

Rückführbare Kalibrierung von räumlichen Winkeln: Der Spatial Angle Autocollimator Calibrator der PTB

Oliver Kranz, Ralf D. Geckeler, Andreas Just, Michael Krause
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig
<mailto:oliver.kranz@ptb.de>

In der PTB wurde ein neuartiges Kalibriersystem für Autokollimatoren (AK) entwickelt und realisiert, welches Kalibrierungen sowohl mit variablen Abständen als auch mit zweidimensionalen Winkelauslenkungen des AK-Strahls erlaubt. Wir stellen das Konzept und den Aufbau vor und erläutern die Rückführung der zweidimensionalen Winkelmessung auf Messungen von ebenen Winkeln.

1 Einführung

Für die Topographiemessung von Optiken, welche zur Strahlformung in Synchrotron- und FEL-Anlagen genutzt werden sowie von Ebenheitsstandards in Metrologielaboren, werden heutzutage vermehrt deflektometrische Messsysteme verwendet [1,2]. Diese Systeme nutzen AK, deren Strahlen von den Optiken reflektiert und deren Auslenkungswinkel gemessen werden. Die Oberflächentopographie kann schließlich durch Integration der gemessenen Winkel rekonstruiert werden.

Auf diese Weise wird die Formmessung auf eine Winkelmessung mittels AK rückgeführt. Durch diese Art der Profilometrie ergeben sich für die Kalibrierungen der AK besondere Anforderungen: Zum einen nutzen viele Systeme ein scannendes Pentaprisma, was zu variablen optischen Weglängen des AK-Strahls führt, zum anderen können Reflexionswinkel in Scanrichtung als auch senkrecht dazu auftreten.

Um den Einfluss dieser beiden Parameter - variable optische Weglänge und zweidimensionale Winkelauslenkung - auf die Winkelmessung des AK kalibrieren zu können, wurde in der PTB ein neues Messsystem konzipiert und eingerichtet, welches im folgenden vorgestellt wird: Der Spatial Angle Autocollimator Calibrator (SAAC).

2 Konzept und Anordnung der Komponenten

Die Hauptkomponenten des SAAC sind in Abb. 1 dargestellt. Drei AK (ein zu kalibrierender AK, zwei Referenz-AK) sind kartesisch zueinander angeordnet und auf einen Reflektorwürfel gerichtet, welcher sich auf einem 2D-Kippsystem befindet. Der Reflektorwürfel kann um die Nick- und Gierachse (aus Sicht des zu kalibrierenden AKs) rotiert werden. Die beiden Referenz-AK werden genutzt, um die Winkelerorientierung des Würfels zu bestimmen. Der zu kalibrierende AK ist auf einem Linearschlitten platziert, mit dem der Abstand zum Reflektorwürfel verändert werden kann. Die Rahmenanforderungen des Systems ergaben sich aus

der Notwendigkeit, Kalibrierungen mit variablen optischen Weglängen sowie bei zweidimensionalen Winkelauslenkungen durchführen zu können.

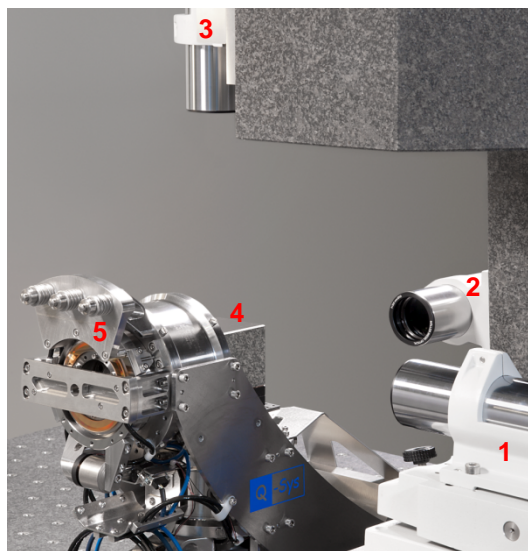


Abb. 1 Hauptkomponenten des SAAC. 1: zu kalibrierender AK (AK_0), 2 & 3: horizontaler (AK_1) und vertikaler (AK_2) Referenz-AK, 4: Reflektorwürfel, 5: Kippsystem

3 Messaufbau

Als metrologische Basis dient eine Granitplatte ($L \times B \times H$ 2950 × 850 × 400 mm³, Gewicht 3 t). Auf ihr befindet sich eine massive Brücke, an welcher die Referenz-AK (horizontal und vertikal) montiert sind, sowie das 2D-Kippsystem mit dem Reflektorwürfel und die Linearverschiebeeinheit mit dem zu kalibrierenden AK. Der SAAC befindet sich im Reinraumzentrum der PTB, welches sehr stabile Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur und laminarer Luftströmung bietet ($\Delta T = 0,01$ K/h). Die Granitplatte wird von sechs luftlagerbasierten, schwingungsisolierenden Beinen getragen, die direkt auf dem Betonfundament des Reinraumzentrums stehen und somit vom begehbaren Boden entkoppelt sind. Je zwei Beine haben eine gemeinsame Luftversorgung, das System ist somit effektiv auf drei Punkten gelagert.

Kernkomponente des SAAC ist das 2D-Kippsystem. Es besteht aus zwei Luftlagern, die als Rotationsachsen dienen und horizontale und vertikale Verkippungen des Würfels ermöglichen. Um eine möglichst tangentielle Kraftereinwirkung auf die Drehachsen zu realisieren, werden sie von jeweils zwei diametral gegenüberliegenden Tauchspulenaktuatoren angetrieben. Zur Regelung des Kippsystems wird die Winkelposition jeder Achse durch ein von zwei Abtastköpfen ausgelesenes Radialgitter bestimmt. Der Würfel kann durch das System in beiden Achsen um ± 2000 arcsec verkippt werden. Die integrierte Regelung erlaubt eine Reproduzierbarkeit der Positionierung von 0,02 arcsec. Bei 2D-Kalibrierungen ergibt sich eine große Zahl an Messpunkten, daher war gefordert, dass das Kippsystem beliebige Positionen innerhalb weniger Sekunden erreicht. Gefertigt wurden das Kippsystem und die Granitbasis von der Firma Q-Sys (Helmond, NL).

Zur Bestimmung der Winkelpositionen des Würfels werden Referenz-AK vom Typ Elcomat 3000 des Herstellers Möller Wedel Optical verwendet. Diese sind nicht in die Regelschleife des Kippsystems eingebunden.

Der Würfel selbst wurde aus einem Quarzsubstrat in zwei Varianten gefertigt: Die Seite, welche vom zu kalibrierenden AK angetastet wird, ist bei Variante 1 verspiegelt, bei Variante 2 unverspiegelt (4% Reflektivität). Die Seiten, welche von den Referenz-AK angetastet werden, sind immer verspiegelt, wobei die Verspiegelung aus einer Aluminiumschicht mit einer darüber liegenden Quarzschutzschicht besteht. Die Spiegelflächen haben Ebenheitsabweichungen von $< \lambda/40$ (P-V). Diese Genauigkeit ist nötig, um einen Einfluss der Oberfläche auf die Winkelmessung zu vermeiden.

Der zu kalibrierende AK befindet sich auf einer Linearverschiebeeinheit, deren Schlitten Kalibrierabstände von 20 cm bis 150 cm erlaubt.

4 Rückführbarkeit

Ein besonderer Aspekt des SAAC ist die Anordnung der drei AK, deren optische Achsen sich bei optimaler Anordnung im Schwerpunkt des Reflektorwürfels orthogonal schneiden. Der Würfel kann aus Blickrichtung des zu kalibrierenden AKs um seine Gier- und Nickachse gedreht werden, wobei die Nickachse mit der Drehung um die Gierachse mitrotiert wird. Aus Sicht des AK findet eine 2D-Winkelauslenkung des reflektierten Strahls statt. Anders verhält es sich bei den Referenz-AK. Während der horizontale Referenz-AK primär sensitiv für die Gierbewegung ist, „sieht“ der vertikale Referenz-AK primär den Nickwinkel des Würfels. In einem fehlerfreien System ergeben sich die von den Autokollimatoren gemessenen

horizontalen und vertikalen Winkel (in 2. Näherung) zu:

$$H_0 = -\varphi_z$$

$$V_0 = -\varphi_y$$

$$H_1 = -\varphi_z$$

$$V_1 = 0$$

$$H_2 = \varphi_y \varphi_z$$

$$V_2 = -\varphi_y$$

Die Indizes geben den AK an, 0: zu kalibrierender AK; 1: horizontaler und 2: vertikaler Referenz-AK. φ_z ist die Gierbewegung des Würfels, φ_y die Nickbewegung. Zur Ableitung der Raumwinkel der Würfelflächen aus diesen Messungen, siehe [4].

Die 2D-Kalibrierung wird herunter gebrochen auf zwei einzelne 1D-Messungen der Referenz-AK (primär H_1 und V_2), kann also auf deren Kalibrierungen für den ebenen Winkel rückgeführt werden. Diese werden an der PTB mit einer Standardmessunsicherheit von $u=0,005$ arcsec auf dem WMT 220 (dem Primärstandard für den ebenen Winkel) durchgeführt [5].

5 Ausblick

Der SAAC erweitert die Kalibriermöglichkeiten für AK deutlich: Verschiedene Abständen zwischen AK und Reflektor werden ebenso ermöglicht wie Kalibrierungen von räumlichen Winkeln. In Zukunft wird das System um zwei Winkelinterferometer erweitert werden, welche die differentiellen Winkel zwischen Reflektor und Linearschlitten messen. Dies ermöglicht es, den Abstand dynamisch zu verändern und gleichzeitig den Einfluss auf die Winkelmessung des AK zu charakterisieren.

Literatur

- [1] F. Siewert, J. Buchheim, S. Boutet, G.J. Williams, P.A. Montanez, et al., „Ultra-precise characterization of LCLS hard X-ray focusing mirrors by high resolution slope measuring deflectometry“ in: *Opt. Express* **20**, 4525-4536 (2012)
- [2] R.D. Geckeler, A. Just, M. Krause, V.V. Yashchuck, „Autocollimators for deflectometry: Current status and future progress“ in: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **616**, 140–146 (2010)
- [3] R.D. Geckeler, O. Kranz, A. Just, M. Krause, „A novel approach for extending autocollimator calibration from plane to spatial angles“ in *Adv. Opt. Technol.* **1** (6), 427–439 (2012)
- [4] O. Kranz, R.D. Geckeler, A. Just, M. Krause, „Modelling PTB's Spatial Angle Autocollimator Calibrator“ in *Proc. SPIE* **8789** (87890D), 1-11 (2013)
- [5] A. Just, M. Krause, R. Probst, R. Wittekopf, „Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator“ in *Metrologia* **40**, 288–294 (2003)