

Raytracing-Modellierung von Autokollimatoren

Oliver Kranz, Ralf D. Geckeler, Andreas Just, Michael Krause

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

<mailto:oliver.kranz@ptb.de>

Autokollimatoren (AK) sind optisch antastende Winkelmessgeräte, welche vielfach in der Industrie und in Forschungseinrichtungen eingesetzt werden. Zur Untersuchung der sehr variablen Messbedingungen (Abstand AK-Reflektor, laterale Blendenposition, Blendendurchmesser, Krümmung des Reflektors) auf die Winkelmessung wurden Raytracing-Simulationen durchgeführt.

1 Einführung und Motivation

In vielen Bereichen der Industrie, aber auch in FEL-, Synchrotron- und Metrologielaboren, werden AK zur optisch antastenden Winkelmessung genutzt. Für die eingesetzten AK ergeben sich unterschiedlichste Messbedingungen, die deutlich von denen abweichen können, für die der AK konzipiert und unter denen er kalibriert wurde und welche Auswirkungen auf die gemessenen Winkel haben.

Um den Effekt einiger Einflussgrößen auf die Winkelmessung des AK abschätzen zu können, wurden Raytracing-Simulationen durchgeführt, bei denen die relevanten Parameter verändert wurden.

2 Variable Parameter in den Simulationen

Die höchsten Anforderungen an AK-Winkelmessungen stellt die Profilometrie von optischen Oberflächen in Synchrotron-, FEL- und Metrologielaboren [1]. Die in den Simulationen genutzten Parameterwerte orientieren sich daher an diesem Einsatzgebiet.

In der AK-basierten Profilometrie wird der AK-Strahl durch ein Pentaprisma auf die zu untersuchende Oberfläche umgelenkt und von dort in den AK zurück reflektiert, um über die Winkelmessung die lokale Oberflächenneigung zu bestimmen.

Zur Rekonstruktion des Oberflächenprofils wird der gesamte Reflektor mit dem Pentaprisma „gescannt“, die Integration der gemessenen Winkel liefert dann das Profil. Während dieses Vorgangs ändert sich der Abstand zwischen AK und Reflektor (und damit die optische Weglänge des Strahls). Im Strahlengang befindet sich direkt vor der Oberfläche eine mitbewegte (für eine hohe Lateralauflösung möglichst kleine) Blende, deren Positionierung in Bezug zur optischen Achse kritisch ist. Zusätzlich kann sich diese während einer Messung durch die Nichtparallelität von Linearführung und optischer Achse des AK ändern. Die Oberflächen können starke lokale Krümmungen aufweisen, welche dann mit dem AK-Objektiv ein gemeinsames optisches System bilden und möglicherweise die Winkelmessungen beeinflussen.

In den Raytracing-Simulationen wurden verschiedene Abstände zwischen AK und Reflektor ($D = 25 \dots 1025$ mm), laterale Blendenpositionen ($x = -1,5 \dots 1,5$ mm), Krümmungsradien des Reflektors ($R = 3 \dots 100$ m) und Blendendurchmesser ($B = 1,5 \dots 32$ mm) für Neigungswinkel des Reflektors von -1000 bis 1000 arcsec simuliert. Die in den verschiedenen Simulationen jeweils konstant gehaltenen Parameter wurden typischen Anforderungen entsprechend gewählt.

3 Simulationsumgebung und Auswertung

Für die Raytracing-Simulationen wurde die Software ZEMAX verwendet. Es wurde ein Modell eines häufig genutzten, kommerziell erhältlichen AK erstellt. Von Interesse waren die Durchstoßpunkte der AK-Strahlenbündel durch eine Detektorfläche in der Fokalebene, welche den CCD-Sensor repräsentierte.

Die von ZEMAX gelieferten Daten wurden mit mathematica ausgelesen und über die Beziehung $\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{d}{f} \right)$ der vom AK gemessene Reflexionswinkel α ermittelt (d : Verschiebung Durchstoßpunkt, f : Brennweite AK-Objektiv). Von Interesse waren Differenzen zu den Winkeln, die der AK unter „Referenzbedingungen“ misst; hierfür wurden Simulationen mit entsprechenden Parametersätzen heran gezogen.

Die Simulationen wurden unter idealisierten Annahmen und rein geometrischen Aspekten durchgeführt. Das Modell des AK wies keinerlei Dejustagen und Fertigungstoleranzen der Optiken auf und die Eigenschaften des CCD-Sensors flossen nicht ein. Effekte wie Vignettierung und Beugung des AK-Strahls durch die Blende sowie ihr Einfluss auf die Auswertalgorithmen des AK wurden in dieser Betrachtung vernachlässigt.

4 Ergebnisse

4.1 Abstand AK - Reflektor

Abb. 1 zeigt den Einfluss verschiedener Abstände zwischen AK und Reflektor auf die Winkelmessung.

sung. Für $D = 1025$ mm liegt die Standardabweichung der Winkeldifferenzen für den gesamten Messbereich bei 0,17 arcsec (Standardmessunsicherheit für AK-Kalibrierungen an der PTB: $u = 0,005$ arcsec [2]), für einen kleineren Messbereich von -400 bis 400 arcsec dagegen lediglich bei 0,01 arcsec.

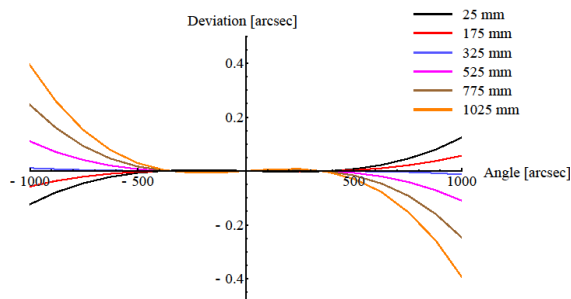


Abb. 1 Winkelabweichungen eines AK für verschiedene Abstände D zwischen AK und Reflektor mit $R = \infty$, $B = 5$ mm, $x = 0$ mm. Referenz: $D = 300$ mm.

4.2 Laterale Blendenposition

In Abb. 2 ist die Winkelabweichung in Abhängigkeit von der lateralen Blendenposition $x = -1,5$ bis 1,5 mm dargestellt. Simulationen zeigten, dass die Positionierung lediglich einen Einfluss auf die AK-Messachse in Richtung des Lateralversatzes hat.

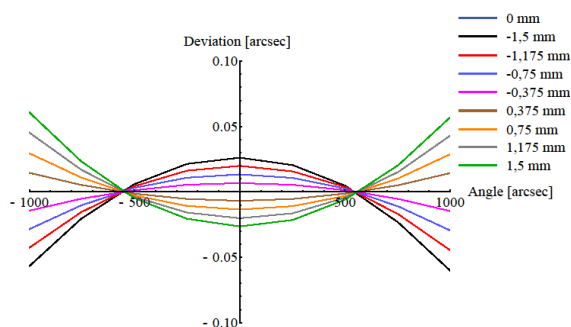


Abb. 2 Winkelabweichungen eines AK für verschiedene laterale Blendenpositionen x mit $D = 300$ mm, $R = \infty$, $B = 1,5$ mm. Referenz: $x = 0$ mm.

Die laterale Positionierung der Blende (innerhalb $x = -1,5 \dots 1,5$ mm) hat selbst für Winkel = 0 einen Einfluss auf die Winkelmessung mit einer Standardabweichung von 0,018 arcsec.

4.3 Blendendurchmesser

Der Einfluss des Blendendurchmessers auf die Winkelmessung wurde ebenfalls untersucht (Parameter: $D = 300$ mm, $R = \infty$, $x = 0$ mm). Für den gesamten Messbereich ergeben sich bei einer Blende von $B = 1,5$ mm Abweichungen von 0,012 arcsec (rms) zur Referenz ($B = 32$ mm). Im Allgemeinen ist die Blendengröße für verschiedene AK-Anwendungen im Vorfeld bekannt und AK-Kalibrierungen können mit den geforderten

Durchmessern durchgeführt werden. Die Kalibrierdaten beinhalten dann den Einfluss der Blende.

4.4 Krümmungsradius Reflektor

In der AK-basierten Profilometrie werden reflektierende Oberflächen mit variierenden Krümmungsradien von $R = \infty$ bis zu wenigen Metern vermessen. Für die Simulationen wurden folgende Parameter gewählt: $D = 300$ mm, $x = 0$ mm, $B = 2,5$ mm, $R = 3$ m bis 100 m. Als Referenz diente eine Simulation mit $R = \infty$. Für $R = 3$ m liegt die Standardabweichung der Winkeldifferenzen für den vollen Messbereich bei $<0,002$ arcsec, bei größeren Radien ist sie entsprechend geringer.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der Raytracing-Simulationen hat gezeigt, dass zwei der vier untersuchten Parameter (Reflektorabstand D , Blendenposition x , Blendendurchmesser B , Krümmungsradius R) einen nicht vernachlässigbaren Effekt auf die Winkelmessung von AK haben können.

Der Blendendurchmesser hat durch entsprechende AK-Kalibrierungen nur einen vernachlässigbaren Einfluss, ebenso wie die lokale Krümmung der Reflektoroberfläche, selbst für kleine Krümmungsradien (bei Verwendung einer kleinen Blende; Regelfall für derartige Messungen). Kritisch sind die laterale Positionierung der Blende und variable Abstände, vor allem bei Winkeln $|\alpha| > 400$ arcsec. Bei Veränderungen dieser Parameter tritt der reflektierte AK-Strahl mit verschiedenen Eintrittswinkeln und -orten auf das Objektiv. Durch die Eigenschaften der AK-Optiken (Objektiv-Aberrationen, Parallelversatz des Strahls durch Strahlteiler) variiert dann der Durchstoßpunkt des Strahls auf dem CCD-Sensor und damit auch der ermittelte Winkel im Vergleich zu einer Referenzsituation.

Die Simulationen lieferten Anhaltspunkte über den Einfluss äußerer Parameter auf die AK-Winkelmessung. Vergleiche mit realen Messungen werden im Rahmen eines EMRP-Projekts durchgeführt, wobei auch ein neuartiges, an der PTB realisiertes, Kalibriersystem eingesetzt wird [3].

Literatur

- [1] 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)
- [2] A. Just, M. Krause, R. Probst, R. Wittekopf, „Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator“ in: *Metrologia* **40**, 288-294 (2003)
- [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)