

Unsicherheitsbeitrag der Prismenflächen bei der Brechzahlmessung

Gernot Blobel*, Manuel Stavridis**, Andreas Fricke*, Michael Schulz*

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

** Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abbestr. 2-12, 10587 Berlin, Germany

<mailto:gernot.blobel@ptb.de>

Um für die Brechzahlmessung den Beitrag der Prismenflächentopografie zur Messunsicherheit zu bestimmen, wurde ein entsprechendes Simulationsmodell für die Methode der kleinsten Ablenkung erstellt. Durch Raytracing wurde die Schwerpunktverschiebung auf dem Detektor simuliert und daraus der Einfluss auf das Messergebnis berechnet.

1 Einführung

Die genaue Bestimmung der Brechzahl von optisch transparenten Materialien ist für die optische Spitzentechnologien von hoher Bedeutung. Hierfür muss die Brechzahl teilweise mit einer Unsicherheit von 10^{-6} bekannt sein. Das hier verwendete Verfahren zur hochgenauen Brechzahlmessung basiert auf der Messung der Lichtablenkung durch ein Prisma. Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Messunsicherheit ist die Oberflächentopografie der beteiligten Prismenflächen. Sie wurde deshalb interferometrisch gemessen und mittels Zernike-Polynomen in ein Simulationsmodell übertragen. Mit dem Simulationsmodell wurde der Beitrag der Prismenflächen zur Messunsicherheitsbilanz bestimmt. Dabei ergeben sich bei bestimmten Oberflächen-Formabweichungen mit Peak-to-Valley (PV) Werten von nur $\lambda/10$ relativ große Unsicherheitsbeiträge, welche die Unsicherheitsbilanz dominieren würden.

2 Messverfahren

Das verwendete Messverfahren zur Bestimmung der Brechzahl n beruht auf dem Prinzip der minimalen Strahlablenkung im symmetrischen Durchgang durch ein Prisma. In diesem Fall gilt für die Bestimmung der Brechzahl die Formel nach Fraunhofer [1]

$$n = \frac{\sin\left(\left(\varphi + \delta_{\min}\right)/2\right)}{\sin\left(\varphi/2\right)}. \quad (1)$$

Dabei sei erwähnt, dass n für die Brechzahl gegenüber Luft steht, was aber für die nachfolgenden Prinzipuntersuchungen nicht weiter betrachtet wird. Für die Brechzahlmessung wurde ein Refraktometer verwendet, welches aus einem Goniometer, einem Kollimator und einem Autokollimator besteht [2]. Das Gerät wurde vor einigen Jahren mit einem nochmals verbesserten Winkelsensor ausgerüstet. Damit wurde der Prismenwinkel φ gemessen. Die Messung des minimalen Ablenk-

winkels δ_{\min} erfolgt mit einem monochromatischen Strahlenbündel. Für prismatische Vollkörper liegt die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) zwischen $1,0 \dots 1,4 \cdot 10^{-6}$ (für $n = 1,5 \dots 1,9$). Der Messunsicherheitsbeitrag von nicht perfekten Prismenoberflächen mit einer Unebenheit von 50 nm wurde zuvor typischerweise mit einem Wert von $4 \cdot 10^{-7}$ abgeschätzt [3].

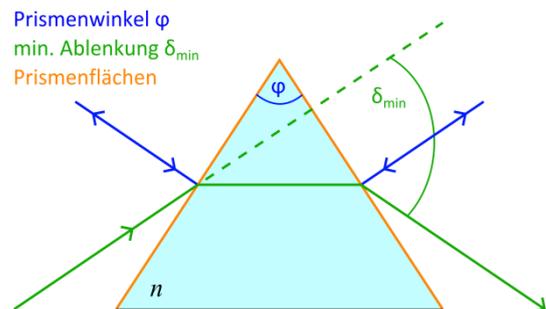


Abb. 1 Skizziertertes Prinzip der Brechzahlmessung im symmetrischen Strahlendurchgang.

Die Topografie der in Abb. 1 orange gekennzeichneten Prismenflächen wurde mit einem Fizeau-Interferometer gemessen. Aus diesen Messungen wurde in einem geeigneten Simulationsmodell, welches im nächsten Abschnitt vorgestellt wird, der Einfluss der Prismenflächentopografien auf die Messunsicherheit der Brechzahl bestimmt.

3 Simulationsmodell

Für die Untersuchung des Einflusses der Prismenflächentopografien auf die Brechzahl wurde ein Simulationsmodell in Zemax erstellt. Darin flossen die Kenntnisse aus dem vorhandenen Messsystem und den gewonnenen Messdaten für die Oberflächen ein. Das Modell ist in Abb. 2 dargestellt.

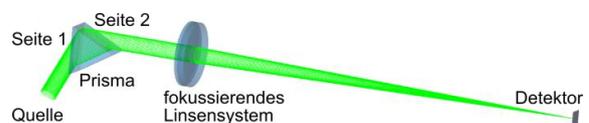


Abb. 2 3D Simulationsmodell der Brechzahlmessung.

Als Quelle wurde eine ebene Wellenfront bei einer Wellenlänge von 546 nm und einer kreisförmigen Apertur von 20 mm angenommen. Das für die Simulation verwendete Prisma besteht aus dem Material N-LAK8 mit einem Brechungsindex von $n = 1.715946$ für die angegebene Wellenlänge. Die Prismenfläche ist 60 mm x 40 mm und der Prismenwinkel $\varphi = 63^\circ$. Hinter dem Prisma ist ein fokussierendes Linsensystem und in dessen Brennebene ($f = 500$ mm) ein Detektor platziert.

4 Simulations- und Messergebnisse

Ziel der Simulationen war die Bestimmung der Abweichung des Schwerpunktes des Strahlenbündels auf dem Detektor und die daraus resultierende Veränderung des Brechzahl-Messwertes. Für erste Untersuchungen wurde die Prismenoberfläche der zweiten Seite mit definierten Zernike-Koeffizienten verändert. Die PV-Werte der Topografien lagen dabei im Bereich des Strahlenbündels bei $\lambda/10$. In Tab. 1 sind für drei verschiedene Zernike-Koeffizienten höherer Ordnung (Sphärische Aberration Z(4,0), Astigmatismus Z(4,2) und Koma Z(5,1)) Bilder der Oberflächenabweichungen (Sag), die Abweichungen vom Schwerpunkt in x-Richtung ΔS_x und die daraus resultierende Abweichung des Brechzahl-Messwertes Δn dargestellt. Als Ergebnis aus den Untersuchungen mit definierten Zernikeflächen ist festzuhalten, dass der Einfluss für asymmetrische Formabweichungen höher ist als für symmetrische Formen.

Zernike	Z(4,0)	Z(4,2)	Z(5,1)
Sag			
ΔS_x [m]	$-3,82 \cdot 10^{-11}$	$-1,95 \cdot 10^{-12}$	$-3,95 \cdot 10^{-6}$
Δn	$-3,24 \cdot 10^{-11}$	$-1,65 \cdot 10^{-12}$	$-3,35 \cdot 10^{-6}$

Tab. 1 Ergebnisse der Simulationen mit definierten Zernike-Koeffizienten mit PV-Werten von $\lambda/10$ im Bereich des Strahlenbündels.

Es wurden ebenfalls die interferometrisch gemessenen Flächen und die gemessenen Prismenwinkel realer Prismen in das Modell übertragen und die resultierenden Abweichungen bestimmt. In Abb. 3 sind die Topografien der beiden Flächen eines Prismas dargestellt. Im Bereich des Messstrahls lagen die PV-Werte für beide Seiten bei ca. 50 nm. In Tab. 2 sind die Ergebnisse für drei reale Prismen dargestellt. Zusätzlich zu den Schwerpunktabweichungen und der Brechzahländerung sind die PV-Werte des wirksamen Bereichs der Prismenflächen angegeben. Das runde Aperturprofil des Messstrahls wird durch das Auftreffen auf die zu ihm gekippte Prismenfläche elliptisch. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung der Brechzahlmessung zwischen $3 \dots 7 \cdot 10^{-7}$ liegt. Die

größte Abweichung tritt hier allerdings nicht bei dem Prisma mit den größten PV-Werten auf, sondern bei Prisma 3, welches einen höheren Koma-Anteil aufweist (siehe Abb. 3).

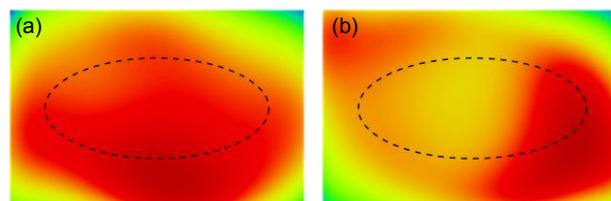


Abb. 3 (a) Topografie der ersten und (b) zweiten Prismenfläche des Prismas 3 aus Tab. 2, mit den jeweiligen wirksamen Bereichen (innerhalb der Ellipse).

Prisma	1	2	3
PV Seite 1 [nm]	52	125	50
PV Seite 2 [nm]	74	70	50
ΔS_x [m]	$-0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$
Δn	$-4,35 \cdot 10^{-7}$	$3,42 \cdot 10^{-7}$	$7,69 \cdot 10^{-7}$

Tab. 2 Ergebnisse der Simulationen mit definierten Zernike-Koeffizienten mit PV-Werten von $\lambda/10$.

5 Fazit und Ausblick

Auf Grundlage von Brechzahlmessungen wurde ein geeignetes Simulationsmodell erstellt um den Unsicherheitsbeitrag der Prismenflächentopografie näher zu bestimmen. Die Methode wurde an Flächen mit definierten Zernike-Koeffizienten und realen Flächen demonstriert. Der Unsicherheitsbeitrag für Topografieabweichungen im Bereich von $\lambda/10$ liegt typischerweise in der Größenordnung von 10^{-7} , kann aber bei ungünstigen Formabweichungen auch eine Größenordnung höher sein. Zur Verringerung von Softwareschnittstellen wurde das Raytracing-Modell aus Zemax ebenfalls mit einem an der PTB entwickelten Matlab-Raytracer getestet. Die Überprüfung der Strahlenverläufe ergab eine Übereinstimmung im Rahmen der numerischen Genauigkeit. Weiterhin stehen Untersuchungen von Korrekturmöglichkeiten der topografischen Fehlereinflüsse an einem weiteren Prisma aus.

Literatur

- [1] A. J. Werner: „Methods in High Precision Refractometry of Optical Glasses“ in: Appl. Opt. 7(5), 837-844 (1968)
- [2] K.-J. Rosenbruch, H. Stenger, „Das neue Präzisions-Goniometer zur Brechzahlmessung in der PTB“, Meßtechnik Informationen, Firma Heidenhain, Traunreut 8, 13-9 (1980)
- [3] A. Fricke, M. Schulz: „International Comparison of Refractive Index Measurements“ in: 113. Tagung der DGaO, B11, (2012), <http://www.dgao-proceedings.de>