

HOCHPRÄZISE MULTISCHICHTOPTIKEN FÜR DEN FREIEN RÖNTGENLASER (XFEL)

DIE AUFGABE

Für Experimente mit Femtosekunden-Zeitauflösung am derzeit im Aufbau befindlichen Europäischen Freien Röntgenlaser in Hamburg (European XFEL) werden Spiegeloptiken höchster Präzision und thermischer Stabilität gebraucht. Eine für diese Experimente verwendete Strahlteiler- und Verzögerungseinheit (engl.: Split and Delay Unit – SDU) besteht aus acht Ebenen Einzelspiegeln, die die extrem leistungsstarke Röntgenstrahlung des XFEL in zwei Strahlwege variabler Länge teilt und die beiden Teilstrahlen dadurch zeitversetzt überlagert zum Experiment abbildet (Abb. 2).

Die Herausforderung bei einer SDU für Röntgenstrahlung ($E_{\text{photon}} > 5 \text{ keV}$) besteht darin, dass die Reflexionswinkel der Spiegel sehr klein sind und damit für ausreichend große Laufzeitunterschiede die geometrische Längsausdehnung der SDU auf einige Meter anwächst [1]. Die für Reflexionswinkel im Bereich von $1 \dots 5^\circ$ notwendigen Multischichtoptiken haben nun die Besonderheit, dass für jede Photonenenergie ein bestimmter Reflexionswinkel präzise eingestellt werden muss und innerhalb des hier interessierenden Energiebereichs

($5 \dots 20 \text{ keV}$) auch verschiedene Schichtmaterialien die jeweils besten Reflexionsvermögen aufweisen. Das bedeutet, dass die Beschichtungen der einzelnen Spiegel perfekt zueinander passen müssen, um identische, für den Strahlteiler- »BS« bzw. den Rekombinierspiegel »RC« exakt die doppelten Ablenkwinkel zu gewährleisten.

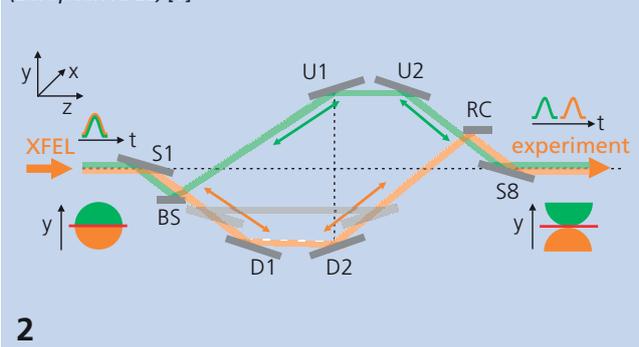
Neben der durch die intensive XFEL-Strahlung geforderten hohen thermischen Stabilität ergeben sich damit Präzisionsanforderungen der Schichtabscheidung im Bereich $> 99,9$ Prozent (das entspricht einem erlaubten Dickenfehler einer Einzelperiode von $2 \dots 5 \text{ pm}$). Außerdem müssen mehrere Materialkombinationen als Multilayer nebeneinander auf die Spiegelträger aufgebracht werden.

UNSERE LÖSUNG

Alle SDU-Spiegel des XFEL sind in drei Oberflächenbereiche untergliedert, auf denen jeweils für einen bestimmten Energiebereich die Materialsysteme $\text{Mo/B}_4\text{C}$, $\text{Ni/B}_4\text{C}$ und $\text{W/B}_4\text{C}$ mit verschiedenen Einzelschichtdicken und Periodenzahlen aufgebracht werden.

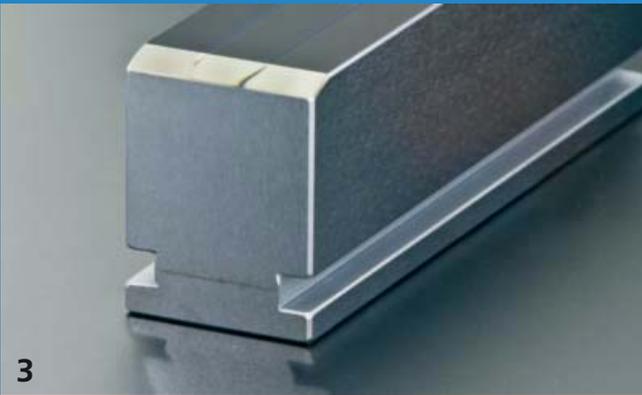
Eine dieser 3 Zonen weist zudem eine Besonderheit auf: hier sind sogenannte »Zweifarbexperimente« geplant, d. h., es sollen auf den beiden Strahlwegen verschiedene Photonenenergien getrennt und zeitversetzt überlagert werden (Grundenergie und die 3. harmonische Oberwelle). Die Spiegel S1 und S8 tragen daher spezielle Multilayerstapel, die die gleichzeitige Reflexion beider Energien bei einem festen Einfallswinkel ermöglichen [2].

Schematische Abbildung der Strahlteiler- und Verzögerungseinheit (Split and Delay Unit - SDU) am europäischen Röntgenlaser (European XFEL) [1]



[1] Roling, S. et al.: Proc. of SPIE Vol. 9210, 92100B (2014)

[2] Roling, S. et al.: Opt. Lett. 39, 2782 (2014)



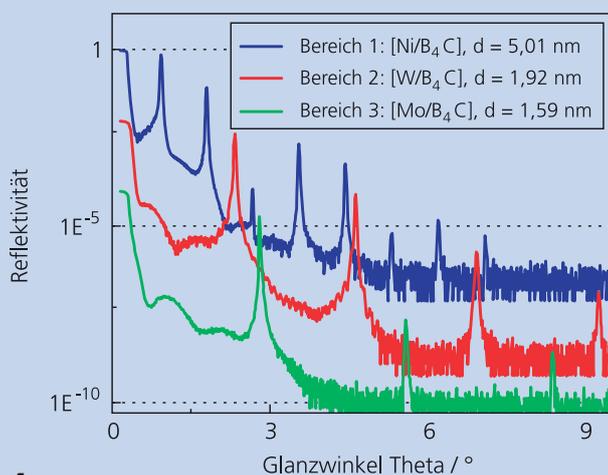
ERGEBNISSE

Die in Abbildung 1 dargestellten Spiegel der SDU haben eine Länge von 190 mm bei einer Breite von jeweils 30 mm. Der im Vordergrund abgebildete Strahlteilerspiegel ist 120 mm lang und besitzt eine angeschliffene »Teilerkante« (rechts im Bild). Sie wird direkt in der Mitte des XFEL-Strahlengangs angeordnet.

Mit Abschattungsmasken wurden auf jeden der SDU-Spiegel mittels Ionenstrahl- oder Magnetronsputtertechniken nacheinander jeweils 3 Multischichtstapel aufgebracht. Die Periodendicken der einzelnen Stapel lagen dabei im Bereich von 1,6 bis 5,0 nm. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Reflektogramme der Beschichtungen des Strahlteilerspiegels. Die Halbwertsbreiten der Reflexionspeaks erster Ordnung liegen hier im Bereich von nur 0,02...0,03 °, was gleichzeitig die Homogenitätsanforderung der Periodendicke in Längs- und Querrichtung jeder Beschichtungszone, aber auch der 8 Spiegel untereinander definiert (Dickenabweichung ca. $\pm 0,1...0,2$ Prozent).

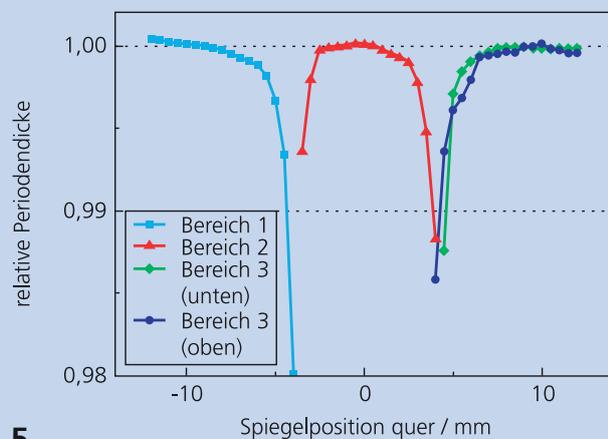
In Abbildung 5 sind die Homogenitätsprofile der Periodendicken der drei Beschichtungszone eines SDU-Spiegels in

Reflektogramme der drei Beschichtungszone des Strahlteilers (XRR-Messungen mit Cu-K α -Strahlung)



4

Homogenitätsvermessung der Periodendicken der drei Beschichtungszone eines SDU-Spiegels in Querrichtung



5

Querrichtung dargestellt (jeweils normiert auf die mittlere Periodendicke der Zone). Man erkennt, dass die Arbeitsbereiche etwa über 5...8 mm die geforderte Homogenität aufweisen und dazwischen Bereiche von ca. 3...4 mm Breite existieren, die ungenutzt bleiben müssen. Die gemessenen Abweichungen der Reflexionspeaklagen der acht SDU-Spiegel untereinander betragen maximal 0,005 °, was damit den gleichzeitigen Einsatz in der Verzögerungsanordnung gemäß Abbildung 2 garantiert.

1 Acht SDU-Spiegel für den European XFEL

3 Detailansicht der Strahlteilerkante des Spiegels »BS«

KONTAKT

Dipl.-Phys. Peter Gawlitza

+49 351 83391-3431

peter.gawlitza@iws.fraunhofer.de

