

Spannungsoptik: Untersuchung der Spannungsverteilungen in mechanisch belasteten Körpern

Versuchsziel

- Untersuchung der Spannungsverteilungen in mechanisch belasteten Körpern mit linear polarisiertem und mit zirkular polarisiertem Licht.

Grundlagen

In der Spannungsoptik werden Größe und Richtung mechanischer Spannungen in Kunststoffmodellen bestimmt, um Aussagen über die Belastbarkeit komplizierter Bauteile zu gewinnen. Man verwendet transparente Kunststoffe, die unter mechanischer Belastung optisch doppelbrechend werden. Die optische Achse der Doppelbrechung liegt aus Symmetriegründen jeweils in Richtung der Dehnung oder der Stauchung, daher kann man die Spannungen im Modell mit polarisationsoptischen Methoden sichtbar machen.

Die Doppelbrechung, genauer gesagt die Differenz der Brechzahlen für den ordentlichen und den außerordentlichen Strahl, beträgt

$$n_2 - n_1 = C \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (I)$$

Dabei ist C die spannungsoptische Konstante des Kunststoffes und sind σ_1 und σ_2 die durch die Belastung hervorgerufenen Hauptspannungen. Die Spannungsdoppelbrechung ist nicht sehr groß, sie erreicht je nach Material Werte bis zu $n_2 - n_1 = 0,002$.

Beleuchtung mit linear polarisiertem Licht:

Man beleuchtet das Kunststoffmodell z. B. in einer Anordnung aus gekreuztem Polarisator und Analysator. Solange es nicht belastet wird, bleibt das Gesichtsfeld hinter dem Analysator dunkel, da der spannungsfreie Kunststoff die Polarisation des Lichts unverändert läßt (siehe Fig. 1 oben). Die Situation ändert sich bei mechanischer Beanspruchung des Kunststoffes. Durch die Doppelbrechung wird das Licht beim Durchgang durch den Kunststoff im allgemeinen elliptisch polarisiert, d. h. es erhält ein Komponente in Richtung des Analysators. Die belasteten Stellen des Kunststoffmodells sind daher als Aufhellung im Gesichtsfeld bemerkbar.

Zwischen den Aufhellungen bleiben dunkle Streifen (Isoklinen) an den Stellen, wo die lokal entstandene optische Achse des Kunststoffmodells zufällig parallel oder senkrecht zum Polarisator steht. Die Isoklinen wandern, wenn Polarisator und Analysator gemeinsam in gekreuzter Stellung gedreht werden. Man zeichnet ihre Lage für verschiedene Polarisatorstellungen auf und konstruiert daraus die Richtungen der Hauptspannungen.

Die Aufhellungen zeigen farbige Struktur (Isochromaten), da das Licht nicht für alle Wellenlängen eine Komponente in Analysatorrichtung erhält. Die Anteile mit der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{d \cdot (n_1 - n_2)}{m} \quad \text{mit } m = 1, 2, 3 \dots \quad (II)$$

bleiben nämlich parallel zum Polarisator polarisiert und werden im Analysator ausgelöscht. Man verwendet einen Werkstoff mit

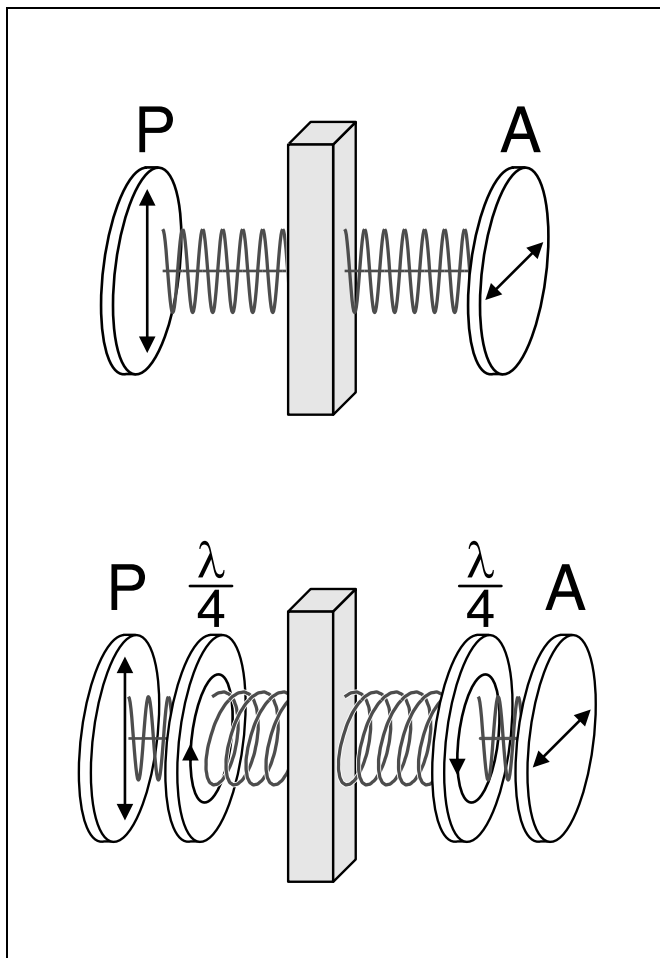


Fig. 1: Schematische Darstellung der polarisationsoptischen Untersuchung eines Modells mit linear polarisiertem Licht (oben) und zirkular polarisiertem Licht (unten)

Geräte	
1 Satz spannungsoptischer Modelle	471 95
1 Paar Polarisationsfilter	472 40
1 Paar Viertel-Wellenlängen-Platten	472 60
2 Linsen in Fassung, $f = + 150$ mm	460 08
1 Prismentisch	460 25
1 Irisblende in Fassung	460 26
1 Optische Bank mit Normalprofil, 1 m	460 32
9 Optikreiter, $H = 60$ mm, $B = 36$ mm	460 353
1 Durchscheinender Schirm	441 53
1 Sockel	300 11
1 Halogenleuchte 12 V/50 W/100 W	450 64
1 Halogenlampe 12 V/100 W zu 450 64	450 63
1 Bildschieber zu 450 64	450 66
1 Transformator 2 ... 12 V	521 25
Experimentierkabel	

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 dargestellt, die Position des linken Randes der Optikreiter auf der optischen Bank ist hier in cm angegeben.

- Halogenleuchte mit 100-W-Lampe und Reflektorspiegel montieren; Bildschieber mit Wärmeschutzfilter aufstecken.
- Irisblende (a) gemäß Positionsangabe montieren und Öffnungsdurchmesser auf ca. 4 mm begrenzen.
- mit dem Justier- und Fokussierstab der Halogenleuchte (siehe Gebrauchsanweisung zur Halogenleuchte) die Glühwendel in Strahlrichtung und senkrecht zum Strahl so justieren, daß sie auf die Öffnung der Irisblende abgebildet wird.
- Linsen im Strahlengang anordnen; ggf. Linse (d) verschieben, bis das Licht parallel verläuft und die Linse (f) möglichst genau ausleuchtet.
- Prismentisch (e) mit spannungsoptischem Modell montieren; Linse (f) verschieben, bis das Modell in der gewünschten Entfernung auf dem durchscheinenden Schirm abgebildet wird.

möglichst kleiner spannungsoptischer Konstante und bestrahlt mit monochromatischem Licht, wenn der Einfluß der Isochromaten möglichst vermieden werden soll.

Beleuchtung mit zirkular polarisiertem Licht:

In einem anderen Aufbau wird das Kunststoffmodell mit zirkular polarisiertem Licht beleuchtet, das man mit einer Kombination aus einem Polarisator und einer Viertel-Wellenlängen-Platte erzeugt. Hinter dem Modell werden eine zweite Viertel-Wellenlängen-Platte – in gekreuzter Stellung zur ersten – und ein Analysator angeordnet. Auch hier bleibt das Gesichtsfeld dunkel, solange das Modell nicht belastet wird (siehe Fig. 1 unten), und belastete Stellen sind an der Aufhellung des Gesichtsfeldes erkennbar.

Isoklinen werden in dieser Anordnung vermieden, da keine Richtung linearer Polarisation ausgezeichnet ist. Die Isochromaten sind jetzt darauf zurückzuführen, daß die Lichtanteile mit Wellenlängen λ , die Gleichung (II) erfüllen, ihre zirkulare Polarisation behalten und von der zweiten Viertel-Wellenlängen-Platte samt Analysator ausgelöscht werden. Durch einen Vergleich mit (I) identifiziert man die Isochromaten als Stellen gleicher Hauptspannungsdifferenz

$$\sigma_2 - \sigma_1 = m \cdot \frac{\lambda}{C \cdot d} \quad \text{mit } m = 0, 1, 2 \dots \quad \text{(III)}$$

Mit zunehmender Hauptspannungsdifferenz treten die Isochromaten in immer dichter Folge auf. Durch Abzählen der Isochromaten vom spannungsfreien Zustand ($m = 0$) aus kann man auf die Höhe der Spannung schließen. Die Genauigkeit wird dabei durch den Einsatz von Werkstoffen mit großer spannungsoptischer Konstante verbessert.

Im Versuch werden Modelle aus ungesättigten Polyester-Kunstharzen verwendet, deren spannungsoptische Empfindlichkeit groß ist. Sie sind durch thermische Behandlung von inneren mechanischen Spannungen weitgehend befreit und erhalten diesen Zustand über lange Zeiträume.

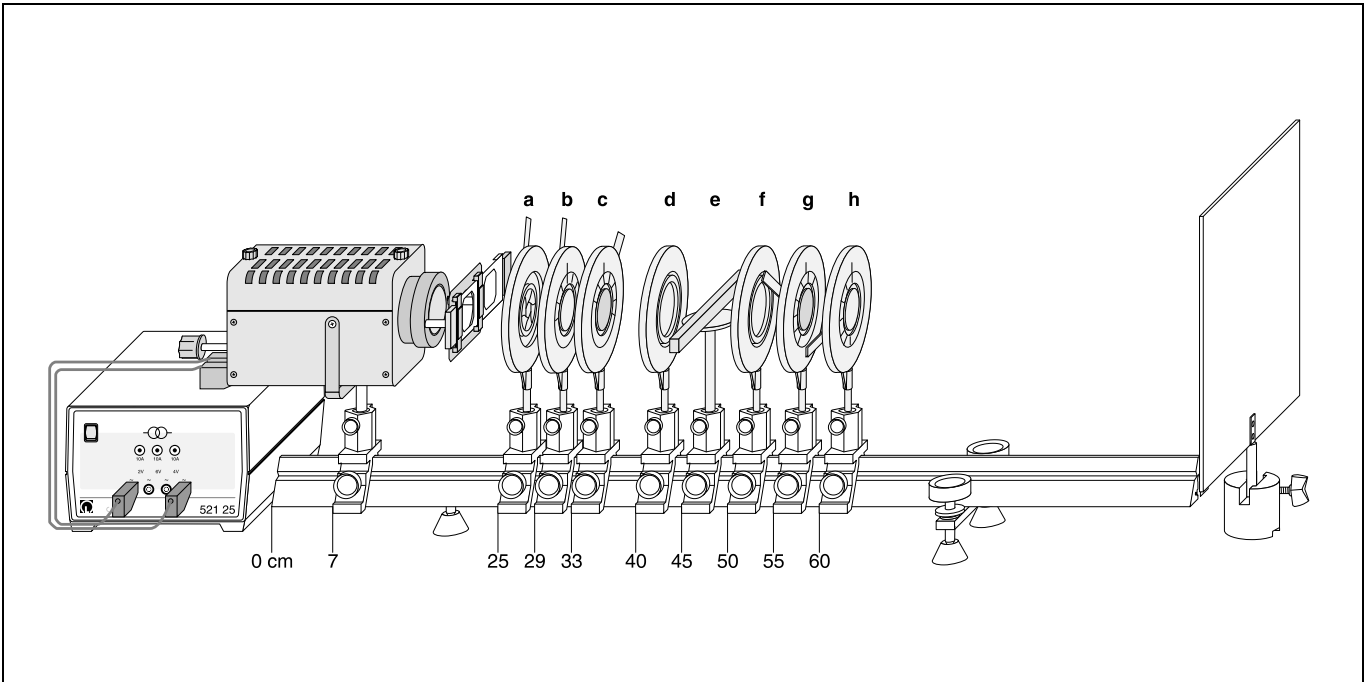
Durchführung

a) Beleuchtung mit linear polarisiertem Licht

- Polarisator (b) mit Polarisationsrichtung $\psi_P = 45^\circ$ gemäß Positionsangabe und Analysator (h) mit Polarisationsrichtung $\psi_A = -45^\circ$ ca. 10 cm von Linse (f) entfernt in den Strahlengang stellen.
- Spannungsoptische Modelle nacheinander auf dem Prismenteller von Hand verbiegen und Schirmbild beobachten (Fig. 3 enthält Vorschläge zur Anordnung der Modelle).
- Polarisationsrichtungen von Polarisator und Analysator um den gleichen Winkel $\Delta\psi = 15^\circ, 30^\circ$ oder 45° verstellen und Änderung des Schirmbildes kontrollieren.

b) Beleuchtung mit zirkular polarisiertem Licht

- Polarisationsrichtung des Polarisators auf $\psi_P = 0^\circ$ und die des Analysator auf $\psi_A = -90^\circ$ drehen.
- Viertel-Wellenlängen-Platte (c) gemäß Positionsangabe und Viertel-Wellenlängen-Platte (g) ca. 5 cm von Linse (f) entfernt in den Strahlengang stellen.
- Ausrichtung der ersten Viertel-Wellenlängen-Platte auf $\psi_1 = 45^\circ$, die der zweiten Viertel-Wellenlängen-Platte auf $\psi_2 = -45^\circ$ drehen.
- Spannungsoptische Modelle nacheinander auf dem Prismenteller von Hand verbiegen und Schirmbild beobachten.
- sämtliche Ausrichtungen um den gleichen Winkel $\Delta\psi = 15^\circ, 30^\circ$ oder 45° verstellen und Änderung des Schirmbildes kontrollieren.



Ergebnis

Mit zunehmender Belastung der Probe werden die Stellen gleicher Verspannung im Gesichtsfeld durch Linien gleicher Farbe gekennzeichnet. Zwischen Dehnung und Stauchung kann nicht unterschieden werden, die neutrale Faser bleibt dunkel.

Die Isochromaten sind stark ausgeprägt, da die spannungsoptische Empfindlichkeit der Kunststoffmodelle sehr groß ist.

Bei Beleuchtung mit linear polarisiertem Licht sind die Isochromaten von Isoklinen überlagert. Durch Drehen der Polarisationsrichtung ändert man daher die gesamte Farbverteilung. Das ist bei der Beleuchtung mit zirkular polarisiertem Licht nicht der Fall.

Fig. 2: Versuchsaufbau auf der optischen Bank mit Positionsangabe in cm für den linken Rand der optischen Reiter

- (a) Irisblende
- (b) Polarisationsfilter als Polarisator
- (c) Viertel-Wellenlängen-Platte
- (d) Linse, $f = + 150 \text{ mm}$
- (e) Prismentisch mit spannungsoptischem Modell
- (f) Linse, $f = + 150 \text{ mm}$
- (g) Viertel-Wellenlängen-Platte
- (h) Polarisationsfilter als Analysator

Fig. 3: Vorschlag zur mechanischen Beanspruchung der Kunststoffmodelle

