

Theorie und experimentelle Ergebnisse zur optimalen Justage von Pentaprismen

Ralf D. Geckeler

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

<mailto:ralf.geckeler@ptb.de>

Pentaprismen werden in der Optik zur Strahlableitung verwendet, so auch in der ESAD-Messanlage der PTB, welche die hochgenaue Bestimmung der Topographie von planen und schwach gekrümmten optischen Flächen mit Messunsicherheiten von unter einem Nanometer ermöglicht. Ein neu entwickeltes Verfahren erlaubt eine schnelle und hochgenaue In-Situ-Justage aller relevanten Winkel der optischen Komponenten im deflektometrischen Aufbau (Pentaprisma und Prüfling) relativ zum Autokollimator mit einer Unsicherheit von einigen μrad . Damit kann die Fehlerkomponente des Primenablenkwinkels, welche durch Änderungen der Winkelorientierung des Prismas bei dessen räumlicher Verschiebung entsteht, auf unter 1 nrad reduziert werden.

1 Einleitung

An der PTB wurde 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 [1-4]. 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 [5-6].

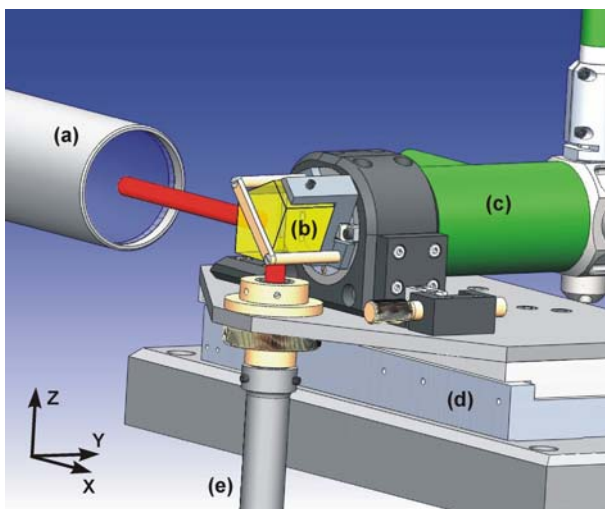


Abb. 1. Darstellung der opto-mechanischen Komponenten in der ESAD-Deflektometrieanlage.

Wie bei fast allen deflektometrischen Messsystemen dient auch in der ESAD-Anlage ein bewegliches Pentaprisma dazu, den Messstrahl um 90 Grad auf die Prüflingsoberfläche abzulenken, siehe Abb. 1 (Autokollimator (a); Pentaprisma (b); Pentaprismenkippeinheit (c); Lineartisch (d); Blen-

denhalter (e) mit Blende). Durch die Verschiebung des Prismas entlang des vom Winkelmessgerät (Autokollimator) ausgehenden Messstrahls können die lokalen Flächenneigungen an verschiedenen Punkten auf der Prüflingsoberfläche flexibel erfasst werden. Der Ablenkwinkel des Pentaprismas ist dabei robust gegenüber Fehlern in dessen Winkelorientierung, welche unvermeidlich durch dessen Verschiebung entstehen. Diese werden nur als Fehlereinflüsse 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, welche vor jedem Messzyklus mit einer Unsicherheit von einigen μrad erfolgt [7].

2 Raytracing-Simulationen

Der Strahlverlauf in dem in Abb. 1 gezeigten deflektometrischen Grundaufbau wurde mittels Raytracing simuliert [7]. Der Vertikalmesswinkel V des Autokollimators (der Winkel in der x - z -Ebene) ergibt sich dabei in der Näherung bis zur 2. Ordnung zu:

$$V = -\alpha_{pp}^2 + \alpha_{ac} (\alpha_{pp} - \gamma_{pp} - \alpha_{pr}) + \alpha_{pr} (\alpha_{pp} + \gamma_{pp}) - (\beta_{pr} - \beta_{ac}) \quad (1)$$

Die Winkel α , β und γ repräsentieren dabei die Roll-, Nick- und Gierwinkel (Rotationen um die Achsen x , y , und z), die Indizes ac , pp und pr kennzeichnen den Autokollimator, das Pentaprisma und den Prüfling. Anmerkung: Gemäß Konvention gibt der Autokollimatormesswert nur die Hälfte

der realen Messstrahlableitung an. Der Pitchwinkel β_{pp} des Pentaprismas bleibt ohne Einfluss auf V , auch bei strenger Berücksichtigung der Brechung an den Glas-Luft-Grenzflächen.

Beim Horizontalmesswinkel H (der Winkel in der x - y -Ebene) genügt es, lediglich Terme 1. Ordnung zu berücksichtigen:

$$H = \alpha_{pr} - \alpha_{pp} + \gamma_{pp} - \gamma_{ac} \quad (2)$$

3 Justageprozeduren und -parameter

Beim Rolltest wird der Rollwinkel α_{pp} des Pentaprismas variiert und die mit dem Autokollimator gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkel, $H(\alpha_{pp})$ und $V(\alpha_{pp})$, aufgezeichnet. Es ergibt sich ein typischer, parabelförmiger Verlauf des Vertikalwinkels V als Funktion des Horizontalwinkels H , welcher durch Anpassung einer Funktion 2. Ordnung $V(H) = a_0 + a_1 H + a_2 H^2$ analysiert wird (siehe Abb. 2a). Der gesuchte Justageparameter ist der Horizontalmesswinkel H_{roll} des Parabelextreimums, mit $H_{roll} = -a_1 / (2 a_2)$.

Beim Yawtest wird der Yawwinkel γ_{pp} des Pentaprismas variiert und $H(\gamma_{pp})$ und $V(\gamma_{pp})$ werden aufgezeichnet. Es ergibt sich ein typischer linearer Verlauf, welcher durch Anpassung einer Gerade $V(H) = b_0 + b_1 H$ analysiert wird (siehe Abb. 2b). Der gesuchte zweite Justageparameter ist die Steigung M_{yaw} der Best-Fit-Geraden $M_{yaw} = b_1$.

Aus den Gleichungen (1) und (2) ergeben sich die definierten Kenngrößen H_{roll} und M_{yaw} wie folgt:

$$\begin{aligned} H_{roll} &= \gamma_{pp} - \gamma_{ac} + 0.5 (\alpha_{pr} - \alpha_{ac}) \\ &= \gamma_{pp} - \gamma_{ac} + 0.5 M_{yaw} \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_{yaw} = \alpha_{pr} - \alpha_{ac} \quad (4)$$

Die Justage der optischen Komponenten erfolgt über folgende Justageschritte:

(A) Der Justageparameter $M_{yaw} = \alpha_{pr} - \alpha_{ac}$ (Yawtest), Gleichung (4), wird nahe Null gebracht, um den Prüfling bzgl. des Rollwinkels relativ zu den Messachsen des Autokollimators auszurichten.

(B) Wenn $M_{yaw} = 0$ ist, so folgt $H_{roll} = \gamma_{pp} - \gamma_{ac}$ aus Gleichung (3). Der Justageparameter H_{roll} (Rolltest) wird nahe Null gebracht um das Pentaprisma bzgl. des Yawwinkels relativ zum Messstrahl / zur opt. Achse des Autokollimators auszurichten.

(C) Wenn $M_{yaw} = 0$ und $H_{roll} = 0$ sind, so folgt aus Gleichung (2) für den Horizontalmesswinkel des Autokollimators $H = -(\alpha_{pp} - \alpha_{ac})$. Durch Minimierung auf $H = 0$ wird das Pentaprisma nun bzgl. des Rollwinkels relativ zu den H - und V -Messachsen des Autokollimators ausgerichtet.

(D) Durch Veränderung des Pitchwinkels β_{pr} des Prüflings kann der aus Gleichung (1) folgende Vertikalwinkels $V = -(\beta_{pr} - \beta_{ac})$ des Autokollimators auf $V = 0$ eingestellt werden. Dies richtet Prüfling und Autokollimator bzgl. des Pitchwinkels zueinander aus.

Anmerkung: Bedingt durch Abweichungen zwischen den realen Strahlengängen vom idealisierten Modell (bsp. durch ein geometrisch nicht ideales Pentaprisma) muss die Justage ggf. mehrmals hintereinander iterativ durchgeführt werden.

4 Experimentelle Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Resultate der Roll- und Yawtests bei einer typischen, nahezu optimalen Endjustage der optischen Komponenten in der ESAD-Anlage. (a) Rolltest zur Bestimmung der Lage des Parabelextreimums H_{roll} ($= -5.2 \mu\text{rad}$). Da $H \sim -\alpha_{pp}$, zeigt die Abb. den Vertikalwinkels V auch als Funktion des Rollwinkels des Pentaprismas. (b) Yawtest zur Bestimmung der Geradensteigung M_{yaw} ($= -1.8 \mu\text{rad}$). Da $H \sim \gamma_{pp}$, zeigt die Abb. den Winkel V auch als Funktion des Yawwinkels.

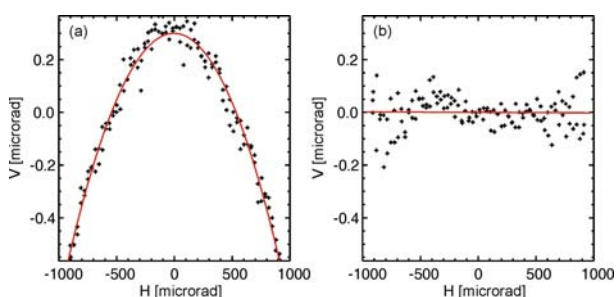


Abb. 2. Ergebnisse des (a) Roll- und (b) Yawtests.

Eine angenommene Rotation des Pentaprismas im Rollwinkel α_{pp} von $\pm 25 \mu\text{rad}$ (um $H=0$ in Abb. 2) resultiert in einem Fehler im relevanten Vertikalwinkels V des Autokollimators von $\pm 0.47 \text{ nrad}$. Die Fehlerangabe wurde aus der Best-Fit-Funktion abgeleitet. Eine Variation im Yawwinkel γ_{pp} von ebenfalls $\pm 25 \mu\text{rad}$ ergibt einen entsprechenden Fehler im Vertikalwinkels V von $\pm 0.04 \text{ nrad}$. Aufgrund der Streuung der Winkelmesswerte sind die für die Fehlerbestimmung verwendeten Best-Fit-Funktionen selbst mit Unsicherheiten behaftet (Standard-Unsicherheit $3.5 \mu\text{rad}$ für Parameter H_{roll} , $10.3 \mu\text{rad}$ für M_{yaw}). Auch bei deren Einbeziehung in die Analyse bleiben die Fehler im Vertikalwinkels jedoch innerhalb eines Bereichs von $\pm 1 \text{ nrad}$.

5 Referenzen

- [1] R.D. Geckeler, Proc. SPIE **6293** (2006), 629300
- [2] R.D. Geckeler, Proc. 6th EUSPEN Conf., ed. H. Zervos, Vol. 1 (2006), 390-393
- [3] R.D. Geckeler, Proc. SPIE **6317** (2006), 63171H
- [4] R.D. Geckeler, A. Just, R. Probst, I. Weingärtner, Techn. Messen **69** (2002), 535-541
- [5] I. Weingärtner, M. Schulz, C. Elster, Proc. SPIE **3782** (1999), 306-317
- [6] C. Elster, I. Weingärtner, Appl. Optics **38** (1999), 5024-5031
- [7] R.D. Geckeler, Meas. Sci. Technol. **18** No. 1 (2007), 115-125