

Optimaler Einsatz und Kalibrierung von Autokollimatoren zur Formmessung mittels hochgenauer Deflektometrie

Ralf D. Geckeler, Andreas Just

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin,
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

<mailto:ralf.geckeler@ptb.de>

Anhand des Autokollimators in der ESAD-Anlage der PTB, welche die Topographiemessung optischer Planflächen mit Messunsicherheiten von unter einem Nanometer ermöglicht, werden jene Aspekte der Autokollimatorenanwendung und -kalibrierung beleuchtet, die für die hochgenaue Winkelmessung in der Deflektometrie besonders relevant sind. Diese betreffen die optimale Positionierung von Autokollimator, Aperturblende und Prüflingsoberfläche, wie auch die Winkeljustage der optischen Komponenten im deflektometrischen Aufbau relativ zu den Messachsen des Autokollimators. Damit kann eine maximale Fehlerreduktion bei der Winkelmessung in der Deflektometrie erzielt und eine optimale Rückführung auf die SI-Einheit erreicht werden.

1 ESAD Shearing-Deflektometrie

In der Optik werden elektronische Autokollimatoren (AK) vielfältig zur hochgenauen Winkelmessung eingesetzt, bsp. in deflektometrischen Formmesssystemen. So wurde an der PTB eine auf Deflektometrie basierende Messanlage entwickelt, welche die hochgenaue Bestimmung der Topographie von großen (bis 500 mm) planen und schwach gekrümmten optischen Flächen mit Messunsicherheiten von unter einem Nanometer ermöglicht [1-3]. Dabei wird das ESAD (*Extended Shear Angle Difference*)-Verfahren angewandt, das auf der Messung von Differenzen von Flächenneigungswinkeln beruht und in innovativer Weise die Deflektometrie mit der Shearing-Technik kombiniert [4-5]. In der ESAD-Anlage dient ein elektronischer Autokollimator zur hochgenauen und rückführbaren Winkelmessung [6-7], siehe Abbildung 1.

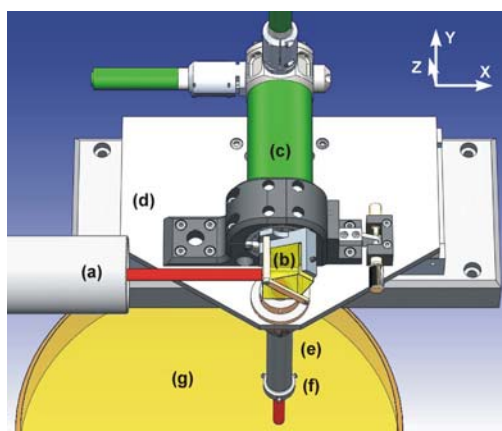


Abb. 1. Hauptkomponenten der ESAD-Anlage. Autokollimator (a); Pentaprisma (b); Pentaprismen-Kippeinheit (c); Lineartisch (d); Blendenhalter (e) mit Aperturblende (f); Prüfling (g).

2 Winkeljustage der optischen Komponenten

Das absolut messende ESAD-Verfahren nutzt die geradlinige Ausbreitung des Lichts (des AK-Messstrahls) als natürliche Geradheitsreferenz. Diese wird durch ein bewegliches Pentaprisma nutzbar gemacht, welches den Messstrahl um 90° auf die Prüflingsoberfläche ablenkt, siehe Abb. 1. Der Ablenkwinkel des Pentaprismas ist dabei robust gegenüber Fehlern in dessen Winkelorientierung, welche unvermeidlich bei der Verschiebung des Prismas entstehen. Diese werden nur als Fehlererflüsse höherer Ordnung wirksam. Um das fehlerreduzierende Potenzial des Pentaprismas optimal nutzen zu können, ist jedoch eine akkurate Grundjustage der Winkelorientierung des Prismas relativ zu dem durch die Messachsen und den Messstrahl des Autokollimators definierten Referenzkoordinatensystem notwendig. Hierfür wurde ein neues Verfahren zur automatisierten und hochgenauen Winkeljustage aller optischen Komponenten in der ESAD-Anlage (Pentaprisma und Prüfling) relativ zum Autokollimator entwickelt. Diese erfolgt vor jedem Messzyklus mit einer Unsicherheit der Justage um eine Winkelsekunde [3].

3 Kalibrierung von Autokollimatoren

Die Rückführung der Winkelmessung mit Autokollimatoren auf die SI-Einheit des ebenen Winkels erfolgt in der PTB durch Kalibrierung auf dem Winkelkomparator *Heidenhain* WMT 220 [8], dessen Messprinzip auf einer Kreisteilung und somit auf dem natürlichen, fehlerfreien Primärnormal des Vollwinkels $360^\circ = 2\pi$ rad beruht. Dabei werden die Messwerte des Autokollimators in einer statischen Messung in einem definierten Messbereich und in diskreten Messschritten direkt mit den Referenzwerten des WMT 220 verglichen [9]. Mess-

technische Basis des Komparators ist ein hochpräziser Luftlagertisch mit einem s.g. interferentiellen Messsystem. Dieses Messsystem besteht aus einer Teilkreisscheibe mit 2^{17} Gitterteilstrichen und acht Abtastköpfen, die in Intervallen von 45° angeordnet sind. Die Abtastköpfe liefern Signale mit doppelter Teilungsperiode, mit einer zusätzlichen Interpolation erreicht der Komparator eine errechnete Auflösung von $4 \cdot 10^{-4}$ arcsec. Die Abweichungen des Komparators können durch unterschiedliche Kalibrierverfahren bestimmt und korrigiert werden [10-11]. Die Auswertung der verschiedenen Kalibrierergebnisse und die Einbeziehung weiterer Messunsicherheitseinflüsse ergibt eine Standardmessunsicherheit für den WMT 220 gemäß [12] von $1 \cdot 10^{-3}$ arcsec.

Der Autokollimator ist neben dem Komparator auf einer massiven, justierbaren Granitplatte aufgebaut. Auf dem justierbaren Drehtisch des Komparators steht ein Glaskeramikblock, dessen Planfläche den Lichtstrahl des Autokollimators reflektiert. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Kalibrierung von Autokollimatoren sind PC-gesteuerte Wiederholungsmessungen in beiden Messrichtungen und in unterschiedlichen Relativlagen zum Winkelkomparator möglich. Die erreichbare Messunsicherheit für die Kalibrierung von Autokollimatoren gemäß [12] beträgt $4 \cdot 10^{-3}$ arcsec. Diese Unsicherheit wird im Wesentlichen von der Stabilität der Messbedingungen, von den messtechnischen Eigenschaften des Autokollimators und der Genauigkeit des Komparators bestimmt.

4 Systematische Einflüsse auf die Kalibrierung

Die Verwendung der ESAD-Anlage als primärer Ebenheitsstandard setzt voraus, dass die Messgrößen (Winkel und Länge), aus denen die Topographie unter Zuhilfenahme der mathematischen Algorithmen gewonnen wird, direkt auf die SI-Einheiten Länge und Winkel rückgeführt werden können. Dies geschieht durch die hochgenaue Kalibrierung der Messsysteme. Erst die möglichst genaue Übereinstimmung der Mess- und Kalibrierbedingungen ermöglicht den Transfer der Kalibrierung des Messsystems in die Messumgebung. Die ESAD-Differenzmethode gewährleistet dabei möglichst gut definierte und gleichbleibende Messbedingungen für den Autokollimator, und zwar unabhängig von der Prüflingsgröße.

Systematische Untersuchungen ergaben, dass sich eine Reihe von externen (durch den Benutzer definierbaren) Einflussgrößen auf die Winkelantwort und damit die Kalibrierung von Autokollimatoren auswirken können: (a) Form und Größe der verwendeten Aperturblende, (b) die Prüflingsreflektivität, (c) die Arbeitsdistanz AK - Prüfling, (d) die Positionierung der Blende entlang des AK-Messstrahls, sowie (e) die Blendenpositionierung senkrecht zum Messstrahl.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Einfluss der lateralen Position (senkrecht zum AK-Messstrahl) der Blende auf die Messabweichung des in der ESAD-Anlage verwendeten Autokollimators [13]. Ausgehend von den Messbedingungen in der Anlage wurden bei der Kalibrierung folgende Parameter konstant gehalten: (a) Kreisförmige Aperturblende \varnothing 5 mm, (b) unverspiegelte Planfläche (Glaskeramikblock), (c) Abstand AK - Prüfling 400 mm, und (d) Blende direkt vor der Planfläche. In dem eingeschränkten Messbereich von ± 15 arcsec verändert die Blendenposition im Wesentlichen die Steigung der AK-Messabweichung. Es treten maximale Steigungsänderungen von $6 \cdot 10^{-4}$ arcsec/arcsec pro mm Blendenversatz auf. Die Toleranz für die Blendenjustage in der ESAD-Anlage von ± 0.5 mm führt daher zu einem relativen Skalierungsfehler in der gemessenen Topographie von $\pm 3 \cdot 10^{-4}$, der für die meisten optischen Flächen völlig vernachlässigbar ist. Verursacht wird die Steigungsänderung der AK-Messabweichung vermutlich durch Linsenaberrationen des AK-Objektivs und die Justage des Detektors relativ zu dessen Brennebene. Weitere Untersuchungen sollen diese Einflüsse klären.

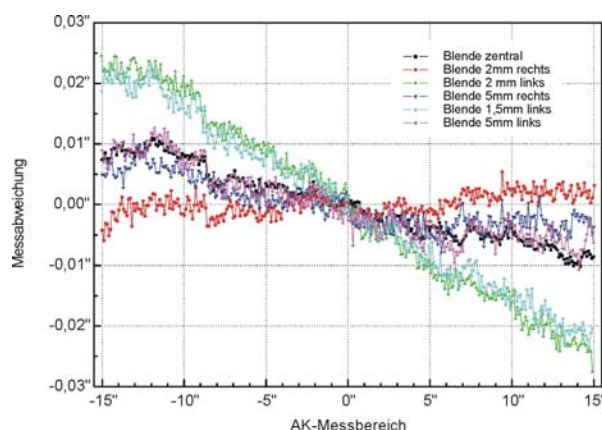


Abb. 2. Einfluss der lateralen Blendenposition auf die Messabweichung des Autokollimators.

5 Referenzen

- [1] R.D. Geckeler, Proc. SPIE **6293** (2006), 629300
- [2] R.D. Geckeler, Proc. SPIE **6317** (2006), 63171H
- [3] R.D. Geckeler, Meas. Sci. Technol. **18** (2007), 115-125
- [4] I. Weingärtner, M. Schulz, C. Elster, Proc. SPIE **3782** (1999), 306-317
- [5] C. Elster, I. Weingärtner, Appl. Optics **38** (1999), 5024-5031
- [6] R.D. Geckeler, I. Weingärtner, A. Just, R. Probst, Proc. SPIE **4401** (2001), 184-195
- [7] R.D. Geckeler, A. Just, R. Probst, I. Weingärtner, Techn. Messen **69** (2002), 535-541
- [8] R. Probst et al., Meas. Sci. Technol. **9** (1998), 1059-1066
- [9] A. Just, M. Krause, R. Probst and R. Wittekopf, Metrologia **40** (2003), 288-294
- [10] R. Probst, M. Krause, Proc. 2nd euspen (2001), 326-329
- [11] P.J. Sim, 1984, Modern Techniques in Metrology, ed. P.L. Hewitt (Singapore: World Scientific), 102-121
- [12] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1995, Geneva: ISO
- [13] Elcomat 3000, Möller Wedel Optical, <http://www.moeller-wedel-optical.com>