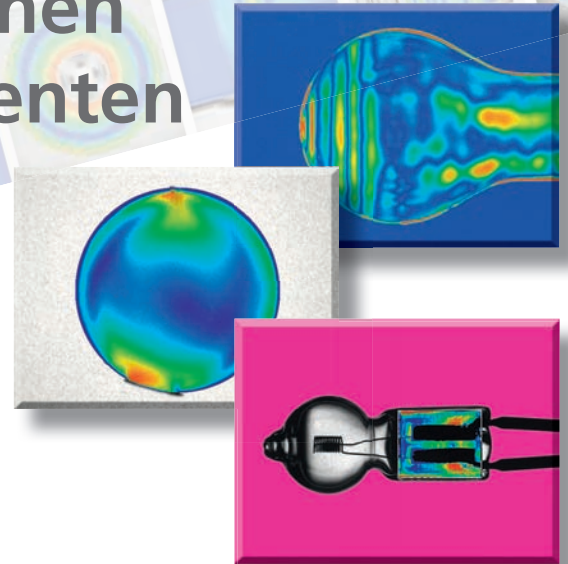


Bildgebende Messung der Spannungsdoppelbrechung in optischen Materialien und Komponenten

Henning Katte, ilis gmbh, Erlangen

Eigenspannungen in optischen Komponenten beeinflussen durch Spannungsdoppelbrechung die Polarisation von Licht, was in anspruchsvollen Anwendungen der Mikrolithographie, Laseroptik und Astronomie unerwünscht ist. Entsprechend hoch sind oft die Anforderungen an die präzise Messung selbst geringer Spannungsdoppelbrechungswerte. Dies ermöglichen bildgebende Polarimeter, die dabei auch eine Aussage über die flächenmäßige Verteilung und Orientierung der Spannungsdoppelbrechung liefern.



Optische Gläser sind im entspannten Zustand optisch isotrop, d.h. die Brechzahl ist in allen Raumrichtungen gleich groß. Werkstoff- oder fertigungsbedingte mechanische Spannungen führen aber zu Verformungen in der Materialstruktur und damit zu unterschiedlichen Teilchendichten in den Raumrichtungen. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts unter anderem von der Dichte der Materie abhängig ist, führt eine derartige Änderung der Mikrostruktur zu unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten im Medium und damit zu einer richtungsabhängigen Änderung der Brechzahl¹. Das Medium wird unter Spannung also doppelbrechend; diesen Effekt bezeichnet man mithin als Spannungsdoppelbrechung (SDB).

Neben optisch isotropen Materialien gibt es auch viele von Natur aus optisch anisotrope, also doppelbrechende Stoffe, z.B. Kristalle wie Calcit oder Quarz. Auch hier ändert sich das Verhältnis der Brechzahlen unter mechanischen Spannungen. Diese können so groß werden, dass sie die Festigkeit beeinträchtigen. Aber bereits geringe örtliche Variationen der Brechzahl können die Abbildungseigenschaften optischer Komponenten und damit deren Funktion negativ beeinflussen. Zudem verändert Doppelbrechung den Polarisationszustand transmittierten Lichts, was insbesondere

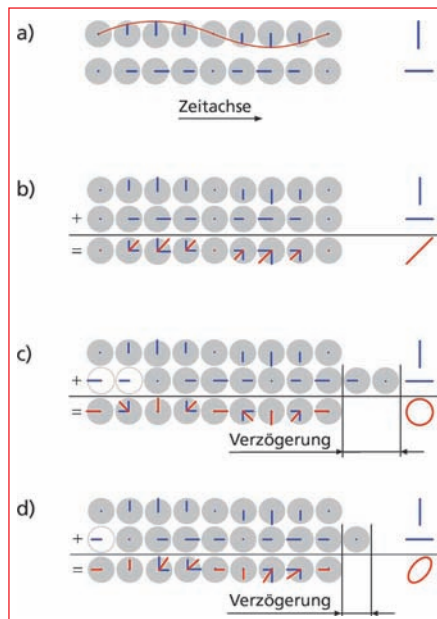


Bild 1a: Zwei Wellen, die vertikal bzw. horizontal oszillieren. Die Kreise zeigen von links ausgehend die zeitliche Entwicklung

Bild 1b: Überlagerung der beiden Wellen mit gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die resultierende Welle ist wieder linear polarisiert

Bild 1c: Überlagerung zweier Wellen, deren Gangunterschied genau ein Viertel der Wellenlänge beträgt. Man erhält zirkular polarisiertes Licht

Bild 1d: Überlagerung zweier Wellen mit einer Phasenverzögerung von einem Achtel der Wellenlänge. Man erhält elliptisch polarisiertes Licht

in messtechnischen Anwendungen unerwünscht ist. Eine möglichst exakte Bestimmung der Spannungsdoppelbrechung und deren örtlicher Verteilung ist bei der Herstellung optischer Materialien und Komponenten also von großer Bedeutung.

1 Der photoelastische Effekt

Prinzipiell kann man Spannungen messen, indem man die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts für die verschiedenen Raumrichtungen bestimmt. Die dabei auftretenden Differenzen sind ein direktes Maß für die Doppelbrechung und damit für die zu Grunde liegenden Spannungen. Statt die Ausbreitungsgeschwindigkeiten oder die resultierende Phasendifferenz direkt z.B. interferometrisch zu bestimmen, kann man den photoelastischen Effekt nutzen, also die Auswirkung der Spannungsdoppelbrechung auf polarisiertes Licht.

Linear polarisiertes Licht, dessen elektrisches Feld nur in einer Ebene schwingt, kann man sich anschaulich als Überlagerung zweier Lichtwellen vorstellen, die unter einem Winkel von 45° zur ursprünglichen Lichtwelle orientiert sind und senkrecht zueinander stehen (**Bild 1a**). Wenn sich diese beiden Wellen gleich schnell ausbreiten, treffen die Berge und Täler beider Wellen jeweils aufeinander. Die Addition der Wellen ergibt die ursprüngliche, also linear polarisierte Lichtwelle (**Bild 1b**).

Breiten sich die beiden Lichtwellen jedoch unterschiedlich schnell aus, kommt es zu einer Verzögerung zwischen den beiden

¹ Die Brechzahl ist definiert als das Verhältnis der Phasengeschwindigkeit des Lichts im Vakuum zu seiner Phasengeschwindigkeit im Medium.

Wellen, der als optischer Gangunterschied bezeichnet und in nm oder in Wellenlängen-Bruchteilen angegeben wird. Wenn der Gangunterschied genau ein Viertel der Wellenlänge λ beträgt, beschreibt der resultierende Feldvektor einen Kreis, und man spricht von zirkular polarisiertem Licht (**Bild 1c** und **Bild 2**). Im Allgemeinen ist der Gangunterschied aber ungleich $\lambda/4$, und man erhält elliptisch polarisiertes Licht (**Bild 1d**). Lineare und zirkulare Polarisation kann man auch als Sonderfälle der elliptischen Polarisation auffassen. In ein doppelbrechendes Material eintretendes, linear polarisiertes Licht verlässt dieses anschaulich also als Überlagerung zweier aufeinander senkrecht stehender Lichtwellen mit unterschiedlicher Phasenlage, so dass es im allgemeinen Fall elliptisch polarisiert vorliegen wird. Die Elliptizität des austretenden Lichts, also das Verhältnis zwischen den Ellipsen-Halbachsen, ist dabei ein Maß für die Doppelbrechung und somit auch für die Eigenspannungen im Material.

2 Messprinzip

Statt die Form der Ellipse direkt zu vermessen, kann man das elliptisch polarisierte Licht mit Hilfe einer Viertelwellenplatte wieder in linear polarisiertes Licht umwandeln. Das Verfahren wird als Kompensationsmethode nach de Sénarmont bezeichnet.

net; der zugehörige Messaufbau ist in **Bild 3** dargestellt. Die Viertelwellenplatte wird dabei mit ihrer schnellen Achse parallel zum Polarisator ausgerichtet. Streng genommen ist das Licht hinterher nicht vollständig linear polarisiert, es genügt aber, nur den linear polarisierten Anteil zu betrachten. Dieser ist nun gegenüber der ursprünglichen Polarisationsrichtung um einen bestimmten Winkel verändert, der proportional zum Gangunterschied ist und damit ebenfalls ein Maß für die Elliptizität sowie die Doppelbrechung darstellt. Der Winkel kann auf einfache Weise bestimmt werden, indem ein zweiter Polarisator (Analysator genannt) so lange gedreht wird, bis für den betrachteten Messpunkt ein Intensitätsminimum erreicht ist.

In Grundstellung ist der Analysator im rechten Winkel zum Polarisator angeordnet. Ohne doppelbrechende Probe erhält man also ein schwarzes Bild, da das Licht vollständig vom Analysator absorbiert wird. Führt man aber einen transparenten Prüfkörper mit z.B. tangential verlaufenden Randspannungen ein, so führen diese zu lokalen Aufhellungen (**Bild 4** links), da die Materialspannungen in den Diagonalen unter 45° zur Orientierung der Polarisatorachsen stehen und so ein Teil des Lichtes vom Analysator durchgelassen wird.

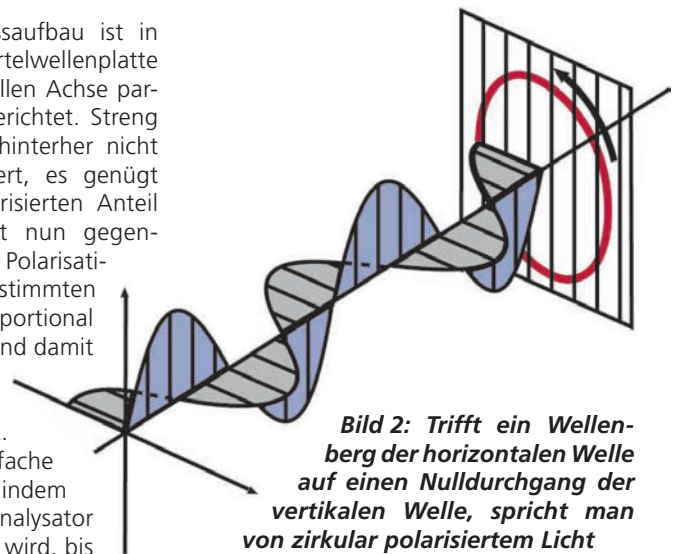


Bild 2: Trifft ein Wellenberg der horizontalen Welle auf einen Nulldurchgang der vertikalen Welle, spricht man von zirkular polarisiertem Licht

Doppelbrechung lässt sich gemäß der Beziehung

$$R = \alpha \cdot \lambda / 180^\circ \quad (\text{Gl. 1})$$

bestimmen. Dabei ist α der Drehwinkel in Grad und λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts in nm. In ihrer absoluten Höhe korrekt sind allerdings nur Spannungen, die in 45° zum Polarisator und damit zur Viertelwellenplatte orientiert sind.

3 Automatische Messung

Die Nachteile des beschriebenen, oft noch visuellen Verfahrens bestehen zum einen in der Schwierigkeit, die Lage des Intensitätsminimums mit der erforderlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zu bestimmen. Zum anderen erfolgt die Messung immer nur für einen Messpunkt, d.h. eine Aussage über die örtliche Verteilung ist nur mit großem Mess- und Zeitaufwand möglich. Zu guter Letzt lassen sich mit diesem Verfahren nur Spannungen messen, die in 45° zur Polarisationsrichtung orientiert sind. Alle anderen Orientierungen erscheinen abgeschwächt, wie links in **Bild 4** zu sehen. Der Prüfkörper muss vor der Messung also erst entsprechend ausgerichtet werden. Insbesondere bei kleinen

Die Nachteile des beschriebenen, oft noch visuellen Verfahrens bestehen zum einen in der Schwierigkeit, die Lage des Intensitätsminimums mit der erforderlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zu bestimmen. Zum anderen erfolgt die Messung immer nur für einen Messpunkt, d.h. eine Aussage über die örtliche Verteilung ist nur mit großem Mess- und Zeitaufwand möglich. Zu guter Letzt lassen sich mit diesem Verfahren nur Spannungen messen, die in 45° zur Polarisationsrichtung orientiert sind. Alle anderen Orientierungen erscheinen abgeschwächt, wie links in **Bild 4** zu sehen. Der Prüfkörper muss vor der Messung also erst entsprechend ausgerichtet werden. Insbesondere bei kleinen

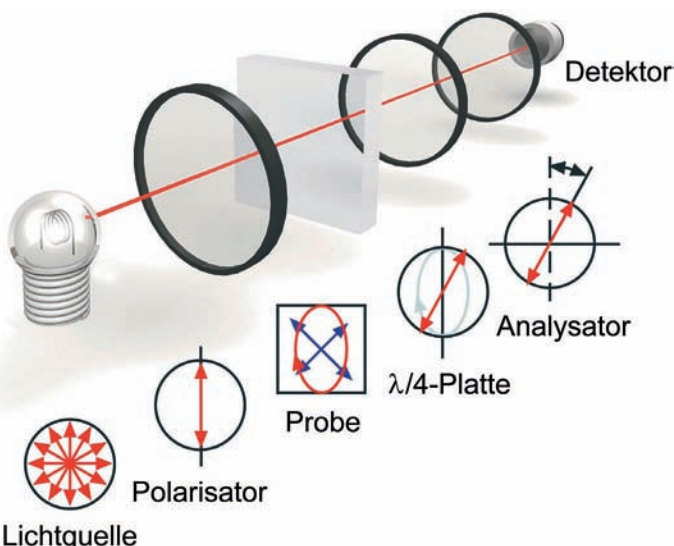


Bild 3: Aufbau eines Polarimeters zur Messung der Spannungsdoppelbrechung nach dem de Sénarmont-Prinzip. Der Polarisator lässt nur den linear polarisierten Anteil des einfallenden Lichts durch. Doppelbrechung in der Probe führt zu elliptisch polarisiertem Licht. Mit Hilfe einer Viertelwellenplatte wird aus dem elliptisch polarisierten Licht wieder linear polarisiertes Licht, dessen Polarisationswinkel mit einem drehbaren Analysator bestimmt werden kann. Daraus lässt sich der optische Gangunterschied berechnen

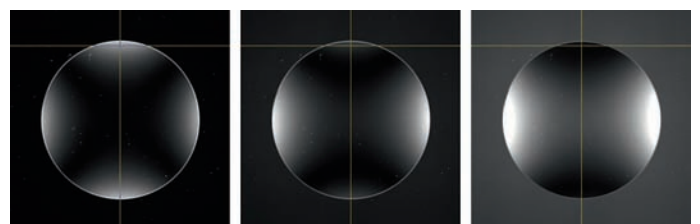


Bild 4: Intensitätsbilder einer Glasscheibe mit definierten Randspannungen unter verschiedenen Analysatorstellungen. Die Polarisationsebene liegt hier diagonal zu den Bildachsen



Bild 5: Realisiertes Messsystem zur automatischen Bestimmung der örtlichen Verteilung und Orientierung der Spannungsdoppelbrechung

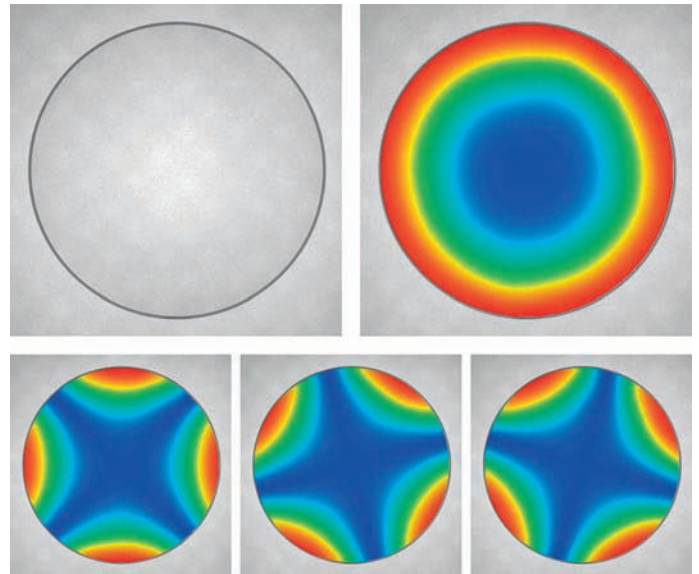


Bild 6: Kamerabild der verspannten Scheibe aus Bild 4 mit Messergebnis (oben rechts) sowie Teilergebnissen unter 0°, 30° und 60° Polarisatorstellung (unten). In der farbcodierten Darstellung steht Blau für niedrige und Rot für hohe SDB-Werte

SDB-Werten ($< 10 \text{ nm}$) ist eine objektive und hinreichend präzise Messung kaum möglich oder mit großen Aufwand verbunden. Außerdem müsste man zur Messung anisotroper Spannungsorientierungen den Prüfling für jeden Messpunkt erst in die richtige Position drehen.

Angesichts der aufgezeigten Schwierigkeiten liegt es nahe, den Messaufbau und -ablauf zu automatisieren. Es existieren bereits seit geraumer Zeit Lösungen, mit denen die Spannungsdoppelbrechung für einzelne Messpunkte automatisch in der geforderten Genauigkeit ermittelt wird. Jedoch liefern diese Messsysteme nur Aussagen für einen kleinen Messfleck. Zur Charakterisierung größerer Flächen muss der Prüfkörper abgerastert werden. Entsprechend gering ist bei großen Probenabmessungen die in einer akzeptablen Mess-

zeit erzielbare Ortsauflösung. Des Weiteren müssen aufgrund der Beeinflussung durch Strahlablenkungen hohe Anforderungen an die Planparallelität und Oberflächenbeschaffenheit der Probe gestellt werden.

4 Bildgebende Messung

Aus diesen Gründen wurde ein bildgebendes Messsystem entwickelt, das eine schnelle orts aufgelöste Bestimmung von Betrag und Orientierung der Spannungsdoppelbrechung mit hoher Genauigkeit ermöglicht. **Bild 5** zeigt das realisierte Messsystem, dessen Funktionsprinzip grundlegend dem Aufbau aus Bild 3 entspricht. Jedoch wird dabei nicht nur ein einzelner Messpunkt analysiert, sondern das gesamte Messfeld gleichzeitig. Anstelle eines Fotodetektors kommt eine Matrixka-

mera zum Einsatz. Die laterale Auflösung wird dabei durch die Größe des Messfeldes und die Auflösung der Kamera bestimmt. Wie bereits erwähnt lassen sich mit einem Linearpolarimeter nur Spannungen bestimmen, die unter 45° zur Polarisatorachse orientiert sind. Aus diesem Grund werden mehrere Messungen unter verschiedenen Polarisatorstellungen durchgeführt (statt das Messobjekt zu drehen, rotiert die Optik quasi um die Probe). Anschließend werden die Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis kombiniert, wie in **Bild 6** gezeigt. Bei einer Messfeldgröße von $100 \times 75 \text{ mm}^2$ und einer typischen Bildauflösung von 696×520 Pixeln ergibt sich z.B. eine Ortsauflösung von ca. $0,14 \text{ mm}$ (Pixelabstand). Bei Messzeiten unterhalb einer Minute wird eine Reproduzierbarkeit der Spannungsdoppelbrechungswerte im Bereich

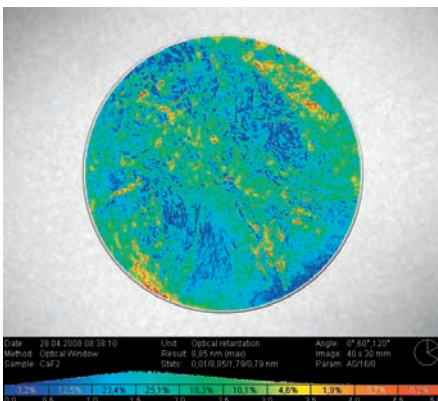


Bild 7: Messergebnis zu einem CaF_2 -Einkristall mit 25 mm Durchmesser und einer Dicke von 4 mm

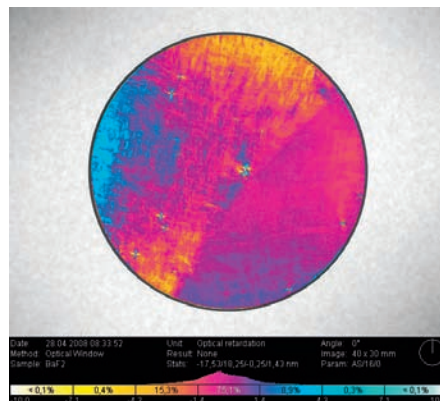


Bild 8: Messergebnis zu einem BaF_2 -Einkristall ($\text{Ø} 25 \text{ mm}$). Lokale Störungen der Kristallstruktur treten deutlich hervor

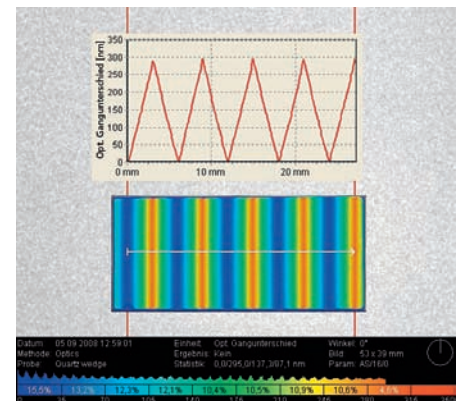


Bild 9: Messergebnisse zu einem Quarzkeil: farbcodierte Flächendarstellung und Linescan-Auswertung

von $\pm 0,1$ nm erzielt. Die SDB-Orientierung wird dabei pixelweise in Winkelgradgenauigkeit bestimmt.

5 Anwendungen

Eine wichtige Anwendung für die bildgebende Messung der Spannungsdoppelbrechung ist die Prüfung von Materialien zur Herstellung photolithografischer Linsen, insbesondere für Wafer-Stepper-Optiken. Neben so genannten I-Linien-Gläsern (365nm-Lithographie) kommen für kleinere Wellenlängen (248 und 193 nm) im Wesentlichen Quarzglas und Calciumfluorid-Kristalle zum Einsatz. Die Anforderungen an die optische Qualität der Ausgangsmaterialien sind hier aufgrund der zu erzielenden Abbildungsqualität (Strukturgrößen von 40 nm) besonders hoch. Neben der präzisen Messung des Restspannungs-

niveaus liefert die bildgebende Messung mit hoher Ortsauflösung Informationen über kleinste Fehler in der Glasmatrix bzw. Kristallstruktur (**Bild 7** und **8**).

Weitere wichtige Anwendungsgebiete in der Optik sind z.B. Spiegelträger aus Glaskeramik in der Astronomie sowie Viertelwellenplatten, Kompensatoren (**Bild 9**), Laserkristalle, optische Fenster, Linsen, Prismen etc., insbesondere zum Einsatz in der Laseroptik.

6 Zusammenfassung

Bildgebende Polarimeter ermöglichen eine schnelle und genaue Bestimmung der Spannungsdoppelbrechung und deren flächenmäßigen Verteilung und Orientierung. Gerade bei Anwendungen, die eine hohe Ortsauflösung erfordern, bietet die bildgebende Messung gegenüber punktuellen

Messverfahren deutliche Vorteile, insbesondere auch aufgrund der vergleichsweise niedrigen Anforderungen an die Oberflächengüte.

Ansprechpartner:

Henning Katte
Geschäftsführer
ilis gmbh
Konrad-Zuse-Str. 12
D-91052 Erlangen
Tel. 09131/974779-1
Fax 09131/974779-9
eMail:
henning.katte@ilis.de
Internet: www.ilis.de



www.photonik.de ▶ Webcode 5006