis aus den Einzelergebnissen [16 (Folie 16)] ab, nämlich der Referenzflächenfreiheit, der nachgewiesenen Genauigkeitssteigerung, der demonstrierten 3-D-Topographiemessung und der Messmaschine, die für den industriellen Einsatz geeignet ist.

#### **NOK-Ergebnis 4.2**

In der industriellen Optikfertigung besteht, wie bei der Feinmechanik auch, der Wunsch, 3 bis 5 mal genauer messen zu wollen, als die geforderten Toleranzen es zulassen. Dieser sehr legitime Wunsch sollte eigentlich ein nicht zu verletzender Grundsatz sein. Leider kann ein solcher Grundsatz bei der Optikfertigung nicht eingehalten werden, wenn es sich um hohe und

höchste Genauigkeitsforderungen handelt. Die bisherige technologische Grenze bei NOK war mit 0,1 arcsec rms sowohl für von Messtechnik als demzufolge auch von der erzielten Fertigungsgenauigkeit bestimmt. Mit den hier nachgewiesenen Genauigkeiten kann der Grundsatz erfolgreich angestrebt werden, dass die Aussage der Messtechnik im Verhältnis zur Finishbearbeitung 5 mal höher ist. Wenn dieser Grundsatz realisiert werden soll, sind Deflektometriemethoden für die Zukunft günstig einsetzbar und stellen insbesondere für gekrümmte Flächen eine erhebliche Erweiterung der möglichen Messmittel dar.

Diese angeführten Vorteile der Deflektometrie sind aus der Zusammenarbeit im NOK-Verbund nachgewiesen, sowohl bei der Deflektometrie-Entwicklung in verschiedenen Labors als auch bei der Komponentenherstellung, also aus dem Zusammenwirken der beiden NOK-Arbeitsgruppen Messtechnik- und Technologieentwicklung.

## 2.4.2 Die Vorreiterrolle der Messtechnik in der Entwicklung der Optiktechnologie

### NOK-Ergebnis 4.3

Dass von der Messtechnik eine bestimmende Rolle für die Optiktechnologie erwartet werden kann, ist mit den angeführten Ergebnissen bestätigt. Für die weitere zukünftige Entwicklung der Optiktechnologie lassen sich einige Vorstellungen entwickeln, die mit weiterem Ausbau der Deflektometrie auch eine Vorreiterrolle für die Optiktechnologieentwicklung möglich erscheinen lassen. Diese Möglichkeiten sollen hier im folgenden kurz erwähnt werden, damit dem Verbundprojekt ein abrundender in die Zukunft gerichteter Aspekt hinzugefügt werden kann.

In [16 (Folie 17)] sind einige dieser zukunftssträchtigen Aspekte angeführt, die die Vorreiterrolle der Messtechnik zeigen und damit Möglichkeiten für zukünftige Weiter- und Neuentwicklungen in der Optiktechnologie offenbaren. Die hier angeführten Möglichkeiten resultieren im wesentlichen aus den gezeigten Genauigkeitssteigerungen bei den Messungen nach Deflektometrieverfahren einerseits und der gegenwärtigen Genauigkeitsgrenzen sehr unterschiedlicher Messaufgaben andererseits. Insbesondere, wenn diese Grenzen weit hinter den Forderungen zurück liegen, werden die sich anbietenden Möglichkeiten der Deflektometrieverfahren auch mehr in Betracht gezogen werden müssen und können. Dazu zählen neben der Flächenfertigung beispielsweise die lang- und mittelfristigen Formveränderungen von Substratmaterial in ihren mechanischen Fassungssystemen, Schichtdicken und ihre Konstanz über die Flächenausdehnung oder die Charakterisierung von Referenzflächen für Interferometer und als Probegläser. Solche Forderungen zeichnen sich gegenwärtig nicht nur in der Optiktechnologie für hochgenaue Komponenten wie für die Anwendung mit Synchrotronstrahlung ab, sondern auch für Herstellung und Einsatz von reflektierenden optischen Komponenten für die EUV-Lithographie.

Die sich aus den Deflektometrieverfahren ergebenden Möglichkeiten können zukünftig eine Vorreiterrolle für bestimmte Richtungen der Entwicklung in der Optiktechnologie übernehmen.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den hier vorgestellten Ergebnissen des NOK-Verbundprojekts wurde nachgewiesen, dass bezüglich der ursprünglichen technologischen Grenze von 0,1 arcsec rms für Nanometer-Optikkomponenten die Messgenauigkeit mit Deflektometrie auf das Zehnfache und die Komponentengenauigkeit auf das Fünffache gesteigert werden kann [16 (Folie 18)]. Mit den NOK-Demonstratoren liegen Komponenten für den Einsatz mit Synchrotronstrahlung und entsprechender Qualitätssteigerung für den Einsatz bei BESSY vor: Eine Fokussierung wurde dreifach gesteigert nachgewiesen, 20 fach möglich; Steigerungen der spektralen SR-Auflösung sind bis auf das Doppelte zu erwarten.

Mit den Ergebnissen der Arbeitsgruppen Messtechnikentwicklung und Technologieentwicklung sowie mit deren Zusammenwirken sind die Ziele des NOK-Verbundprojekts erreicht und vielfach übertroffen. Es stehen Technologien zur Bearbeitung mit Ionenstrahlfinishing und zur Messung mit der Nano-Optik-Messmaschine - NOM - zur Verfügung. Damit sind die ursprünglichen technologischen Grenzen verschoben.

Mit diesen Voraussetzungen sind die Ergebnisse des NOK-Verbundprojekts zukünftig zur direkten Anwendung und zur Weiterentwicklung [16 (Folie 19)] vorbereitet.

### Danksagung

Sämtliche hier angeführten Arbeiten zur Realisierung des Projekts waren nur mit Hilfe von Vielen möglich. Daher sei an dieser Stelle allen direkt und indirekt Beteiligten der Dank des Projektleiters und des Verbundprojektkoordinators ausgesprochen.

1. Die finanzielle Förderung im Rahmen des Verbundprojekts NOK war notwendige Voraussetzung für Start und Durchführung des Projektes. Daher sei der Frau Bundesministerin für Bildung und Forschung sowie dem Projektträger VDI - Physikalische Technologien - Nanotechnologie, insbesondere Herrn Dr. Martin Böltau für den inhaltlichen Teil und Frau Gabriele Eickenbusch für den finanziellen Teil der Projektträgerschaft sehr gedankt.
2. Die Aufgabenstellung ist in erster Linie der weltweiten Community der Speicherringe für Synchrotronstrahlung zu verdanken, die mit der rasanten Entwicklung in diesem Fachgebiet dafür sorgt, dass neue Forderungen auch auf dem Gebiet der Feinmechanik und Optik erkannt und gestellt werden. Der BESSY-Leitung, insbesondere dem damaligen wissenschaftlichen Geschäftsführer und seinem Stellvertreter, den Herren Prof. Dr. Wolfgang Gudat und Prof. Dr. William Peatman, sowie insbesondere dem Leiter der Optikgruppe bei BESSY, Herrn Dr. Fred Senf, seien gedankt für die Etablierung des optischen Messlabors bei BESSY, in dem die Projektarbeit durchgeführt wurde, für die Definition der Aufgabenstellung und für die Diskussionen über die technologischen Grenzen in der Optiktechnologie und deren Verschiebung, aus denen dann das Konzept für das vorliegende Projekt entstand.

3. Bei der Konzeptrealisierung waren viele Mithilfen bei der Bereitstellung der wesentlichen Komponenten erforderlich: für das Gestein- Tisch- und Schlittensystem der NOM die Firma Anorad Europe aus Beest in den Niederlanden, insbesondere in der Person von Herrn Dipl.-Ing. Ton Verstraaten, für den LTP Herr Dr. Peter Takacs, BNL Brookhaven, und die Firma Ocean Optics in Orlando/Florida, Dr. Roy Walters und Herrn Jeromy Rose, und für den Autokollimator die Herren Dr. Carsten Schlewitt, Dr. Olaf Schnabel und Dr. Bernd Grubert, Firma Möller-Wedel-Optical GmbH sowie für Softwareerstellung die Firma OEG - Optik Elektronische Geräte Frankfurt (Oder), die Herren Dr. Ulrich Glau-bitz, Dr. Stephan Rothe und Dipl.-Ing. Peter Hoffmann. Allen diesen Firmen und Personen sei herzlich für die erfolgreiche Zusammenarbeit gedankt.
4. Die NOM – Entwicklung bei BESSY war inhaltlich eingebunden in das Verbundprojekt Nanometer-Optikkomponenten NOK. Aus diesem Kreis sei den Hauptakteuren für die Zusammenarbeit auf mancherlei relevanten Gebieten und Diskussionen sehr herzlich gedankt. Insbesondere sind in diesem Zusammenhang zu nennen: von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt Braunschweig, Labor für Bildmesstechnik die Kollegen Dr. Ingolf Weingärtner, Dr. Michael Schulz, Dr. Ralf Geckeler, Dr. Jens Illemann, aus dem Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig, Dr. Axel Schindler und Dr. Thomas Hänsel, von der Firma Berliner Glas KG die Herren Dipl.-Phys. Ingo Rieck und Dipl.-Ing. Chris Hellwig, von der Firma Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH die Herren Dr. Dieter Bergner und Dr. Uwe Jungst, von der Friedrich Schiller Universität Jena Herr Dr. Volker Herold, von der Firma Optikkomponenten und Kristalle GmbH Berlin-Adlershof, Frau Dipl.-Ing. Marion Berger und Herr Dipl.-Ing. Fritz Hentschel, sowie von der Firma Carl Zeiss Oberkochen die Herren Dr. Manfred Becker und Dr. Andreas Seifert.
5. Die Zusammenarbeit innerhalb der NOM-Projektgruppe bei BESSY war sehr intensiv und kollegial. Alle Beiträge der projektbeteiligten Kollegen, die wegen ihrer Vielfalt hier nicht einzeln gewürdigt werden können, waren wesentlich für das Gelingen des Ganzen. Es ist dem Leiter dieses Projektes ein starkes Bedürfnis, diesen Kollegen besonders herzlich dafür zu danken: Herrn Dipl.-Ing. Frank Siewert, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zeschke, Herrn Dipl.- Ing. Thomas Schlegel und Herrn Dr.-Ing Tino Noll. Der Erfolg dieses Projektes ist insgesamt gerade auf die gute Zusammenarbeit, auf verständnisvolles Miteinander in diesem Projektteam sowie auf viele besonders hochqualifizierte Einzelleistungen der angeführten Kollegen zurückzuführen. Außerdem wird der BESSY-Optikgruppe, in die das Projektteam eingebunden ist, sehr gedankt für Diskussionen und Anteilnahme an dem Projekt Nano-Optik-Messmaschine - NOM -.
6. Dank gebührt auch der Technischen Unversität Ilmenau, bei der ich diese Arbeit zum 50. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium vorstellen darf. Ich begann vor 45 Jahren das Studium an der Fakultät für Feinmechanik und Optik und promovierte hier vor 34 Jahren. An meine Ilmenauer Lehrer möchte ich erinnern Heinz Haferkorn, Werner Bischoff, Friedrich Hansen, Karl-Otto Frielinghaus, Paul Michelsson und Franz Grünwald. Von ihnen lernte ich Grundzüge der Optik, Feinmechanik, Konstruktion, Fotografie, Messtechnik, Optiktechnologie. Wie bedeutend die Wechselwirkungen aller dieser Ingenieurdisziplinen mit der komplexen instrumentellen Physik von Galilei über Fraunhofer und Abbe bis zur gegenwärtigen EUV-Lithographie für die Computerchip-Entwicklung ist, erfuhr ich ein wenig im Laufe meiner gesamten Berufstätigkeit bis heute in Berlin-Adlershof.

Heiner Lammert.

## Referenzen

1. Lexikon der Optik, Artikel: Long Trace Profiler (Autor: Heiner Lammert) Bd.1, S.434; Spectrum-Verlag Heidelberg- Berlin, 1999
2. USA-Patent No. 4884697, Date: Dec.5, 1989 „Surface Profiling Interferometer“; Inventors: Peter Z. Tackcs and Shi-Nan Qian; filed: Jun. 21, 1988
3. Heiner Lammert; Fred Senf, Marion Berger; Improvement of Synchrotron Radiation Mirrors below the 0.1 arcsec rms Slope Error Limit with the Help of a Long Trace Profiler; SPIES's Int. Symp on Optical Science, Engineering and Instrumentation; San Diego; July 27. - Aug. 1, 1997; p 168 – 179
4. Carl Zeiss; Mirrors for Synchrotron Radiation, Firmenprospekt 56-05/I-e; erhalten 22.8.2000; Fa. Carl Zeiss Oberkochen; 2000
5. Naumann/Schröder, Bauelemente der Optik, Hanser-Verlag 1992; S. 423-429
6. Lammert, Noll, Schlegel, Siewert, Zeschke. „Optisches Messverfahren zur Ermittlung von Idealformabweichungen technisch polierter Oberflächen und Präzisionsmessmaschine zur Durchführung des Messverfahrens“. Patentanmeldung Dat:23.1.2003 AZ: 103 03 659.8, Int. 14.1.2004 WO 2004/065904 A1, Nat. und Int. Veröffentlichungs-Datum 5. August 2000
7. Heiner Lammert, Tino Noll, Thomas Schlegel, Frank Siewert, Thomas Zeschke; The Nanometer Optical Component Measuring Machine – NOM – at BESSY. BESSY Annual Report 2002, Published by BESSY Berlin, 2003, p. 399. <http://www.bessy.de/>
8. Heiner Lammert, Tino Noll, Thomas Schlegel, Frank Siewert, Thomas Zeschke; XUV-Optik, Messung mit der Nano-Optik-Messmaschine - NOM - bei BESSY. Dgao-Proceedings 2004; [http://www.dgao-proceedings.de/download/105/105\\_a11.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/105/105_a11.pdf)
9. Heiner Lammert, Tino Noll, Thomas Schlegel, Frank Siewert, Thomas Zeschke. Breakthrough in the Metrology and Manufacture of Optical Components for Synchrotron Radiation. Annual Report 2003, Published by BESSY Berlin, 2004, p. 530-533. <http://www.bessy.de/>
10. A. Schindler, T. Haensel, A. Nickel, H.J. Thomas, (IOM e. V. Leipzig), H. Lammert, F. Siewert (BESSY); Finishing Procedure for High Performance Synchrotron Optics“ Vortrag, SPIE's Proc. 48<sup>th</sup> Annual Meeting, San Diego, Ca, 2003
11. Heiner Lammert, Fred Senf; Forschung mit Synchrotronstrahlung am Beispiel von BESSY. Ausarbeitung zur Darstellung von Zusammenhängen mit dem geplanten Verbundprojekt „Nanometer- Optikkomponenten“ – NOK -. 17 Seiten. BESSY, Berlin, 8.8.2000, Material zur Antragstellung dieses Projekts
12. L. Assoufid, O. Hignette, M. Howells, S. Irick, H. Lammert, P. Takacs Future metrology needs for synchrotron radiation grazing-incidence optics Nuclear Instruments & Methods in Physics research A 467-458 (2001) 267-270
13. Heiner Lammert; Subnanometer Accuracy Measurements with the LTP at BESSY; Int. Workshop on Metrology for X-ray and Neutron Optics, APS, Argonne National Laboratory, Chicago, March 16-17, 2000
14. Olivier Hignette (Herausgeber des Vortragsmaterials) Second International Workshop on Metrology for X-ray Optics, Grenoble (F); Apr. 1-2, 2004

15. Heiner Lammert, Nanometer-Optikkomponenten für die Synchrotronstrahlung; Messen und Endbearbeitung bis in der Subnanometer-Bereich unter  $\lambda/1000$ . Schlussbericht NOK-NOM, Teilvorhaben BmbF/VDI 13N7929. BESSY Berlin, 22.12.2004
16. Heiner Lammert, Auszug aus „Zusammenfassung der Ergebnisse des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten, Vortrag zum Abschlusstreffen der Partner, Berlin, BESSY, 6.Oktober 2004, als **Anlage** von „Zusammenfassender Schlussbericht über die Koordinierung des Forschungsverbundprojekts Nanometer- Optikkomponenten – NOK“

Weitere Literatur über BESSY-Annual Report 2001, 2003, 2003, 2004 <http://www.bessy.de/>  
Lammert; Siewert

**Anlage:** Auszug aus dem Vortrag „Zusammenfassung der Ergebnisse des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten von Heiner Lammert, Berlin, den 6. Oktober 2004; 10 Seiten, 20 Folien , siehe Datei: [Auszug.NOK-Vortrag.6.10.2004-La-B.pdf](#)

Anlage  
Auszug aus dem Vortrag  
**„Zusammenfassung der Ergebnisse  
des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten“**  
von Heiner Lammert  
Berlin, den 6. Oktober 2004;  
10 Seiten, 20 Folien ,

siehe Datei: [Auszug.NOK-Vortrag.6.10.2004-La-B.pdf](#)

# Verbundprojekt Nanometer Optikkomponenten NOK

**Abschlusstreffen der Partner  
in Berlin Adlershof bei BESSY  
am 6. Oktober 2004**



**Auszüge aus dem Vortrag:  
Zusammenfassung der Ergebnisse  
des Verbundprojekts Nanometer-Optikkomponenten  
von Heiner Lammert, Koordinator des Verbundprojekts**

## Thematik des Verbundprojekts

Herstellung von **superglatten Oberflächen**  
an optischen Komponenten für den **EUV-Wellenlängenbereich**  
zur speziellen Anwendung bei Synchrotronstrahlung mit Genauigkeiten,  
die sich **gegenwärtig jenseits der technologischen Grenzen** befinden.  
Dazu sind die erforderlichen **Mess- und Bearbeitungsverfahren** zu entwickeln.



NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

1



AG Mess-  
technik

**Verbundprojekt Nanometer- Optikkomponenten NOK  
11 Partner aus Industrie, KMU und Öffentlichen Einrichtungen**

AG Tech-  
nologie



ok



**Einführung mit Zusammenhängen  
aus historischer Sicht  
und aus Erfordernissen bei BESSY**

**Ergebnisorientierte Darstellung  
der Inhalte des Verbundprojekts:**

- 1. Die Messtechnikentwicklung**
- 2. Die Technologientwicklung**
- 3. Die Zusammenarbeit  
im Verbundprojekt und  
gemeinsame Ergebnisse**

PTB



MÖLLER-WEDEL OPTICAL

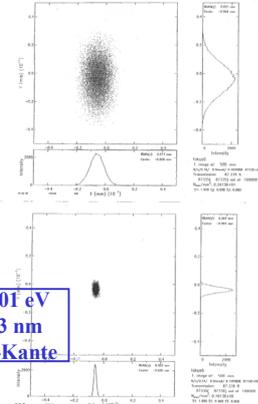
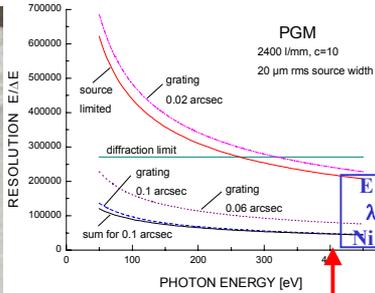
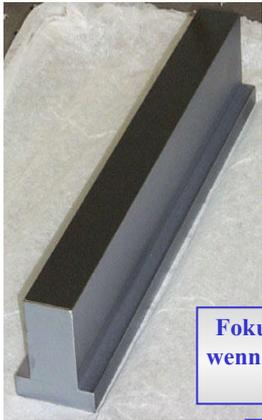


NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

2

Beispiel an zwei BESSY-NOK: Plangittersubstrat 100 mm Si, Ziel 0,02 arcsec rms und elliptischer Zylinder (Planellipse) 210 mm, Zerodur, Ziel 0,1 arcsec rms

Steigerung der spektralen Auflösung bei Absenkung der Gittersubstratabweichungen von 0,1 auf 0,02 arcsec rms



Fokussverringerng von 43 μm auf ca. 17 μm, also um den Faktor 3, wenn die Winkeltangentenabweichungen des planelliptischen Spiegels von 1,5 auf 0,1 arcsec rms abgesenkt werden.

## Optiktechnologie - Entwicklung in großen Schritten

19. Jahrhundert **Probegläser**  
(von Fraunhofer um 1810 eingeführt; Zeiss, Jena 1861 wiedererfunden)

20. Jahrhundert **Interferometer**

Peter Z. Takacs 1989 Brookhaven, Anwendung von Deflektometrie  
Shi Nan Qian US-Patent Long Trace Profilometer LTP

Zeitraum	Messtechnik	Erzielbare Flächengenauigkeit	
100 Jahre	Probegläser	$\lambda/10$	50 nm
100 Jahre	Interferometrie	$\lambda/100$	5 nm
15 Jahre	Deflektometrie	$\lambda/1000$	0,5 nm

# NOK- Arbeitsgruppe Messtechnik zum Abschluss

## Aktivitäten der Arbeitsgruppe Messtechnik

### Organisation

6 AG-Treffen bei BESSY, bei Möller- Wedel Optical, bei der PTB, bei Berliner Glas, bei Zeiss, bei BESSY, weitere bilaterale Treffen in Braunschweig, Leipzig, Wedel und Berlin

### Abstimmungen und Informationsaustausch

- Details über NOK- Prüfkörper 310, 510, 610, Verträge von und mit Berliner Glas
- Abstimmungen über den Datenaustausch von Messergebnissen
- Finite-Elemente-Rechnungen von Berl.Glas über NOK- Prüfkörper-Verformung
- Messungen an NOK- Prüfkörpern bei Berliner Glas, BESSY, PTB, Zeiss
- Einsatz des AKF von Möller Wedel Optical bei BESSY und PTB
- Subpixelabweichungen bei hochauflösenden Sensoren – Schnabel
- Reproduzierbarkeit bei Messprozessen
- Bilaterale Abstimmungen PTB- BESSY bezüglich EUV- Messtechnik
- Messtechnische Vergleiche AG Technologie (IOM)- AG Messtechnik (BESSY)
- Messungen auf der NOM Kalibrier- u. Interferenz-Normale, sphärisches Probeglas
- Messungen auf der NOM bei BESSY zur Erstellung der NOK- Demonstratoren

NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6.Oktober 2004, Lammert, BESSY

5



## Verbundprojekt NOK - Koordinierung



### Vermessung von Komponenten innerhalb des Verbundprojekts bei BESSY

1. LTP-Vermessung: Asphäre (ell.zyl.Fläche), Abgleich D 100 SASI - IOM 5/01
2. LTP-Vermessung: 6 Stück Si- 100- T- Profil; 2 Tragkörper - OK 4/02
3. LTP-Vermessung: 6 St. Si- 100- T- Profil: - OK 5/02
4. NOM-Vermessung: 3 Stück Zerodur 100- T- Profil; 1 Tragkörper - OK 6/02
5. NOM-Vermessung von 3 St. Zerodur-100-T-Profil - OK 6/02
6. NOM-und Micromap-Vermessung von 72 St. Si 25x50-Versuchskörpern für OK, FSU-JOLOS (CAP); IOM (IBF) 7/02
7. Micromap-Vermessung div. Werkstoffproben FSU 7/02
8. AFM-Vermessung Keramik - Probe FSU 7/02
9. NOM-Vermessung Interferenz-Plannormal D100, Durchmesser 250 mm für IOM 10/02
10. NOM-Vermessung Si- 100- T- Profil- (4 nm)- IOM 9/02; 1/03
11. NOM-Vermessung NOK-Prüfkörper 510, 310, 610 Zerodur Berl. Glas, PT 9/02 bis 5/04
12. SR-Polarimeter- und Micromap-Vermessung Wolfram - FSU 1/03
13. NOM-Vermessung v. sphär. Zerodur-Spiegeln 210 mm, r=45 m JO-LOS, PTB 5/03-7/04
14. NOM-Vermessung von Si 310- T- Profil; 1 Tragkörper - OK 6/03
15. NOM-Vermessung von 3 Stück Zerodur 310- T- Profil; 1 Tragkörper - OK 6/04
16. NOM-Vermessung NOK-Demonstrator Asphäre nach IBF IOM 6/03 bis 12/04
17. NOM-Vermessung: AKF- Kalibrierkörper (plan für Möller-Wedel) 12/04
18. NOM-Vermessung NOK-Demonstr. Planittersubstrat 100 mm n.IBF -IOM 6/03 bis 4/04
19. NOM-Vermessung NOK-Demonstrator Planspiegel 300 mm n. IBF - IOM 10/03 bis 9/04
20. NOM-Vermessung sphär. Probeglas r = 7m für JO-LOS 12/03
21. Beschichtungen u. Gitterstrukturierung der NOK-Demonstratoren BESSY 12/03 bis 9/04
22. SR-Einsatz Asphärischer Fokussierspiegel - BESSY 1/04

NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6.Oktober 2004, Lammert, BESSY

6

- 1. SR-Demonstratoren**
  - 1.1 Asphäre: Elliptischer Zylinder
  - 1.2 Plangitter 0,02 arcsec rms
  - 1.3 Planspiegel 310 mm 0,4 arcsec rms
- 2. Fortschritte in der Messtechnik optischer Komponenten**
  - 2.1 Ein Autokollimator mit 10 Milliarcsec-Genauigkeit, Apertur < 2 mm
  - 2.2 ESAD-Verfahren mit dem Ziel genauer Ebenheitsnormale
  - 2.3 NOM - Flächenmessung im Subnanometer-Genauigkeitsbereich
  - 2.4 Defletometrierverfahren werden in Zukunft für die Fertigung von hochgenauen Komponenten eingesetzt werden können
- 3. Fortschritte in der Bearbeitung optischer Komponenten**
  - 3.1 Finishbearbeitung durch IBF und MRF
  - 3.2 Klassische Optiktechnologie
  - 3.3 Zusammenwirken von Messen und Finishbearbeitung
- 4. Neue Messmethoden mit Vorteilen gegenüber herkömmlichen Verfahren**
  - 4.1 3D-Messung, jedoch Referenzflächenfrei und automatisch für beliebige Asphären mit stetigem Verlauf geeignet
  - 4.2 Die Messtechnik als Vorreiter der Optiktechnologie

Verbundprojekt NOK - Aufgabenstellung aus dem Jahre 2000

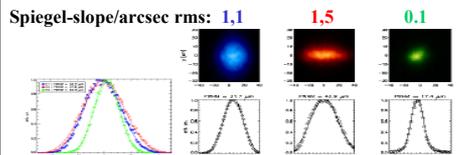
**Projekt Nanometer-Optikkomponenten**  
**Zielparameter für die Genauigkeiten der EUV-Komponenten**  
**und die dementsprechend erforderlichen Meßgenauigkeiten**

	Zielparameter nach dem Erfordernis der EUV-Komponenten	Ausdehnung	Ziel		Ziel		Den Zielen gemäß erforderliche Meßgenauigkeiten	
			Slope deviations	Shape deviations	nm rms	nm p-v	Slope deviations	Shape deviations
	Flächenform	mm Länge	nrad rms	arcsec rms	nm rms	nm p-v	nrad rms	nm rms
1.	Plan	300	150	0,03	3	10	50	1
		150	100	0,02	1,5	7	30	0,5
2.	Sphäre	300	250	0,05	3	10	80	1
		150	100	0,03	1,5	7	50	0,5
3.	Asphäre Zylinder, Torus, Ellipse	300	500	0,1	6	20	50	2
		150	500	0,1	3	15	50	1

Für das Verbundprojekt NOK  
 geforderte Demonstratoren für  
 Optische Kokomponenten zum  
 Einsatz in Synchrotronstrahlrohren

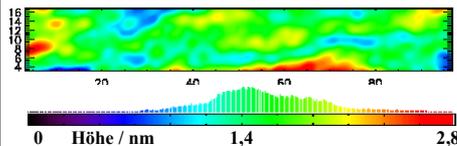
NOK- Ergebnis 1 Zielerfüllung und  
 Bereitstellung der Demonstratoren  
 mit Abschluss des Verbundprojekts

1. Asphärischer Spiegel 210 mm  
 mit elliptischer Zylinderfläche  
 Genauigkeitsziel:  
 von 1,0 auf 0,1 arcsec rms  
 erreicht: 0,1 arcsec rms

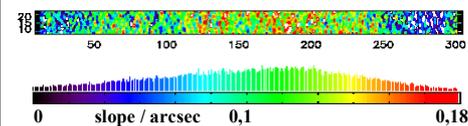


SR-Fokusreduzierung von 42,9  $\mu\text{m}$  auf 17,4  $\mu\text{m}$ , also 3:1

2. Substrat für Plangitter 100 mm  
 Genauigkeitsziel:  
 von 0,1 auf 0,02 arcsec rms; < 1 nm rms  
 erreicht: 0,02 arcsec rms; < 0,4 nm rms



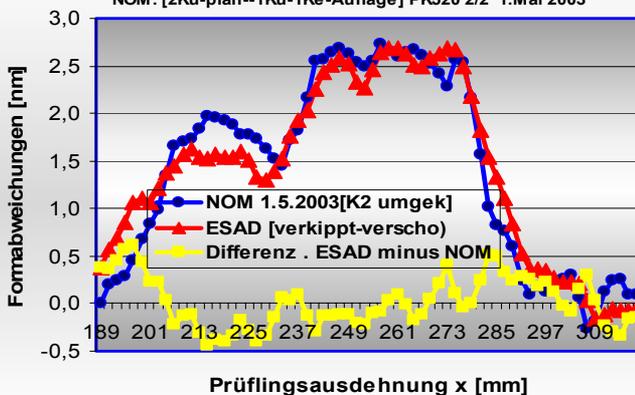
3. Planspiegel 300 mm  
 Genauigkeitsziel:  
 von 0,1 auf 0,03 arcsec rms  
 erreicht: 0,04 arcsec rms



NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

9

NOM-Meßergebnis im Vergleich mit ESAD-Ergebnis Feb. 2003  
 NOM: [2Ku-plan--1Ku-1Ke-Auflage] PK520 2/2 1. Mai 2003



NOK- Ergebnis 2.1

AKF  
 geringe Apertur

NOK- Ergebnis 2.2

ESAD

NOK- Ergebnis 2.3

NOM

510 mm Planfläche von 510 mm x 118 mm  
 mit 0,02 arcsec rms (best fit), NOK-PK(Berl.Gl.)  
Übereinstimmung der beiden Messungen  
 für den mittleren Bereich von 130 mm:  
 < 0,3 nm rms

Vergleich NOM mit dem  
 ESAD-Verfahren

AKF von Möller Wedel



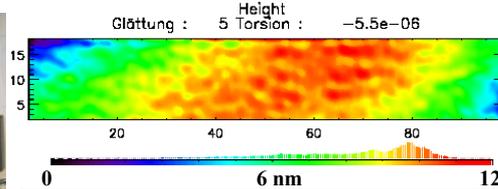
NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

10

# Die Nano-Optik-Messmaschine - NOM -

NOK- Ergebnis 2.3

ein berührungsfreies deflektometrisches Sub-nm-Topographie-Messgerät für XUV-Optik



- Drei Ergebnismerkmale:**
- - Extrem hohe Genauigkeit
  - - Flächenprofil-Messung
  - Prototyp einer industrie-einsatzfähigen Messmaschine

Die NOM arbeitet nach dem Deflektometrie- Hybrid-Prinzip mit AKF und LTP  
 Genauigkeit im 10-Milli-Arcsec-Bereich bzw. im Subnanometerbereich  
 Reproduzierbarkeit < 5 marcsec rms; < 0,1 nm rms über 300 mm Messlänge  
 Messbereich 1200 mm x 300 mm (600 mm) bzw. 1200 mm Durchmesser  
 Winkelbereich: +/- 1000 arcsec, bzw. Krümmungsradius Unendlich bis ca. 1m  
 Reflexionsgrad 4 % bis 100 %  
 Laterale Auflösung: ca 2 mm bis max Prüflingslänge



NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

11

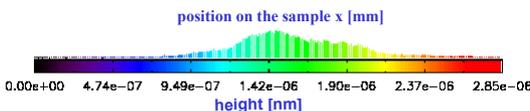
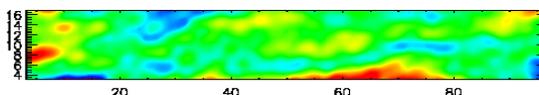
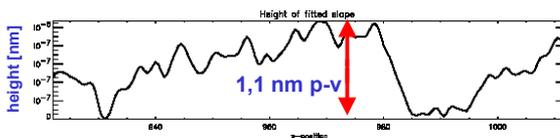
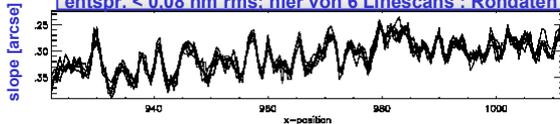
## Welche Genauigkeit kann mit Ionenstrahlfinishing erreicht werden?

Beispiel: Plangittersubstrat 100 mm x 20 mm

NOK- Ergebnis 3.1

von sehr hoher Genauigkeit: Hier Kontrollmessungen mit der NOM

Reproduzierbarkeit der Messungen < 0,007 arcsec rms  
 entspr. < 0.08 nm rms; hier von 6 Linescans : Rohdaten



**slope error fit**  
 0.022 arcsec rms  
 radius: 300 km

**height without fit**  
 0.14 arcsec p-v  
 4 nm p-v, 1 nm rms

**height fit line**  
 1.1 nm p-v  
 0.28 nm rms

**height fit map**  
 2.8 nm p-v  
**0.35 nm rms**

**slope fit map**  
 0.021 arcsec rms  
 l. rad.: -350 km



NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

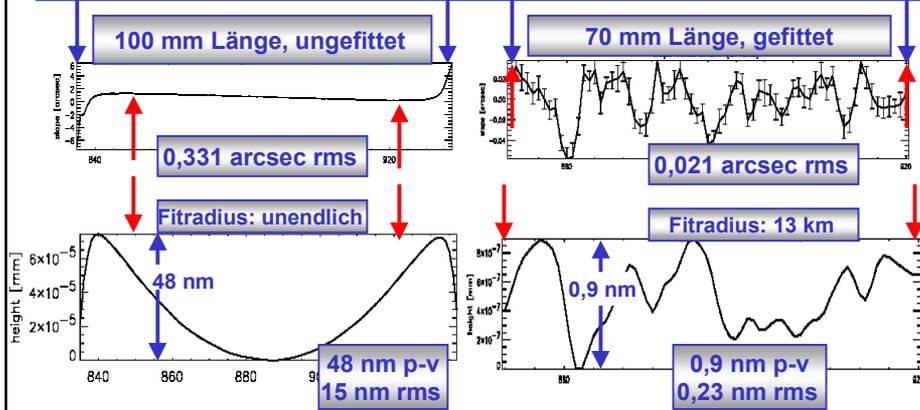
12

# Der „Selbstkorrektureffekt“ bei der klassischen Optiktechnologie

Wie genau kann die klassische Optiktechnologie sein?

NOK- Ergebnis 3.2

Beispiel bei einer Planfläche von Berliner Glas - Abweichung von einer Restkugelform



- ◆ Slope deviation nach einem Radiusfit über 70 mm Länge **21 marcsec rms**
- ◆ entsprechende Höhenabweichungen **0,9 nm p-v bzw. 0,2 nm rms ( $\lambda/3000$ )**

Reproduzierbarkeit dieser Messung auf der NOM: 13 marcsec rms bzw. <0,1 nm rms



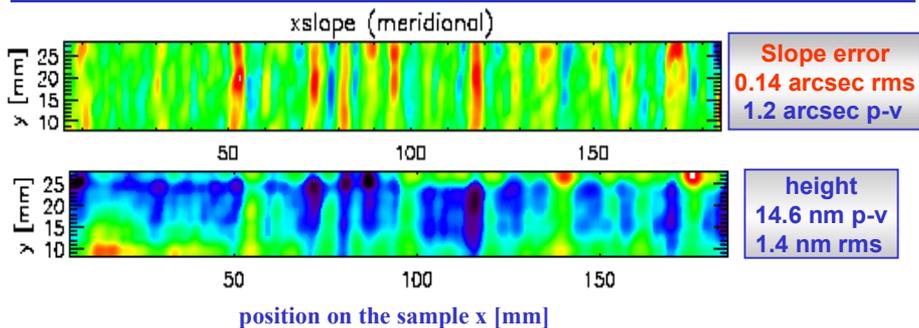
Welche Genauigkeiten bei Asphären können durch Ionenstrahlfinishing (IBF) erreicht werden?

NOK- Ergebnis 3.3

Beispiel Elliptischer Zylinder (plane-ellipse) 190 mm x 30 mm

Die Kombination zweier przipipeller Vorteile bei IBF und NOM

- 1. Bearbeitungskräfte** für den Materialabtragsprozess sind praktisch nicht vorhanden
- 2. Keine Referenzfläche** ist für die Asphäre erforderlich



Welche Genauigkeiten können bei den Komponenten bezüglich der Mikrostruktur erreicht werden?

NOK- Ergebnis 3.4

①

### Prinzip:

Die vor der Ionenstrahlbearbeitung erreichte Mikrostruktur ist maßgeblich für das Endprodukt und wird durch IBF nicht verändert.

②

### Optimierung der Formabweichungen:

1. Slope error vor IBF 0,13 arcsec rms
2. Slope error nach IBF 0,022 arcsec rms

③

### Erhaltung der Mikrostruktur

Optimierung der Mikrostruktur durch die Klassische Politur: 0,2 nm rms  
und nach dem IBF-Finishingprozess: 0,2 nm rms

④

### Formabweichung und Mikrostruktur nach IBF (Abschluss):

Höhenabweichungen über 20 cm<sup>2</sup>, laterale Auflösung: 2 mm : 0,38 nm rms  
Höhenabwgn. über 0,05 mm<sup>2</sup>, laterale Auflösung: <0,5 µm : 0,21 nm rms



NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

15



Verbundprojekt NOK - Herausragende Ergebnisse



### Vorteile der Defletometrie

NOK- Ergebnis 4.1

1. Bezug auf die Grundgrößen Weg und Winkel und damit unabhängig von Referenzflächen
  2. Genauigkeitssteigerung gegenüber den herkömmlichen Interferenzverfahren um das 10 fache
  3. 3-D-Topografie-Messung
  4. Vollautomatische Messmaschine für den industriellen Einsatz bei akzeptablen Messzeiten.
- Mit diesen Eigenschaften können beispielsweise Referenzflächen für Interferometer geprüft und gefertigt werden.

NOK- Ergebnis 4.2

Aussage beim Messen im Verhältnis zum Ziel der Finishbearbeitung wie 5 : 1

NOK - Abschluss-Treffen in Berlin-Adlershof am 6. Oktober 2004, Lammert, BESSY

16

Neue Aussagen von Messergebnissen am Beispiel NOM

hier Möglichkeiten:

- ◆ Gesamt- und Feinstruktur bei der klassischen Bearbeitung im  $\lambda/600$ - Bereich
- ◆ Bearbeitungsspuren bei lokal differenzierendem Finishpolieren (IBE; CAP; MRF)
  - ◆ Radienbestimmung von Probegläsern mit  $< 0,01\%$  Genauigkeit
    - ◆ Formveränderungen des Materials (Zerodur bis  $< 1$  nm)
      - ◆ mittel- und langfristig
- ◆ materialspezifische Differenzierung zwischen elastischer und plastischer Verformung
  - ◆ Elastische Formveränderungen infolge von
    - ◆ Spannungen im Fassungs-system
- ◆ lokalen Temperaturgradienten oder der absoluten Temperatur (Tragkörper)
  - ◆ gezielten adaptiven Veränderungen („Biegespiegel“)
    - ◆ Untersuchungen an Spiegel-Schichten
      - ◆ Parallelität bei Neubeschichtungen
- ◆ Störungen (Blasen, Dickenänderungen über Ausdehnungen  $> 1$  mm)
  - ◆ Qualitätskontrollen im Durchlicht
    - ◆ Homogenität von optischem Glas
  - ◆ Störungen bei planparallelen Fenstern

Zusammenfassung der Ergebnisse im NOK-Projekt

Messgenauigkeit: Steigerung **10 fach** nachgewiesen

Komponentengenauigkeit: Steigerung **5 fach** nachgewiesen

SR- Fokussierung: Steigerung **3 fach** nachgewiesen,  
**20 fach** möglich mit den geschaffenen Voraussetzungen

SR- Spektrale Auflösung: Steigerung **2 fach** möglich  
mit den geschaffenen Voraussetzungen

**NOK-Zielstellungen vollständig erreicht und  
teilweise übertroffen**

**1. Weiterentwicklung der Bearbeitungstechnologie**  
**IBF und Klassisches Polieren**

**2. Weiterentwicklung der Messtechnik**

**NOM im Einsatz** von Messlaboren in Forschung und Industrie  
 zur Feststellung von Formabweichungen  
 bei Anwendern von SR-Komponenten  
 und bei Herstellern hochpräziser Komponenten

**Einsatzerweiterung der scannenden Messverfahren**  
 mit den Zielstellungen

**stärker gekrümmter Prüflinge**  
 und **höherer lateraler Auflösung**

**3. Weitere neuartige Anwendung**  
 der scannenden Deflektometrie, z.B. mit der **NOM**

**Danksagung:**

Dieses Verbundprojekt wurde gefördert vom:  
**BMBF**

**Dank an Frieder Biegl, IOM,**  
**für die Initiierung des Verbundprojekts**  
 Projektträger: VDI  
 Physikalische Technologien  
 Dank an Martin Böltau

Dank  
 an die Partner des  
 Verbundprojekts,  
 an Ihre Mitarbeiter und Leiter  
 und Dank an die Leitung  
 von BESSY  
 Wolfgang Gudat,  
 Wolfgang Eberhardt,  
 William B. Peatman,  
 Fred Senf



Forschungsverbundprojekt Nanometer-Optikkomponenten - NOK -

gefördert vom BMBF Förderkennzeichen 13N7929

Projekträger: VDI - Physikalische Technologien, Dr. Martin Böltau

**Die Projektleiter und Mitarbeiter im Verbundprojekt**

Arbeitsgruppe Technologieentwicklung



Axel Schindler  
 Thomas Hämzel  
 Georg Böhm

Andreas Nickel



Dieter Bergner  
 Uwe Jungst



Volker Herold



Marion Berger  
 Fritz Hentschel

Optikkomponenten und Kristalle

Arbeitsgruppe Messtechnik

Ingolf Weingärtner  
 Ralf Geckeler  
 Jens Illemann

Michael Schulz

Ingo Rieck  
 Chris Hellwig

Stephan Rothe  
 Ulrich Glaubitz  
 Peter Hoffmann

Cartsten Schlewitt  
 Bernd Grubert  
 David Kreitschick

Olaf Schnabel

Klaus Becker  
 Gerhard Derst  
 Andreas Seifert

Heiner Lammert  
 Frank Stewert  
 Thomas Schlegel  
 Thomas Zeschke  
 Tino Noll

