

Höhere Präzision bei der Formmessung von Asphären

Bernhard Smandek, Maik Oliver Baier, Gernot Blobel, Susanne Quabis, Michael Schulz,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin

Die absolute Vermessung von Freiformflächen und Asphären stellt eine enorme Herausforderung dar, wenn es um die Rückführbarkeit der Messwerte auf die SI-Einheiten und eine Messunsicherheit im Bereich von einigen zehn Nanometern geht. Dies ist das Thema eines europäischen Projektes, bei dem nun erste Zwischenergebnisse vorliegen. Diese sollen in Workshops ab September 2013 interessierten Teilnehmern aus Industrie und Forschung präsentiert werden.

Die europäische Dimension

Die Optischen Technologien gehören derzeit zu den fünf wichtigsten Schlüsseltechnologien Europas. So beträgt der Jahresumsatz der europäischen Photonik-Industrie 21% des Weltmarkts der Optischen Technologien [1]. Obwohl die Massenproduktion optischer Komponenten und Systeme mittlerweile zu einem großen Teil außerhalb der Europäischen Union (EU) stattfindet, hat Europa weiterhin eine führende Rolle bei hochentwickelten optischen Produkten, ultrapräziser Fertigungstechnik und in der Messtechnik. Von den herkömmlichen planaren und sphärischen Formen optischer Elemente geht die Entwicklung und der Bedarf der Industrie immer mehr zu davon abweichenden optischen Oberflächen, wie Asphären und Freiformflächen. Diesen industriellen Bedarf durch Grundlagen- und angewandte Forschung systematisch zu unterstützen, ist Sinn der Programm-Initiative "Horizon 2020" der EU, mit der ein „intelligentes, nachhaltiges und integriertes Wachstum“ angestrebt wird [2].

Die Herausforderung

Mit heutigen Verfahren, wie computergesteuertem Polieren und Ionenstrahlätzen, können Asphären in der Fertigung mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich korrigiert werden. Dabei ist jedoch die Formmesstechnik der begrenzende Faktor. Deshalb ist die Entwicklung neuartiger, hochgenauer und absoluter Formmesstechnik sehr bedeutsam für eine Weiterentwicklung der Fertigungsmöglichkeiten. Wie hoch dieser Bedarf ist, zeigt sich an den schon seit dem Jahr 2010 stattfindenden Ringvergleichen im Rahmen des Kompetenzzentrums Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung (CC UPOB e.V.) [3]. Hier wurde in Kooperation von Industrie und Forschung an Master-Asphären mit unterschiedlichsten Messmethoden eine Form-



Bild 1: Asphären werden bei hohen Anforderungen an die Abbildungsqualität in vielen Produkten eingesetzt; einige sind hier dargestellt. Bei der mathematischen Beschreibung kommt ein spezieller Asphärenterm zu den klassischen Formeln hinzu

bestimmung vorgenommen. Die Messergebnisse wurden dann in anonymisierter Form auf gut besuchten Seminaren in der PTB präsentiert, um den aktuellen Stand industrieller Messtechnik darzustellen.

Das Forschungsprojekt „Absolute Formcharakterisierung“

Das im September 2011 begonnene europäische Projekt EMRP – IND10 [4] geht hier noch einen Schritt weiter. Es zielt auf die absolute Formcharakterisierung beliebiger optischer Oberflächen durch Rückführung auf die SI-Einheiten mit einer wohldefinierten Messunsicherheit¹. Hier stehen

¹ Die Messunsicherheit bezeichnet ein Intervall, in das der zu erwartende Messwert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (typischerweise 95%) fällt.

anspruchsvolle Optiken wie Freiformflächen für EUV-Lithographie und Asphären im Zentrum. Die in **Bild 1** dargestellten Asphären rufen aufgrund ihrer Bedeutung für den Massenmarkt bei den meisten Messgeräte-Herstellern das größte Interesse hervor, während Anwendungen hochpräziser Freiformflächen derzeit noch primär in Hochpreissegmenten zu finden sind.

Gefördert wird das Projekt im Rahmen des "European Metrology Research Programme" (EMRP), einem Verbund europäischer Metrologieinstitute. Das EMRP ist eine Art.-185-Maßnahme der EU², neben natio-

² Art.-185-Maßnahmen sind zu gleichen Teilen finanzierte Fördermaßnahmen der EU und ihrer Mitgliedsstaaten, wobei letztere hier durch EURAMET e.V. repräsentiert werden. Die der Photonik-Branche wahrscheinlich bekannteste Art.-185-Maßnahme ist das EUROSTARS-Programm für kleine und mittlere Unternehmen.

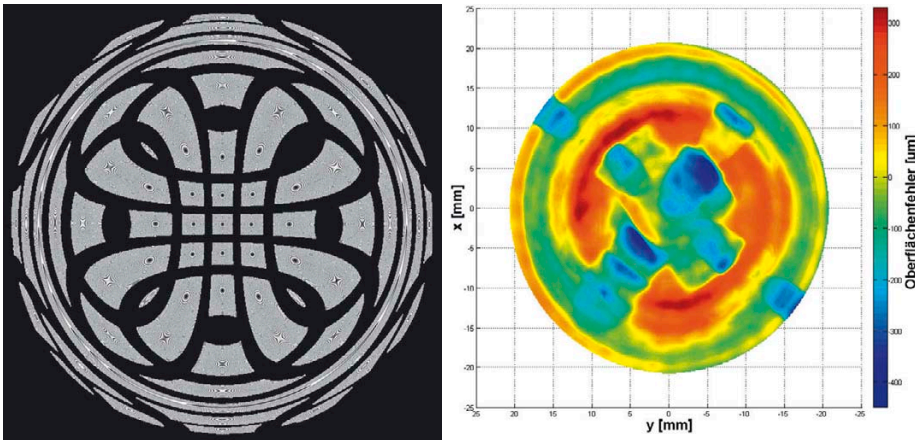


Bild 2: Messergebnis der interferometrischen Messung einer Asphäre mit einem Tilted-Wave-Interferometer. Links das komplexe Streifensystem, an dem eine Vielzahl von Lichtquellen beteiligt ist, rechts das daraus errechnete Höhenbild der Topographie nach Abzug der Sollform. Bei der Asphäre handelt es sich um ein spezielles Testobjekt mit Strukturen der Bearbeitung (Bild: Universität Stuttgart, ITO)

nalen metrologischen Einrichtungen ist eine Vielzahl von Instituten und Unternehmen aus Bereichen der Koordinatenmesstechnik und der optischen Messtechnik beteiligt.

Trainingskurse für Industrie und Forschung

Nachdem die erste Hälfte des Projektes erfolgreich verlaufen ist, stehen erste Ergebnisse zur Verfügung, die einem erweiterten Personenkreis zugänglich gemacht werden sollen. Zur Messtechnik für asphärische Oberflächen wird das Projektpartner-Konsortium verschiedene Trainingskurse anbieten, unterteilt in antastende, punktuell messende Systeme (z.B. Koordinatenmessgeräte) und optisch flächig messende Interferometer. Beide Typen von Messgeräten haben ihre besonderen Eigenschaften. Die im Projekt durchzuführende vergleichende Untersuchung ist dafür konzipiert, die jeweiligen Stärken besser zu verstehen und optimal einsetzen zu können.

Für die Zeit ab September 2013 sollen zunächst eintägige Weiterbildungs-Veranstaltungen geplant werden, die den Teilnehmern tiefe Einblicke in die hochgenaue abtastende Formmesstechnik sowie die Asphärenmetrologie mittels rechnerunterstützter Interferometrie mit gekippten Wellenfronten geben werden.

Kurs 1, Interferometrische Messtechnik

Bei der Messung mit einem Interferometer wird die Topographie der zu messenden Fläche durch die Eigenschaften des Lichts in ein Interferenzstreifenmuster umgewandelt, das mit einer Kamera aufgenommen wird. Damit kann mit einem oder wenigen

Bildern die Information über die gesamte Fläche erhalten werden (**Bild 2**). Mit modernen Kameras lassen sich mehrere Millionen Oberflächenelemente parallel erfassen. Da die Kamera-Pixel eine gewisse Größe haben, ist die Information über das entsprechende Flächenelement gemittelt. Die so erzielbaren Ortsauflösungen liegen typischerweise bei einigen Mikrometern.

Ein besonderer Vorteil der interferometrischen Messung ist, dass sie berührungslos stattfindet und somit keine Schädigung der Oberfläche entstehen kann. Die Lichtstrahlen gelangen in Reflexion vom optischen System des Messgeräts auf den Prüfling und von diesem wieder zurück in das optische System. Für Planflächen oder Sphären hat sich diese Technik sehr bewährt, für Asphären sind die entstehenden Interferenzstreifenmuster allerdings ohne weitere Maßnahmen oftmals nicht brauchbar, sei es durch eine zu hohe Streifendichte oder dadurch, dass die Lichtstrahlen nicht mehr senkrecht auf die zu messende Oberfläche auftreffen. Hin- und Rückweg verlaufen dann nicht mehr durch dieselben Teile des Messgeräts, und es entsteht ein nicht zu vernachlässigender "Retrace"-Fehler. Zusätzlich werden die Zuordnung der Kamerabildpunkte zu den Koordinaten auf dem Prüfling und die notwendige Dekodierung der Topographieinformation aus den Interferenzstreifen sehr komplex.

Im Unterschied hierzu basiert die im Projekt verwendete flächige Messtechnik auf einem "Tilted Wave Interferometer" [5], das neben einer zentral ausgerichteten Wellenfront auch gekippte Wellenfronten aussendet. Dadurch werden die verschiedenen Oberflächenbereiche der Asphäre mit jeweils passend gekippter Wellenfront gemessen. Die besondere Herausforderung ist, wie schon erwähnt, die

Infokasten:

Das europäische Projekt EMRP – IND10

Optical and tactile metrology for absolute form characterization [4]

Laufzeit: 2011 bis 2014

Projektvolumen: 2,9 Mio. €

Förderung: gefördert durch die Europäische Gemeinschaft

- Ziele:**
- Absolute Formbestimmung beliebiger optischer Elemente
 - Vergleich von punktuell und flächenhaft abtastenden, taktilen und optischen Verfahren
 - Messunsicherheiten von einigen 10 nm für beide Verfahren
 - Verbesserung industrieller Messmethoden und Referenzstandards

14 Projektteilnehmer:

- CMI (Cesky Metrologicky Institut), Tschechische Republik
- LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), Frankreich
- METAS (Eidgenössisches Institut für Metrologie), Schweiz
- MKEH (Magyar Kereskedelmi Engedelyezési Hivatal), Ungarn
- PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Deutschland
- SMD (Dienst Nationale Standaarden), Belgien
- VSL B.V. (Van Swinden Laboratorium), Nationales Metrologie-Institut der Niederlande
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT), Deutschland
- IBS Precision Engineering bv, Niederlande
- Mahr GmbH, Deutschland
- Technische Universität Ilmenau/ Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), Deutschland
- TNO (Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek), Niederlande
- Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik (ITO), Deutschland
- Xpress Precision Engineering, Niederlande

komplexe mathematische Beschreibung und Analyse des Systems. Der dieser Thematik gewidmete Trainingskurs wird die Teilnehmer in die Beschreibung und Verwendung dieser interferometrischen Technik einführen und ihre Kenntnisse vertiefen.

Kurs 2, Taktile Messtechnik

Koordinatenmessgeräte sind weit verbreitet, um verschiedenste Arten von Oberflächen zu messen. In der Regel verwenden

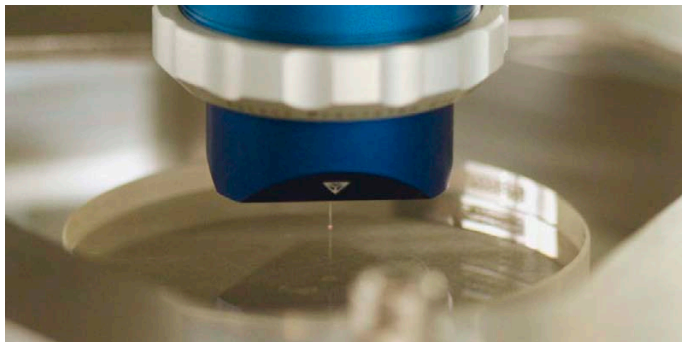


Bild 3: Die ultrapräzise Koordinatenmessmaschine TriNano N100 von Xpress Precision Engineering B.V., Eindhoven, NL, beim Ab-scannen einer optischen Planfläche zur Untersuchung dynamischer und transientscher Effekte des Messprozesses (Bild: Xpress)

sie Taster mit kugelförmiger Abtastgeometrie (**Bild 3**), die z.B. mit einem kartesischen aufgebauten Bewegungssystem über den zu messenden Körper bewegt werden. Hierdurch können nahezu beliebige Formen abgetastet werden.

Für eine hochauflösende Topografiemessung müssen allerdings viele verschiedene Bahnen gefahren werden, wodurch lange Messzeiten entstehen können. Der Berührungspunkt liegt je nach der lokalen Beschaffenheit des Messobjekts an verschiedenen Stellen der Tastkugel. Dies wird durch die Messgeräte berücksichtigt. Die für die Messung optischer Oberflächen, wie z.B. Asphären, benötigen sehr geringen Antastkräfte bewirken aber, dass es eine Reihe statischer und dynamischer Effekte gibt, die das Messergebnis beeinflussen können. Der zweite Kurs informiert über die Ergebnisse zu der-

artigen Effekten bei punktuell messenden Systemen. Diese müssen weiter verbessert werden, um die Genauigkeitsanforderungen von einigen 10 nm bei der absoluten Messung stark gekrümmter optischer Oberflächen erfüllen zu können. Zu diesem Zweck werden im Projekt virtuelle Experimente eingesetzt, die den gesamten Messvorgang realistisch auf dem Computer abbilden und die Charakterisierung der Messinstrumente ermöglichen. Die virtuellen Experimente werden verwendet, um Sensitivitätsanalysen aller Einflussgrößen vorzunehmen, um die wichtigsten Einflüsse zu identifizieren und dann durch gezielte Maßnahmen eine Verringerung der Unsicherheit zu erreichen. In den Trainingskurs werden die neuesten Erkenntnisse zu statischen und dynamischen Effekten bei Koordinatenmessgeräten einfließen.

Zusammenfassung

Das europäische Forschungsprojekt zur absoluten Formcharakterisierung von Asphären ist soweit fortgeschritten, dass erste Zwischenergebnisse an die Industrie und andere Interessierte weiter gegeben werden können. Interessenten sollten sich bereits jetzt in die Informationsliste aufnehmen lassen und werden benachrichtigt, sobald der Termin und das Programm für 2013 im Detail feststehen. Zur Interessensbekundung und Anmeldung nutzen Sie bitte den unten genannten Webcode und spezifizieren Sie Kurs 1 (Optische Methoden) oder Kurs 2 (Taktile Messtechniken).

Literaturhinweise:

- [1] J. Lincoln et al., *Die Hebelwirkung der Photonik in Europa*, Photonik 4/2011
- [2] Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über das Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizont 2020“, COM(2011/0401), S. 6
- [3] www.upob.de [20.2.2013]
- [4] European Metrology Research Project EMRP – IND10: *Optical and tactile metrology for absolute form characterization (2011)*, gefördert durch die Europäische Gemeinschaft und EURAMET e.V., www.ptb.de/emrp/ind10-home.html
- [5] E. Garbusi, C. Pruss, W. Osten, *Interferometer for precise and flexible asphere testing*, Opt. Lett. 33, 2973-2975 (2008)

Ansprechpartner:

Dr. Michael Schulz
EMRP-Projekt Koordinator
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig
Tel. 0531/592-4210
Fax 0531/592-4218
eMail: michael.schulz@ptb.de
Internet: www.ptb.de

www.photonik.de

► Webcode 2005