

Numerische Untersuchungen über Möglichkeiten und Grenzen des polarisationsoptischen Dezentrierungsnachweises

Ralf Arnold, www.arnolds.de

Schlagwörter: Dezentrierungsmessung, Richtungssensor, Meßgenauigkeit, Savartsche Doppelplatte, Polarisationsoptik

Überblick

Unter Nutzung der Abhängigkeit des Gangunterschiedes zwischen den ordentlichen und außerordentlichen Strahlen eines Lichtbündels vom Einfallswinkel bei Transmission durch eine anisotrope Kristallplatte (Savartsche Doppelplatte) wurde durch Büchner und Harnisch /1/ ein polarisationsoptischer Sensor entwickelt, der die Messung der Richtung dieses Bündels im Bereich von Winkelsekunden ermöglicht. Dieser Sensor ist zur Durchführung von Dezentrierungsmessungen nutzbar. Im folgenden werden Ergebnisse numerischer Berechnungen vorgestellt, auf deren Basis unter Annahme praktisch-technischer Grenzen erreichbare Genauigkeiten ermittelt werden.

A polarisation-optical sensor, using the relationship of the phase difference between the ordinary and the extraordinary rays of a bundle of light after transmission from the incident angle of the entering bundle to an anisotropic crystal plate (Savart plate), was developed by Büchner and Harnisch /1/. It is able to measure the direction of the incident bundle using this sensor in the range of some arcseconds. A special field of use is the measurement of the decentering of lenses, cemented lenses or lens groups. Results of numeric calculations will be shown. The measuring accuracy will determine based on this results and on technical limitations.

1. Einleitung

Herkömmliche, auf der Basis eines Reflexbildes arbeitende Zentrierricht- und Prüfgeräte /2/ beruhen auf der Messung der Ablage des Krümmungsmittelpunkts einer rotierenden Fläche in Autokollimation. Die bei diesen Verfahren erreichbare Meßgenauigkeit der Flächenkipfung $\Delta\vartheta$ berechnet sich aus dem Krümmungsradius r und der Ablage des Krümmungsmittelpunktes Δy der zu untersuchenden Fläche:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta y}{2r}. \quad (1)$$

Die erreichbare Meßgenauigkeit nimmt daher mit dem Krümmungsradius der zu untersuchenden Fläche ab. Zusätzlich sinkt mit der Abnahme des freien Durchmessers der zu untersuchenden Fläche die numerische Apertur und damit das Auflösungsvermögen des Reflexbildgerätes. Bei der Untersuchung von Linsen kleinen Radius' und kleinen freien Durchmessers, Mikroskoplinsen seien hier als Beispiel genannt, wirkt sich die dadurch erreichbare Meßgenauigkeit fertigungstechnisch begrenzend aus. Weiterhin erfolgt die Beobachtung der Reflexmarke meist visuell. Dieser Prozeß ist wegen der oft sehr geringen Reflektivität der zu untersuchenden Fläche nicht oder nur ungenügend automatisierbar.

Neuere Verfahren verzichten daher auf die Abbildung einer Marke und verwenden die Lage eines Spots zur Detektion /3/. Dieser Prozeß ist automatisierbar, er bedingt aber den erhöhten Aufwand der Nutzung von Wechselobjektiven und der ebenfalls erforderlichen Rotation des Prüflinges.

Zur Lösung des Problems wurde von Büchner und Harnisch /1/ ein die Richtungsabhängigkeit der Savartplatte ausnutzender, polarisationsoptischer Sensor entwickelt, der die Messung der Richtung eines Lichtbündels gestattet, und der zur Messung der Kippung einer Fläche einsetzbar ist. Dieser Sensor und der zur Messung der Flächenkipfung notwendige Aufbau sollen nachfolgend kurz erläutert werden.

2. Der Richtungssensor

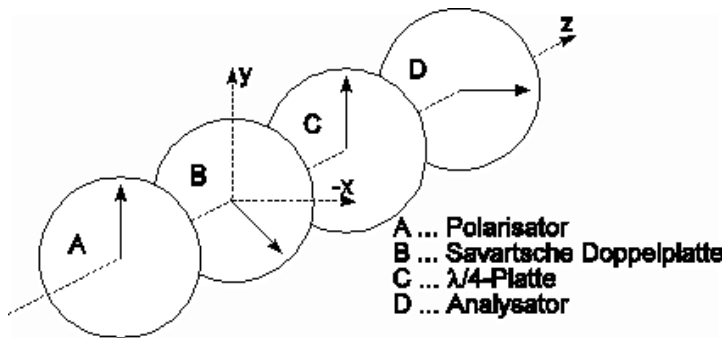


Bild 1: Aufbau und Azimutlagen der Elemente des Sensors

Der Richtungssensor gestattet die Messung der Richtung eines ihn durchsetzenden Bündels. Seine Funktionsweise (Bild 1) läßt sich folgendermaßen beschreiben: Der Polarisator (A) erzeugt aus den einfallenden unpolarisierten ebenen Wellen linear polarisierte Wellen. Diese werden an der Savartschen Doppelplatte (B) $\lambda/4$ in ordentliche und außerordentliche Wellen gleicher Amplitude zerlegt, deren vom Einfallswinkel ε an der Savartschen Doppelplatte abhängige Phasendifferenz δ

$$\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \left\{ K_1 \sin \varepsilon (\cos \Psi + \sin \Psi) + K_2 \left[\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{n_e^2} (1 - K_1 \cos^2 \Psi)} - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{n_e^2} (1 - K_1 \sin^2 \Psi)} \right] \right\} \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}; \quad K_2 = \frac{n_o n_e}{\sqrt{0,5(n_o^2 - n_e^2)}}$$

beträgt $\lambda/5$. Hierin bedeuten λ die Wellenlänge des verwandten Lichtes, d die Dicke der Savartschen Doppelplatte, Ψ den Winkel der Einfallsebene des Bündels zum Hauptschnitt der ersten Kristallplatte der Savartschen Doppelplatte und n_o und n_e die ordentliche und außerordentliche Brechzahl der Doppelplatte. Die $\lambda/4$ -Platte (C) wandelt diese linear polarisierten ordentlichen beziehungsweise außerordentlichen Wellen in rechtszirkular beziehungsweise linkszirkular polarisierte um, die sich zu linear polarisierten Wellen mit einer von der an der Savartplatte entstandenen Phasendifferenz abhängigen Azimutlage überlagern. Der Analysator (D) dient zur Feststellung dieser Azimutlage.

Ordnet man die Savartsche Doppelplatte unter einem Winkel von $\Psi = -135^\circ$ zur x-Achse, so ist der Sensor gegen die in der x-z-Ebene liegende Richtungskomponente unempfindlich, nur der in der y-z-Ebene vorhandene Anteil ε des beliebigen Einfallswinkel wird berücksichtigt. Gleichung (2) vereinfacht sich zu

$$\delta = - \frac{\pi d}{\lambda} \left\{ \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} \sqrt{2} \sin \varepsilon \right\}. \quad (3)$$

Diese Aussage gilt aber nur für ebene Wellen. Läßt man eine geringe Divergenz 2ε des symmetrisch entlang der z-Achse einfallenden Bündels zu, sodaß die Bedingung $\delta(\varepsilon) < \lambda/2$ erfüllt ist, dann sind alle an den Wellen entstehenden Phasendifferenzen um mehrere Größenordnungen unempfindlicher gegen Abweichungen vom symmetrischen Einfall in der x-z-Ebene als in der y-z-Ebene. Zur Berechnung der Phasendifferenzen an nicht ebenen Bündeln muß Gleichung (2) Verwendung finden.

Durch die Phasendifferenzen entsprechend Gleichung (2) wird die Intensitätsabhängigkeit, daß heißt das Verhältnis von durchgehender Intensität I zu einfallender Intensität I_0

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

des den Sensor transmittierenden Bündels bei gekreuzten Polarisatoren bestimmt.

3. Der Zentriermeßkomplex

Ein mit einem derartigen Sensor ausgerüstetes Zentriermeßgerät zur Messung des in der y-z-Ebene liegenden Anteils der Dezentrierung hat den in Bild 2 dargestellten Aufbau.

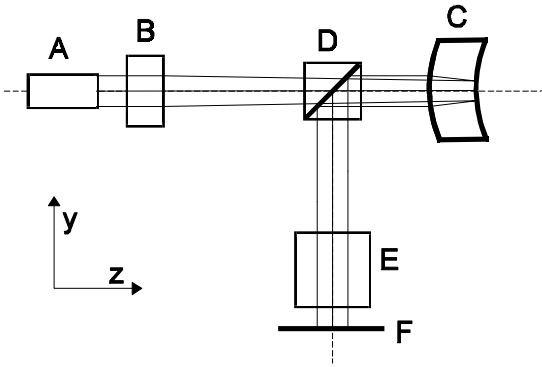


Bild 2: Strahlverlauf am Zentriermeßgerät

Ein durch eine Lichtquelle (A) erzeugtes, paralleles, unpolarisiertes Bündel wird mit einem Objektiv (B) derart in den Brennpunkt der als Spiegel wirkenden Prüflingsfläche fokussiert, daß das den Prüfling (C) verlassende, annähernd parallele Bündel um den doppelten Betrag der Kippung der Prüflingsfläche gegen die Systemachse verkippt ist. Die Systemachse wird hierbei durch die Normale der Savartschen Doppelplatte im Sensor (E) definiert. Nach Reflexion am Strahlteiler (D) und Transmission des Richtungssensors (E) entsteht ein Interferogramm, das am Schirm (F) zur Anzeige gelangt.

Die auf den Schirm (F) der Fläche $\Delta x \Delta y$ einfallende, normierte Leistung P_n beträgt

$$P_n = \frac{1}{P_{ges}} \iint_F \sin^2 \left(\frac{\pi d}{2 \lambda} \left\{ K_1 \sin \varepsilon (\cos \Psi + \sin \Psi) + K_2 \left[\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{n_e^2} (1 - K_1 \cos^2 \Psi)} - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{n_e^2} (1 - K_1 \sin^2 \Psi)} \right] \right\} \right) dx dy$$

$$K_1 = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}; \quad K_2 = \frac{n_o n_e}{\sqrt{0,5(n_o^2 - n_e^2)}} \quad (5)$$

wobei P_{ges} die auf den Schirm einfallende Gesamtleistung bezeichnet.

Da der Sensor (E) nur gegen den in der y-z-Ebene (Bild 2) liegenden Anteil der Flächenkippung wesentlich empfindlich ist, müßte zur Messung des in x-z-Ebene liegenden Anteils der Flächenkippung ein zweiter, um 90° um die Systemachse gedrehter Sensor E' (Bild 3) genutzt werden.

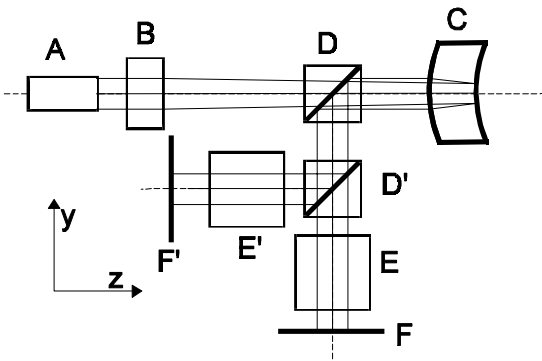


Bild 3: Strahlverlauf am einem Zentriermeßgerät zur Messung beider Anteile der Flächenkippung

Wir haben die Wirkung eines derartigen, polarisationsoptischen Zentriermeßgerätes unter Nutzung der Anordnung nach Bild 2 rechnerisch simuliert. Zur Strahlrechnung (Bild 4), die unter Verwendung des vektoriellen Brechungsgesetzes nach einem Algorithmus von Tautz und Haferkorn /6/ erfolgt, wird der Strahlteiler vernachlässigt. Die brechenden Flächen sind fortlaufend durchnummeriert.

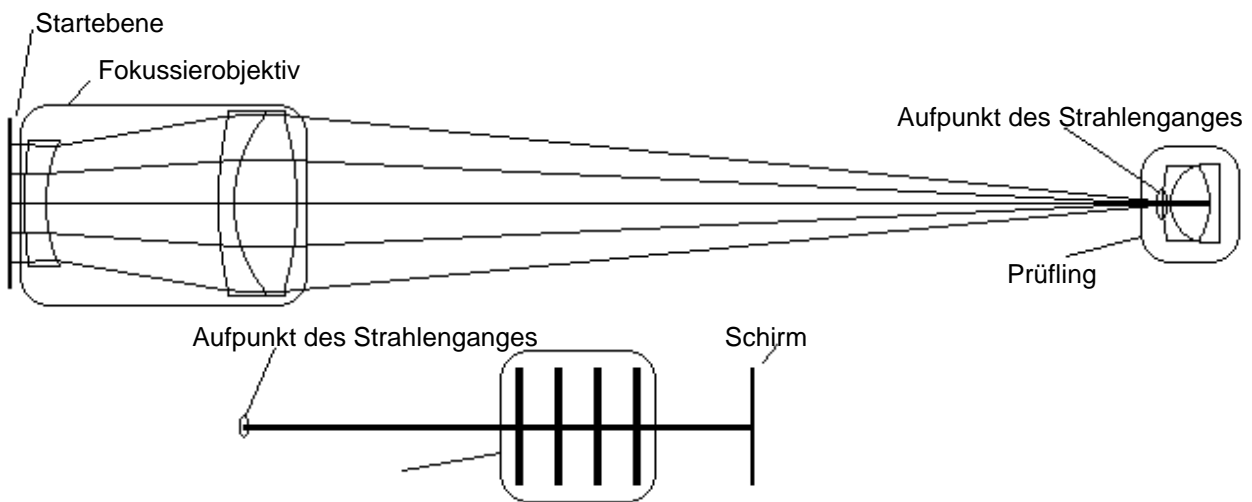


Bild 4: Schema zur Strahlrechnung und Darstellung des verwandten Datensatzes

4. Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Grundlage der Untersuchung bildet die Annahme, daß als Empfänger in der Schirmebene ein Fotodetektor Verwendung findet, der die Linearität des Detektorstromes über einen Bereich von mehreren Größenordnungen gewährleistet. Dieser liefert einen der auf die Detektorfläche einfallenden Leistung (Gleichung 5) proportionalen Strom, der als elektrisches Meßsignal genutzt wird. Die Bildserien wurden durch Berechnung eines auf die Optik einfallenden Parallelbündels des Radius' 10 mm gewonnen, wobei eine Zerlegung des Bündels in 56048 Strahlen gleicher Intensität erfolgte. Die zu untersuchende Fläche der in Bild 4 dargestellten Optik war (mit Ausnahme der Kurve 2 im Bild 5 - Fläche 9) immer die Fläche 8. Die zur Berechnung verwandte Savartplatte ist 2 mm dick und besteht (außer bei Kurve 7 im Bild 6) aus Quarz der Brechzahlen $n_o = 1,54295$ und $n_e = 1,55202$.

Bild 5 zeigt die Untersuchung der Einflüsse der Fokussierung auf den Hauptschnitt der zu prüfenden Fläche, wobei alle Kurven des Bildes 5 auf das Maximum der Kurve 1 normiert wurden. Die Kurven 1 und 2 stellen die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Leistung bei Reflexion an Flächen verschiedener Hauptschnitte (Fläche 8 - Hauptschnitt 1,7 mm; Fläche 9 - Hauptschnitt 30,9 mm; Hauptschnitt bezogen auf den strahlenseitigen Schnittpunkt der Prüflingsoberfläche mit der Systemachse) gegen die Defokussierung an der zentrierten Optik dar. Zu sehen ist, das die Abhängigkeit mit wachsendem Hauptschnitt geringer wird. Kurve 3 wurde nach dem Datensatz der Kurve 1 unter Dezentrierung der reflektierenden Fläche 8 mit dem Kippwinkel $\vartheta = 0,5^\circ$ und dem gegen die x-Achse geltenden Azimut $\varphi = 270^\circ$ berechnet. Es ergibt sich eine zu Kurve 1 inverse Abhängigkeit, was darin begründet liegt, daß das Zentrum der vom Empfänger detektierten Interferogramme dezentrierungsbedingt im ersten Maximum des Streifensystems der Savartschen Doppelplatte befindet. Daraus leitet sich die Forderung nach der Vorfokussierung ab. Will man das Meßsignal zur Fokussierung nutzen, dann muß bei Prüflingsflächen des Hauptschnittes kleiner 2 mm die Vorfokussierung ΔF auf den selben besser als $\Delta F = \pm 0,5$ mm sein, um den Hauptschnitt auf der Basis des Meßsignales anfahren zu können.

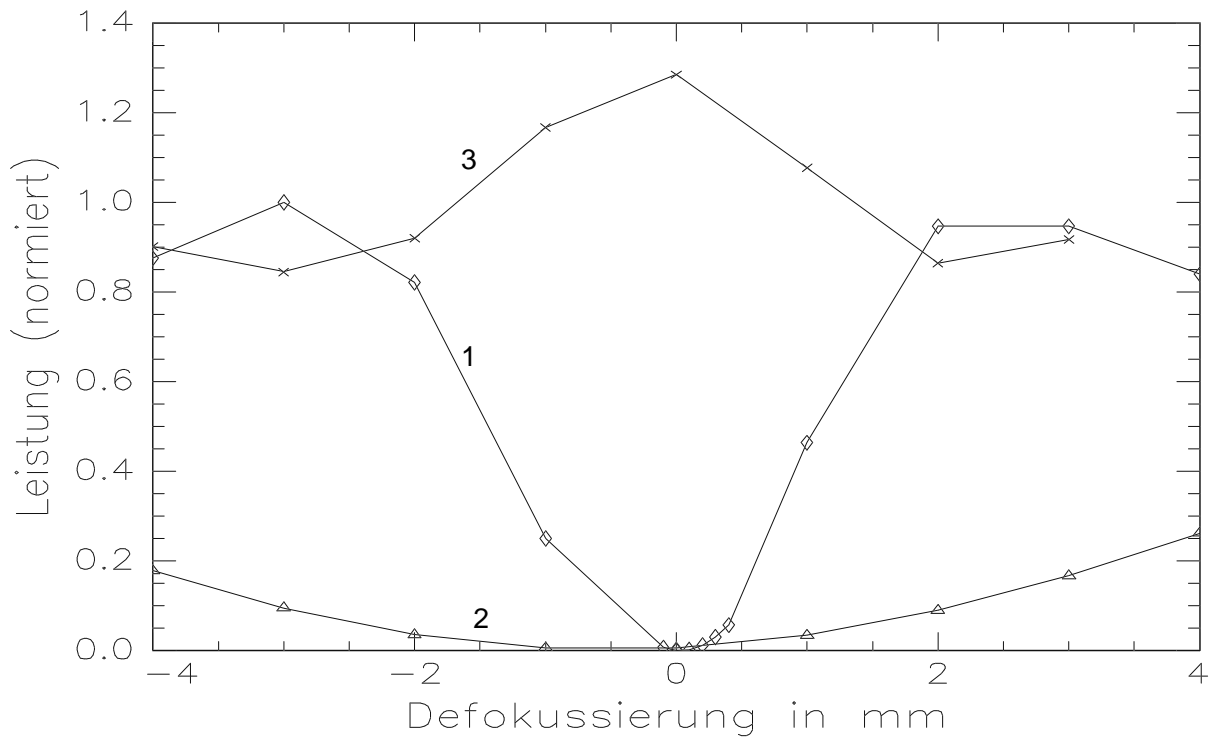


Bild 5: Berechnete Einflüsse der Fokussierung auf den Hauptschnitt der zu prüfenden Fläche auf die den Empfänger erreichende Leistung

Zur Untersuchung der Abhängigkeit des Meßsignales von der Dezentrierung erfolgte die Berechnung der Kurven des Bildes 6. Dazu wurde die zu prüfende Fläche bei konstantem Azimut $\varphi = 270^\circ$ um den Kippwinkel ϑ dezentriert und die berechneten, auf das Maximum der Kurve 4 normierten Leistungswerte dargestellt. Die Leistungs-Dezentrierungsbeziehung im auf den Hauptschnitt der Prüflingsfläche fokussierten Zustand zeigt Kurve 4. Die Leistungswerte wachsen stetig an, bis bei $\vartheta = 0,75^\circ$ das erste

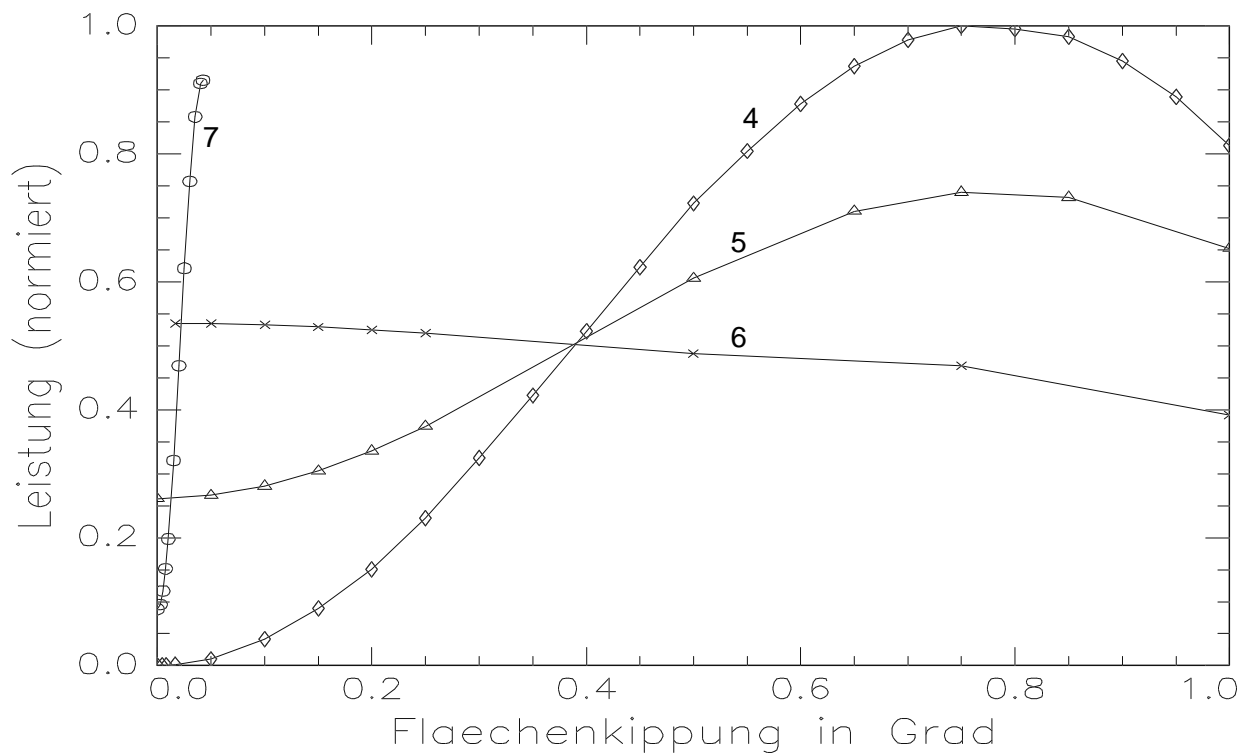


Bild 6: Berechnete Abhängigkeit des Meßsignales von der Dezentrierung der zu prüfenden Fläche

Intensitätsmaximum des Sensors überschritten wird. Um die Einflüsse einer möglichen nicht exakten Fokussierung auf den Hauptschnitt der zu zentrierenden Fläche zu untersuchen, wurden Kurve 5 bei einer Defokussierung von 1 mm und Kurve 6 bei einer Defokussierung von 2 mm berechnet. Dabei zeigt Kurve 5 die qualitativ gleiche Abhängigkeit wie Kurve 4, wobei der Kontrast sinkt. Bei weiterer Defokussierung (Kurve 6) geht die Abhängigkeit in einen indefiniten Zustand (Erfassung mehrerer Maxima und Minima durch den Empfänger) über. Um die Eindeutigkeit des Zusammenhanges der Dezentrierung mit dem Meßsignal zu wahren, muß der Meßbereich und damit die zu fordernde Vorzentrierung geringer als die Lage des Winkels des ersten Maximums sein. Dem entspricht bei der zur Berechnung verwandten Quarz-Savartplatte mit 2 mm Dicke die Begrenzung des Meßbereiches auf $\vartheta < 0,70^\circ$. Diese Forderung hängt aber letztlich von der in Bild 6 dargestellten Empfindlichkeit der Savartplatte gegen den Einfallswinkel ab. Deshalb erfolgte identisch zu Kurve 4 die Berechnung der Kurve 7 (in Bild 6 nur teilweise dargestellt), wobei die Savartplatte hier aus Kalkspat der Brechzahlen $n_o = 1,65$ und $n_e = 1,48$ besteht. Zur besseren Veranschaulichung wurde Kurve 7 nochmals gesondert in Bild 7 dargestellt. Diese Darstellung ist auf ihr Maximum normiert.

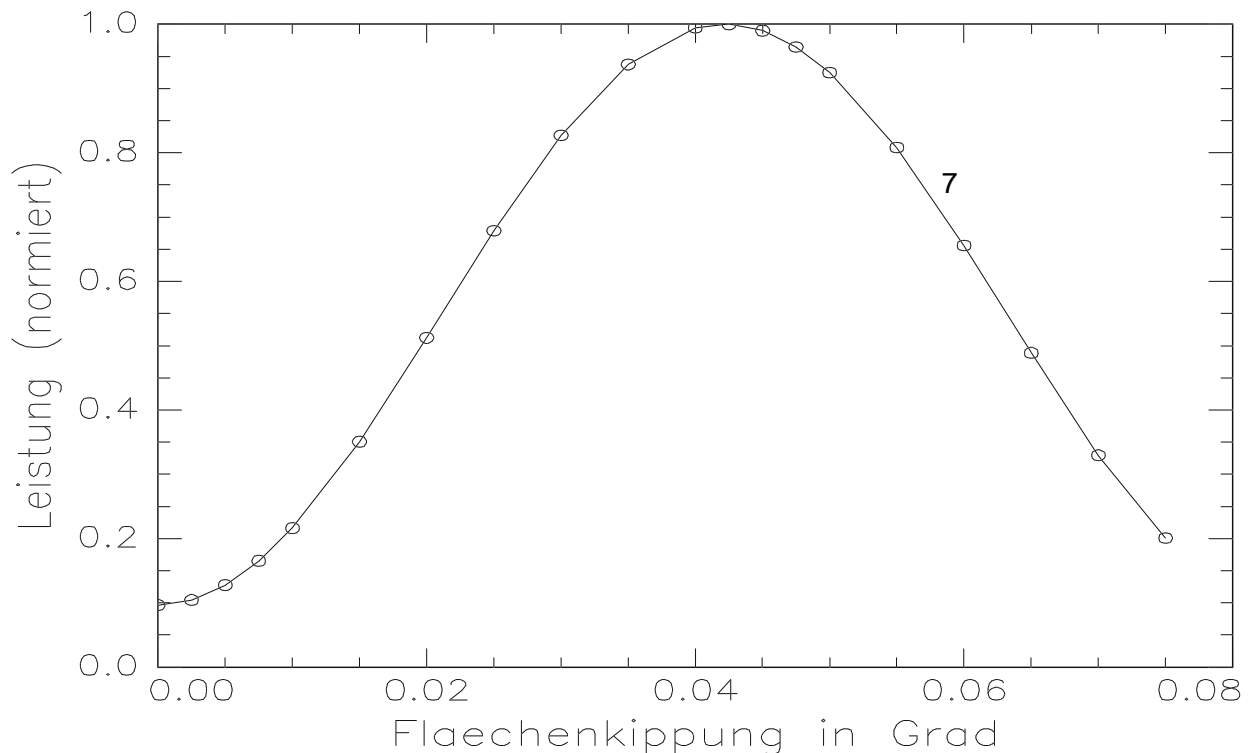


Bild 7: Berechnete Abhängigkeit des Meßsignales von der Dezentrierung der zu prüfenden Fläche unter Verwendung einer aus Kalkspat bestehenden Savartschen Doppelplatte

Sind beide Vorbedingungen ($\vartheta < 0,70^\circ$; $\Delta F = \pm 0,5$ mm) erfüllt, kann der Fokus angefahren und der Prüfling zentriert werden. Dies könnte in schwierigen Fällen einen Iterationsprozeß Zentrierung-Fokussierung-Zentrierung erforderlich machen. Erreichbare Genauigkeiten hängen von der Leistungsfähigkeit der zur Auswertung des Meßsignales verwandten elektronischen Einheit ab. Ist der Meßfehler der Auswerteeinheit kleiner 0,15%, so liegt die erreichbare Meßgenauigkeit mit der 2mm-Quarz-Platte bei 1', mit der 2mm-Kalkspatplatte bei 15".

Zur weiteren Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Systems ist es möglich die Savartsche Doppelplatte zu Kippschwingungen anzuregen. Diese müssen symmetrisch zur Systemachse erfolgen. Die Amplitude der Schwingung sollte den halben Wert der Winkellage des ersten Interferenzmaximums des Sensors besitzen. Die daraus resultierende Kleinsignalmodulation zeigt Bild 8. Im zentrierten Fall ist dann das Meßsignal mit der doppelten Frequenz der Schwingungen der Savartplatte moduliert. Im dezentrierten Fall entsteht zusätzlich eine Modulation in der Frequenz der Savartplatte, die sich überlagert. Ihre Amplitude wächst mit der Dezentrierung. Selektiert man nun letztere Schwingung durch Filterung (Lock-In), so ist die erreichbare

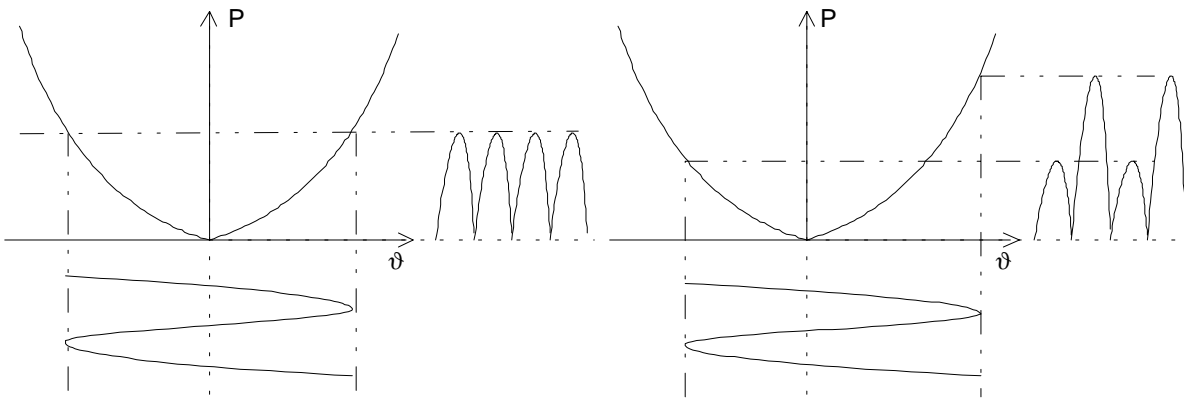


Bild 8: Kleinsignalmodulation durch Schwingungen der Savartschen Doppelplatte

Zentriergenauigkeit nur noch von der Selektivität und der Empfindlichkeit des Lock-In-Meßgerätes abhängig. Dadurch läßt sich etwa eine Verzehnfachung der Meßgenauigkeit erreichen.

5. Vergleich mit experimentelle Ergebnissen

Die Experimente wurden mit dem im Bild 4 beschriebenen Aufbau unter Verwendung der Kleinsignalmodulation am zum numerischen Satz der Optikdaten identischem Fokussierobjektiv und Prüfling (Kittglied) durchgeführt. Die durch die stufenweise eingestellte Dezentrierung der Prüflingsfläche (Fläche 8) entstehende Veränderung des Kleinsignaloszillogramms (Bild 8, rechts) wurde durch manuelle Nachstellung des Azimuts des Analysators (D in Bild 2) kompensiert, bis nach visueller Beobachtung das Oszillogramm wieder dem Ausgangszustand entsprach (Bild 8, links). Die Meßgenauigkeit der gesamten elektrischen Auswerteschaltung zur Ansteuerung des Oszillografen lag bei etwa 10^{-4} . Die im experimentellem Aufbau verwandte Savartsche Doppelplatte hatte eine Gesamtdicke $d = 2 \text{ mm}$ und bestand aus Quarz. Als

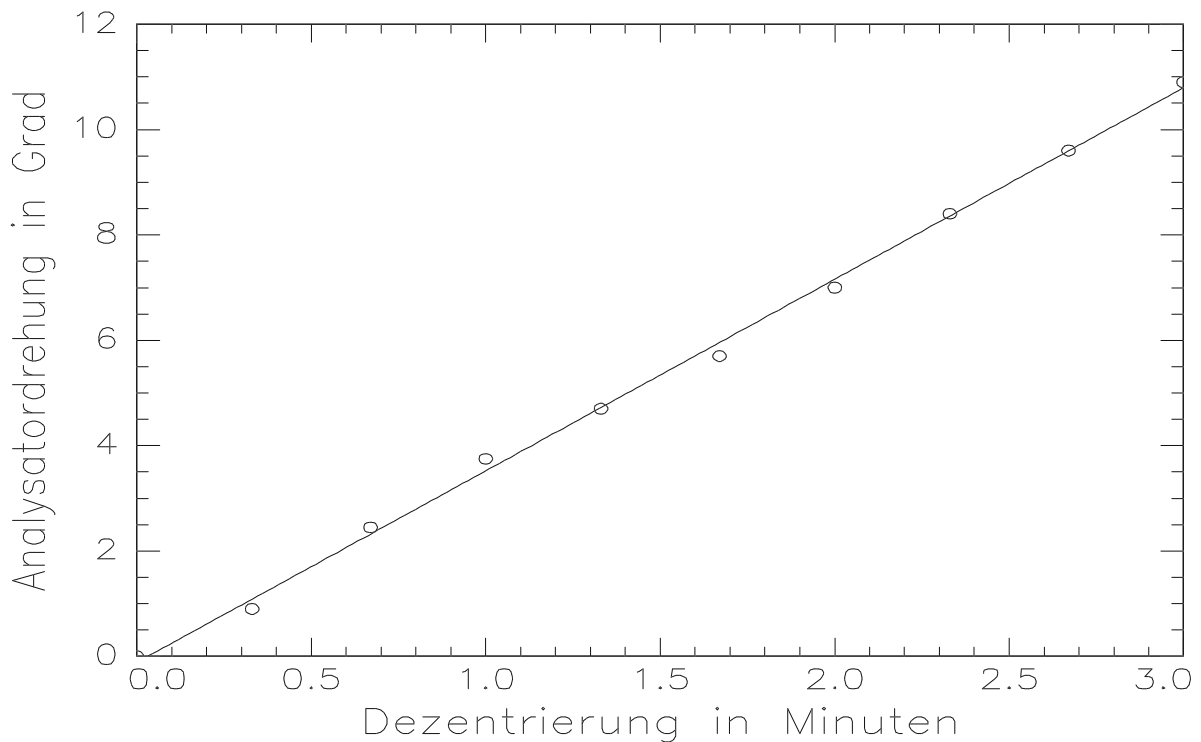


Bild 9: Experimentell ermittelte erforderliche Analysatorumdrehung zur Kompensation der infolge Dezentrierung auftretenden Veränderung des Kleinsignales; Darstellung der Meßpunkte und der Ausgleichsgeraden durch die Meßpunkte

Beleuchtung fand zirkular polarisiertes Licht der Wellenlänge $\lambda = 632,8$ nm Verwendung. Eine Darstellung der gewonnenen Ergebnisse zeigt Bild 9. Die Meßunsicherheit der einzelnen Meßpunkte beträgt $\pm 0,5^\circ$ der Analysatordrehung, die Meßunsicherheit der Flächenkipfung ist vernachlässigbar.

Nutzt man nun den Analysatorwinkel als Maß für die Dezentrierung, dann ergibt sich unter Verwendung der Umkehrfunktion der Ausgleichsgeraden (Bild 9) aus der Meßunsicherheit des Analysatorwinkels die Meßunsicherheit der Dezentrierung zu $\Delta\vartheta = \pm 8''$.

5. Zusammenfassung

Im Ergebnis der durchgeführten numerischen Untersuchungen ergibt sich eine im Winkelsekundenbereich liegende Meßgenauigkeit, die wesentlich von den Parametern der verwandten Geräte und Optiken abhängt. Diese läßt sich durch Kleinsignalmodulation des Meßsignales weiter steigern. Aus den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen und aus den genannten experimentellen Resultaten schlußfolgernd sind Meßgenauigkeiten im Bereich von etwa 10 Winkelsekunden erreichbar.

Auf Ausführungen über die Möglichkeiten der Auswertung der Interferogramme mittels Methoden der Bildverarbeitung wurde an dieser Stelle verzichtet. Es ist aber durchaus möglich, den Richtungssensor (Bild 1) selbst beispielsweise als kompaktes Kittglied ohne Kleinsignalmodulation zu nutzen und die Ergebnisse mittels Bildverarbeitung aus den zu detektierenden Interferogrammen zu gewinnen. Die erreichbaren Genauigkeiten zu ermitteln wäre allerdings Gegenstand einer gesonderten Untersuchung.

Literaturverzeichnis:

- /1/ Harnisch, W. und Büchner, R.: Verfahren zur Richtungsmesung eines Lichtbündels
Wirtschaftspatent der DDR, Patentschrift DD 273885 vom 11.07.1988
- /2/ Hofmann, C.: Definition und Messung der Dezentrierung sphärischer Einzellinsen
Experimentelle Technik der Physik 9 (1961) 4, S. 145-183
- /3/ Müller, H. und Dürselen, R.: Zentrierzustände optischer Komponenten messen
Feinwerktechnik, Mikrotechnik und Messtechnik 101 (1993) 1-2, S. 41-43
- /4/ Gärtner, W. und Hofmann, C.: Zur Bestimmung von Inhomogenitäten in optischem Glas
Feingerätetechnik 22 (1973) 4, S. 180-183
- /5/ Merkel, K.: Ein Polarisationsshearinginterferometer zur Messung der Modulationsübertragungsfunktion
Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Sektion Technologie, Jena 1978
- /6/ Haferkorn, H. und Tautz, V.: Strahl- und Wellenflächendurchrechnung an dezentrierten optischen Systemen
Wissenschaftliche Zeitung der TH Ilmenau 25 (1979) 3, S. 117-130