

Analyse der Schichtspannungen von Röntgenspiegeln mit einem Weißlichtinterferometer

Thorsten Döhring, Anne-Catherine Probst, Sebastian Zeising

*Fakultät Ingenieurwissenschaften, Hochschule Aschaffenburg
mailto:thorsten.doehring@h-ab.de

An der Hochschule Aschaffenburg werden iridiumbasierte Schichtsysteme für röntgenastronomische Anwendungen hergestellt. Unter Nutzung eines Weißlichtinterferometers wurde hierfür ein Verfahren zur Vermessung der inhärenten Schichtspannungen entwickelt. Erste vielversprechende Ergebnisse von spannungsarmen Röntgenreflexionsbeschichtungen werden vorgestellt.

1 Einführung: Spiegel für Röntgenteleskope

Die aktuelle Entwicklung zukünftiger satellitengestützter Röntgenteleskope auf Basis dünner Spiegelsubstrate stellt neuartige und anspruchsvolle Anforderungen an die Eigenschaften der benötigten Reflexionsschichten [1] [2]. Diese Schichten sollen breitbandig höchste Reflektivitäten im Photonenenergiebereich zwischen 1 keV und 10 keV aufweisen, die hohe Genauigkeit der präzise vorgeformten Spiegelsubstrate erhalten und zudem kostengünstig in einem serientauglichen Prozess aufgebracht werden. An der Hochschule Aschaffenburg werden in Kooperationen mit nationalen und internationalen Partnern iridiumbasierte Schichtsysteme für röntgenastronomische Anwendungen entwickelt [3]. Das optische Design eines in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Prag konzipierten Lobster-Eye Röntgenteleskops ist in Abbildung 1 gezeigt.

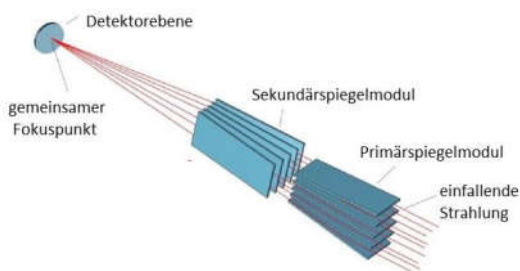


Abb. 1: Optisches Design eines satellitengestützten Lobster-Eye Röntgenteleskops [3].

2 Experimenteller Aufbau

Für die beschriebene Anwendung spielt neben den röntgenoptischen Eigenschaften die Minimierung der inhärenten Schichtspannungen eine entscheidende Rolle. Unter Nutzung eines gegen Schwingungen, Schall und Temperaturschwankungen isolierten Weißlichtinterferometers (WLI) wurde ein geeignetes Messverfahren zur Vermessung der Schichtspannungen entwickelt.

Das verwendete WLI-Messgerät TMS-500 der Fa. Polytec ist für den industriellen Einsatz in der

Oberflächenprofilometrie konzipiert und erreicht in vertikaler Richtung Genauigkeiten von wenigen Nanometern. Das Weißlichtinterferometer ist mit einem x-y-Verschiebetisch (200 x 200 mm²) ausgestattet und in Abbildung 2 gezeigt.

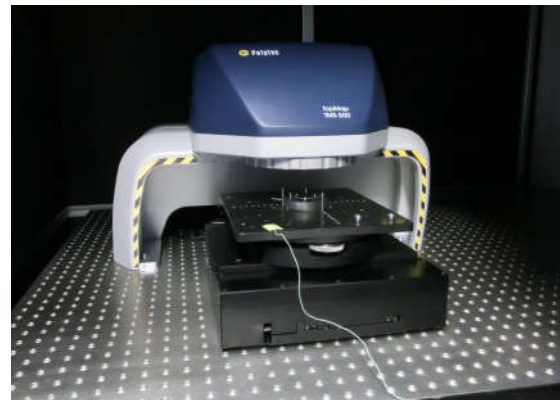


Abb. 2: Weißlichtinterferometer Polytec TMS-500.

Für die Anwendung wurden zur Erreichung höchster Messgenauigkeit weitere apparative Maßnahmen durchgeführt:

- Verwendung einer luftgefederten optischen Bank zur Schwingungsisolierung
- Einhausung zur Temperaturstabilisierung und als Abschirmung gegen Störlichteinflüsse
- Schalldämmung
- Temperaturstabilisierung der WLI-Elektronik vor den Messungen über mehrere Stunden

3 Ermittlung der Schichtspannungen

Die inhärenten Schichtspannungen in den aufgetragenen Iridium-Röntgenspiegelschichten führen zu einer störenden Deformation der nur 0.4 mm dünnen Spiegelsubstrate [1]. Die Schichtspannung σ wird über die modifizierte Stoney-Gleichung aus den gemessenen Spiegelradien vor (R_s) und nach der Beschichtung (R_{s+f}) ermittelt [4]. In die Berechnung gehen die Dicken von Substrat t_s und Schicht (t_f) sowie Materialeigenschaften des Substrates, der Elastizitätsmodul (E_s) und die Poissonzahl (ν_s) ein, wie in der folgenden Formel zu sehen ist.

$$\sigma = \frac{E_{st} s^2}{6t_f(1 - \nu_s)} \left(\frac{1}{R_{s+f}} - \frac{1}{R_s} \right)$$

Formel 1: Die modifizierte Stoney-Gleichung zur Berechnung von Schichtspannungen [4]

4 Radienmessung und Reproduzierbarkeit

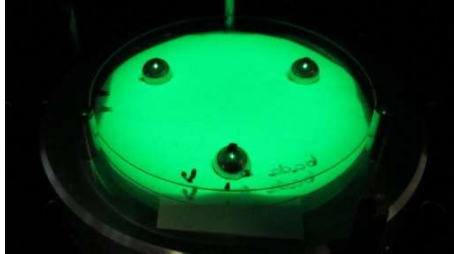


Abb. 3: 3-Punkt Lagerung eines Glassubstrates

Die Überprüfung der Genauigkeit der Ebenheitsmessungen wurde mit einem Ø200 mm großen, polierten Planspiegel aus Zerodur (N/20) durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass das Zusammenfügen mehrerer Einzelbilder (das sogenannte Stitching) für hohe Genauigkeiten nicht zu empfehlen ist. Daher finden die Radienmessungen an einem Einzelbild mit einem Messfeld von 21,9 x 16,5 mm² statt. Für diese Spannungsmessungen werden dünne Glassubstrate (Ø50 x 0,4 mm) vom Typ Schott D263 verwendet. Hierbei erfolgt eine Dreipunktlagerung der Messobjekte (siehe Abb. 3), Passstifte dienen als Anschläge zur reproduzierbaren Positionierung. Nach Mittelung über 10 Einzelmessungen erfolgen eine Glättung und der Fit der Kugelradien. In Abbildung 4 ist eine Überprüfung der Radienwerte durch Langzeitmessungen gezeigt. Die erhaltenen Absolutwerte der Radien wurden zudem an einer plankonvexen sphärischen Quarzglaslinse mit bekanntem Krümmungsradius überprüft. Trotz des recht kleinen Messfeldes können Kugelradien von 100 m mit hoher Reproduzierbarkeit bestimmt werden können.

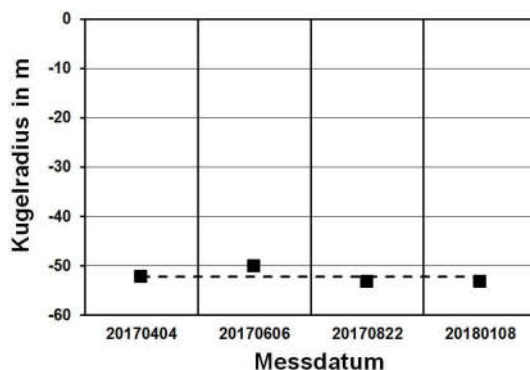


Abb. 4: Langzeitreproduzierbarkeit der Radienmessung

5 Kompensation der Ir-Schichtspannungen

Durch eine dickenangepasste Zwischenschicht aus Chrom können die hohen Schichtspannungen

der Iridium-Röntgenspiegelschichten kompensiert werden. Messergebnisse sind in Abbildung 5 gezeigt. Hierbei ist die gute Mikrorauigkeit der Substratoberfläche zu erhalten, um die Röntgenreflektivität des Spiegels nicht zu beeinträchtigen.

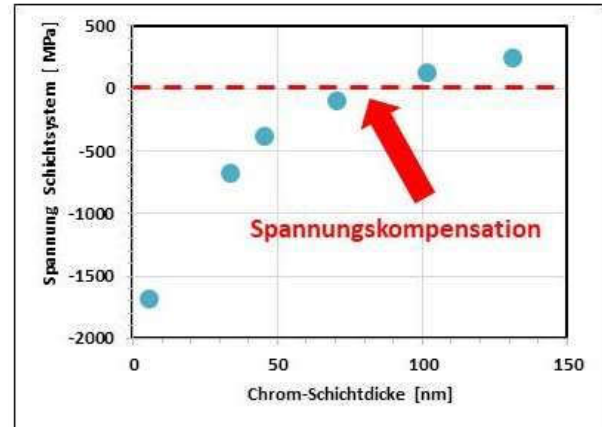


Abb. 5: Spannung des Cr/Ir-Schichtsystems in Abhängigkeit von der Cr-Schichtdicke

6 Zusammenfassung und Ausblick

Eingebunden in einen größeren Forschungszusammenhang entwickelt die Hochschule Aschaffenburg in bilateralen Kooperationsprojekten mit der Technischen Universität Prag Iridiumbeschichtete Röntgenspiegel. Dieser Beitrag beschreibt die zugehörige Vermessung der inhärenten Schichtspannungen. An Bord einer NASA-Höhenrakete sollen die entwickelten Spiegeloptiken später per Parabelflug kurzzeitig die Erdatmosphäre verlassen und dabei Röntgenstrahlung von schwarzen Löchern und Supernova-Explosionen detektieren.

Danksagung

Die Kooperationsprojekte JEUMICO, TRILAMICO und JODEXRA wurden von der bayerisch-tschechischen Hochschulagentur BTHA gefördert. In diese Arbeiten waren auch Tobias Schäfer, Josua Motkin und Dennis Flachs von der Hochschule Aschaffenburg mit involviert.

Literatur

- [1] T. Döhring et al.: "The challenging development of lightweight glass mirrors for future X-ray telescopes", DGaO-Proceedings 2016
- [2] A.-C. Probst et al.: "Iridium coatings for space based x-ray optics", Proc. SPIE 10562, 105621E (2017)
- [3] T. Döhring et al.: "JEUMICO - Bayerisch-tschechische Kooperation zur Entwicklung von Röntgenteleskopen", DGaO-Proceedings 2017
- [4] T. Begou and J. Lumeau: "Mechanical stress in dielectric mirrors: towards a fine control of the flatness", Proc. SPIE 10562, 105621F (2017)