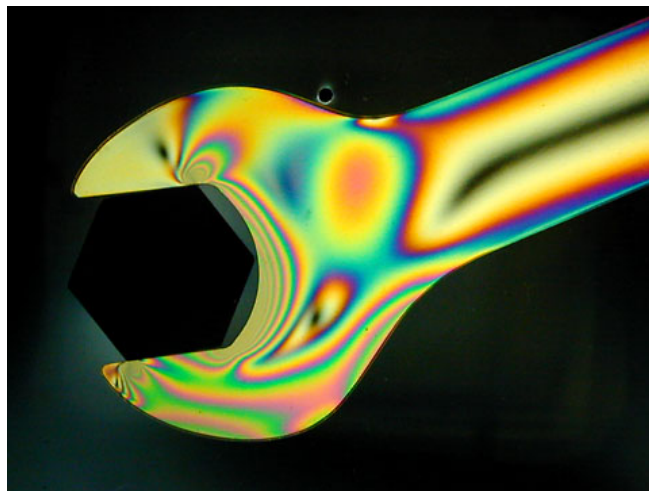


Maschinentechnisches Praktikum - Spannungsoptik -



Quelle: http://www.fn-luebeck.de/content/01_34_03_07/5/13.html

Praktikumsvorbereitung mit Hinweisen zur Durchführung

FG Maschinenelemente

Ausgabe WS2007/08

INHALT

1. Ziel des Praktikums	2
2. Grundlagen.....	2
2.1. Allgemein.....	2
2.2. Grundlagen aus der Technischen Mechanik Der ebene Spannungszustand	2
2.3. Die Spannungsoptik	5
2.3.1. Die ebene Spannungsoptik.....	5
2.3.2. Die räumliche Spannungsoptik	8
2.3.3. Die Modelle.....	9
2.4. Finite-Elemente-Methode (FEM)	9
3. Aufgaben zur Versuchsvorbereitung (mündliche Abfrage).....	9
4. Versuchsdurchführung	10
4.1. Qualitative Untersuchung mit dem optischen Spannungsprüfer 300.....	10
4.2. Qualitative Untersuchung mit dem Polariskop für Lichtschreibgeräte	10
4.3. FEM	10
4.4. Untersuchung eines Modells mit dem LF/Z-2 Reflexionspolariskop.....	10
5. Versuchsauswertung:.....	10
6. Modelle für Versuchsteil 4.2:	11
7. Literatur	11

1. ZIEL DES PRAKTIKUMS

Die Spannungsoptik ist ein wichtiger Bestandteil der Festigkeitslehre. Die Berechnung von Spannungen in Bauteilen ist oft sehr kompliziert und alleine nicht sicher genug. So bietet die Spannungsoptik, als experimentelle Untersuchung von Spannungen in Bauteilen, eine ideale Lösung.

Im Praktikum sollen verschiedene Apparaturen für spannungsoptische Untersuchungen vorgestellt und angewendet werden.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Allgemein

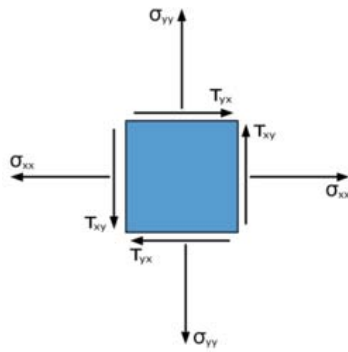
Die Spannungsoptik wird als experimentelle Untersuchung von Spannungen in Bauteilen bereits seit über 50 Jahren angewendet. Im Speziellen, wenn zu untersuchende Bauteile analytisch nur schwierig oder gar nicht berechnet werden können.

Die Spannungsoptik liefert, das für den Festigkeitsnachweis erforderliche, komplette Bild des Spannungsfeldes und bietet so einen guten Überblick über Bereiche hoher Spannungskonzentration sowie geringer Ausnutzung.

Damit bietet sie eine sehr gute Möglichkeit zur Überprüfung analytisch oder numerisch durchgeführter Spannungsbetrachtungen (z.B.: FEM).

Grundlagen aus der Technischen Mechanik
Der ebene Spannungszustand

Der Begriff „Spannung“ beschreibt die bei Krafteinwirkung auftretenden Anstrengungen des Werkstoffs von außen angreifende Kräfte durch den Körper zu übertragen. Allgemein ist die Spannung als die pro Flächeneinheit übertragene Kraft definiert. Sie lässt sich in Normal- und Schubspannungen unterteilen.



Für die Normalspannung gilt:
$$\sigma_y = \frac{F_n}{A} \quad (1)$$

für die Schubspannung gilt:
$$\tau_{xy} = \frac{F_S}{A} \quad (2)$$

Abb. 1: Ebener Spannungszustand ; Quelle: Wikipedia

Die Beziehungen (1) und (2) können jedoch nur angewendet werden, wenn senkrecht zur einwirkenden Kraft geschnitten wird. Nachfolgend wird an einem Beispiel gezeigt, wie sich die Normal- und Schubspannungen berechnen lassen, wenn unter einem beliebigen Winkel φ geschnitten wird.

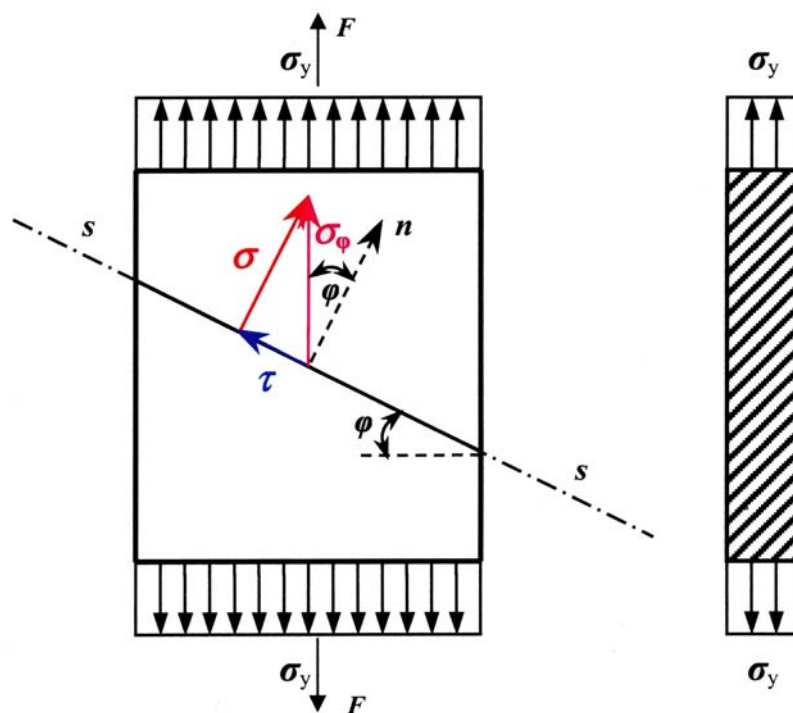


Abb.2: Schnittgrößen an einer beliebigen Schnittfläche; Quelle: Maschinentechnisches Praktikum: Spannungsoptik

Die Querschnittsfläche unter einem beliebigen Schnitt s , ändert sich unter Berücksichtigung der trigonometrischen Verhältnisse zu:

$$A_\varphi = \frac{A}{\cos \varphi} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich für die Gleichgewichtsbedingung für die Kraft F am betrachteten Punkt:

$$F = \sigma_y \cdot A = \sigma_\varphi \cdot A_\varphi \quad (4)$$

Die resultierende Spannung am betrachteten Punkt wird somit zu:

$$\sigma_\varphi = \sigma_y \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

Damit lässt sich über die trigonometrischen Verhältnisse die Normalspannungskomponente der resultierenden Spannung ermitteln:

$$\cos \varphi = \frac{\sigma}{\sigma_\varphi} \Rightarrow \sigma = \sigma_y \cdot \cos^2 \varphi \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_y (1 + \cos 2\varphi) \quad (7)$$

Für die Schubspannungskomponente ergibt sich:

$$\sin \varphi = \frac{\tau}{\sigma_\varphi} \Rightarrow \tau = \sigma_y \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \sigma_y (\sin 2\varphi) \quad (9)$$

Die Gleichungen (6) und (8) kann man zu einer Kreisgleichung zusammenfassen:

$$\left(\sigma - \frac{1}{2} \sigma_y \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{1}{2} \sigma_y \right)^2 \quad (10)$$

Mit dieser lässt sich der MOHRsche Spannungskreis für das Beispiel erstellen.

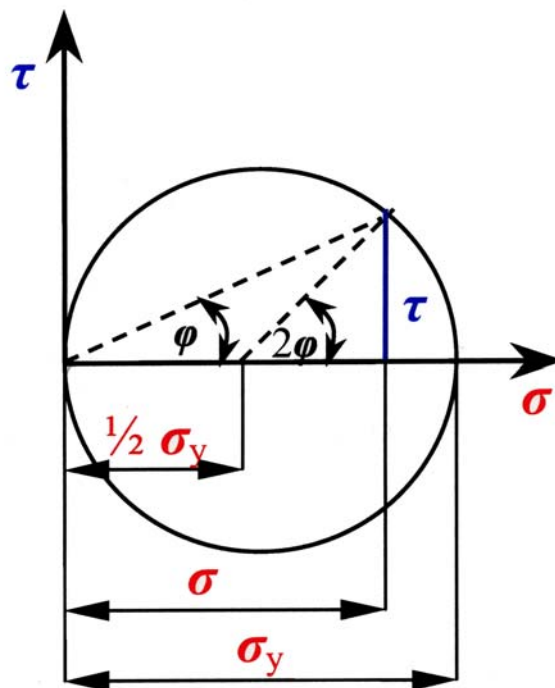


Abb.3: MOHRscher Spannungskreis für eine Zugbeanspruchung längs der Schnittgrößen an einer beliebigen Schnittfläche;
Quelle: Maschinentechnisches Praktikum: Spannungsoptik

Die allgemeine Form für die Kreisgleichung des MOHRschen Spannungskreises lautet:

$$\left(\sigma - \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_x) \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \right)^2 \quad (11)$$

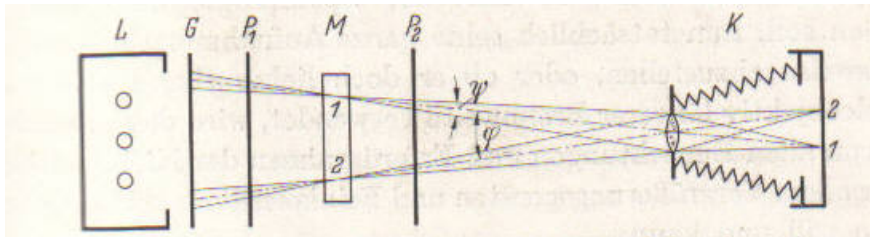
2.2. Die Spannungsoptik

Die Spannungsoptik lässt sich in unterschiedliche Gebiete teilen. Eine erste Unterteilung erfolgt in die Gebiete der Photoelastizität und der Photoplastizität. Weiterhin lässt sich die Spannungsoptik in die ebene und räumliche Spannungsoptik unterteilen.

2.2.1. Die ebene Spannungsoptik

Die Aufnahme und Auswertung des spannungsoptischen Bildes ist das wichtigste und aufschlussreichste Verfahren der Spannungsoptik.

Mit dem Polariskop (Durchlichtpolariskop, Reflexionspolariskop), kann der auf ein Modell aufgebrachte, ebene Spannungszustand mittels polarisierten Lichts sichtbar gemacht werden.



- L - Lampenkasten
- P - Polarisationsfilter
- M - Modell (um das Modell ist sich die Belastungseinrichtung zu denken)
- K - Kamera

Abb.4: Durchlichtpolariskop: Die einfache spannungsoptische Apparatur"; Quelle: /Föp 59/

Die Hauptgleichung der Spannungsoptik

Ein unter Spannung stehendes Modell wird in den Strahlengang der einfachen spannungsoptischen Apparatur gebracht..

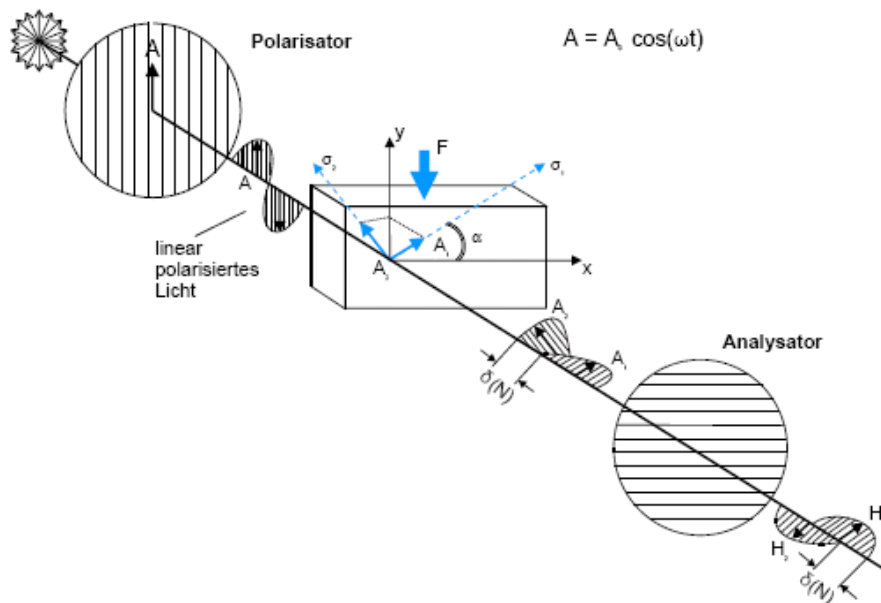


Abb. 5: Das Modell in linear polarisiertem Licht; Quelle: <http://www.htwm.de/lmt/phymess.htm>

Das monochromatische Licht der Natriumdampfampe tritt durch den Polarisator, welcher nur vertikal schwingendes Licht (linear polarisiert) durchlässt. Das Licht schwingt mit $A=A_0 \sin \omega t$.

Der das Modell durchdringende Lichtstrahl wird in zwei Komponenten A_1 und A_2 nach den Hauptspannungsrichtungen, σ_1 und σ_2 , zerlegt. Grund hierfür sind die Doppelbrechungseigenschaften des untersuchten Modells. Die beiden Komponenten des Lichtstrahls durchlaufen, aufgrund der Verspannung des Modells, dieses, mit gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c_0 veränderten Geschwindigkeiten c_1 und c_2 . Diese Geschwindigkeiten sind proportional den Brechungsindizes.

Dieser Zusammenhang findet sich wieder im Doppelbrechungsgesetz nach Brewster:

Die Abweichung des Brechungsindex, der in Richtung einer Hauptsspannung des verspannten Modells wirkt, vom Brechungsindex des unverspannten Modells ist den Hauptspannungen σ_1 und σ_2 über Materialkonstanten proportional.

$$n_1 = n_u + K_1\sigma_1 + K_2\sigma_2 \quad (12)$$

$$n_2 = n_u + K_1\sigma_2 + K_2\sigma_1 \quad (13)$$

Die Wellen A_1 und A_2 haben bei Verlassen des verspannten Modells einen Gangunterschied s . Dieser lässt sich über die Laufzeit ($t_1 - t_2$) und der Geschwindigkeit des Lichtes in Luft c_L ausdrücken:

$$s = (t_1 - t_2)c_L = (n_1 - n_2)d \frac{c_L}{c_0} \quad (14)$$

Mit Berücksichtigen des Gesetzes von Brewster (Zusammenfassen der Konstanten K_1 und K_2 zu K) und der Modelldicke d kann eine Beziehung für die relative Phasenverschiebung δ aufgestellt werden (**Hauptgleichung der Spannungsoptik**):

$$\delta = \frac{K}{\lambda_0}(\sigma_1 - \sigma_2)d \quad (15)$$

Nach Verlassen des Modells werden die Lichtwellen A_1 und A_2 durch den Analysator geschickt, der gekreuzt zum Polarisator steht. Der Analysator lässt somit nur die horizontalen Anteile durch, diese werden als H_1 und H_2 bezeichnet und besitzen die gleiche Amplitude. Ob Licht durchgelassen wird ist von der Phasenverschiebung und somit von der Hauptgleichung abhängig.

Gangunterschied δ	Reaktion auf Modell
0 (keine Phasenverschiebung)	H_1 und H_2 gegenphasig, heben sich auf → völlige Auslöschung (dunkle Stelle auf Modell)
$\frac{1}{2}$ (Phasenverschiebung von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge)	H_1 und H_2 addieren sich → Helligkeitsmaximum
1	→ völlige Auslöschung

Ganzzahlige δ verursachen immer Verdunkelung, dazwischen entsteht Aufhellung. Diese Linien der gleichen Hauptspannungsdifferenz nennt man **Isochrome**, sie werden je nach δ als Isochromaten 0., 1., 2. Ordnung bezeichnet.

Außer den Isochromaten sind noch weitere dunkle Linien zu erkennen. Diese entstehen, wenn eine Hauptspannungsrichtung mit der Polarisationsrichtung zusammenfällt ($\alpha = 0$). Wird A in diesem Fall in Richtung der Hauptrichtungen zerlegt, so wird eine Komponente null. Der Lichtstrahl geht dann ohne Geschwindigkeitsaufspaltung durch das Modell und wird somit vom Analysator vollständig absorbiert. Alle Punkte in denen die Hauptspannungsrichtung gleich der Polarisationsrichtung ist, sind durch dunkle Linien verbunden. Diese Linien nennt man **Isokline**.

Betrachtet man die Isochromaten und Isoklinen im monochromatischen Licht, ist eine Unterscheidung schwierig, da nur ein Hell-/Dunkelunterschied zu erkennen ist.

Betrachtet man ein Modell in weißem Licht, so wird für jede Lichtschwingung entsprechend ihrer Wellenlänge der im vorigen Abschnitt geschilderte Vorgang durchgeführt.

Die Isochromaten erscheinen in den Komplementärfarben der ausgelöschten Wellenlänge, nur die 0. Ordnung ist dunkel. Der Unterschied zwischen Isochromaten und Isoklinen ist nun besser sichtbar.

In den meisten Fällen ist die Auswertung der Isochromaten völlig ausreichend. Um die Isoklinen aus dem spannungsoptischen Bild herauszufiltern, bedient man sich zirkular polarisiertem Licht. Hierzu wird eine, um 45° zur Polarisationsrichtung verdrehte, Viertelwellenplatte hinter dem Polarisator angebracht und eine, um 90° zur 1. Viertelwellenplatte verdrehte, vor dem Analysator. Durch die erste Viertelwellenplatte wird die Lichtschwingung A in zwei gleichgroße Komponenten zerlegt, sie haben eine Phasenverschiebung von $\lambda/4$. Es entsteht ein Vektor unveränderlicher Größe, der mit einer Winkelgeschwindigkeit ω rotiert. Die 2. Viertelwellenplatte hebt die Phasenverschiebung wieder auf.

Im zirkular polarisierten Licht bestehen also keine ausgezeichneten Richtungen und somit auch keine Isokline.

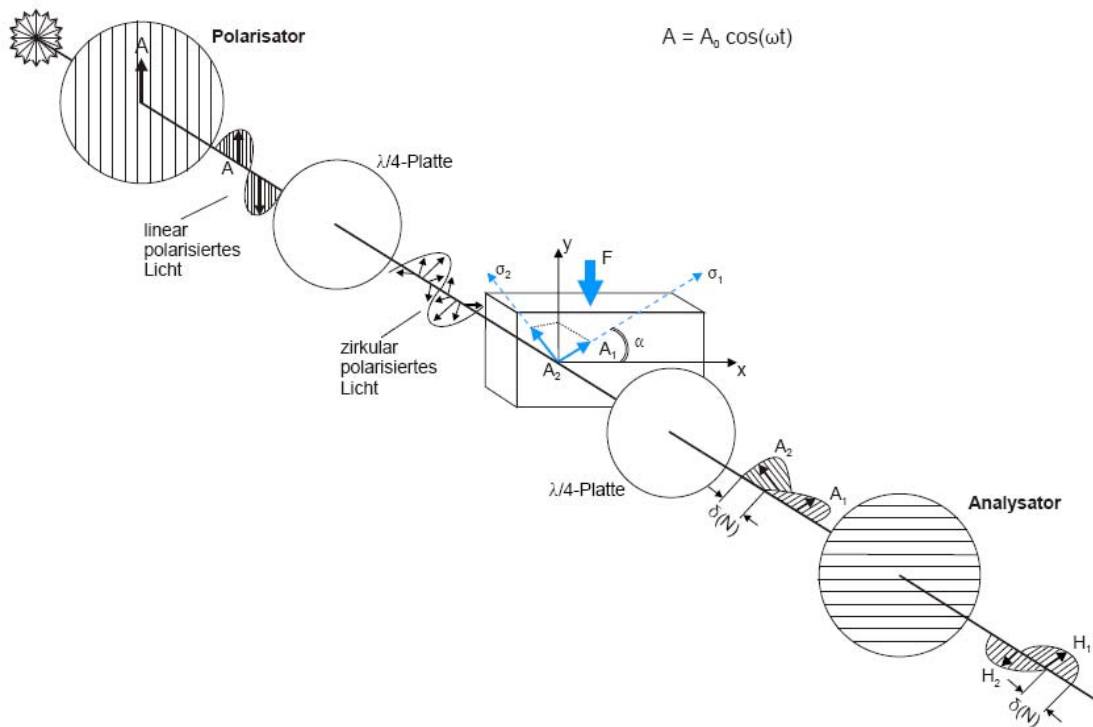


Abb. 6: Das Modell in zirkular polarisiertem Licht; Quelle: <http://www.htwm.de/lmt/phymess.htm>

Die Auswertung des Isochromatenbildes

Zur Auswertung des Isochromatenbildes nutzt man die Hauptgleichung nach der Spannungsdifferenz aufgelöst, unter Berücksichtigung der spannungsoptischen Konstante S :

$$S = \frac{\lambda}{K} \tag{16}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{S}{d} \delta$$

Die spannungsoptische Konstante S erhält man durch einen Eichversuch und die Isochromatenordnung durch Abzählen von der Null-Isocromaten aus. Für jede Stelle ist $(\sigma_1 - \sigma_2)$

bzw. $(\sigma_1 - \sigma_2)/2 = \tau_H$ aus dem Isochromatenbild entnehmbar. Am lastfreien Ende gilt σ_1 oder $\sigma_2 = 0$, am Rand ist der vollständige Spannungszustand somit unmittelbar erhältlich.

Um eine möglichst genaue Auswertung des Isochromatenbildes zu erhalten, ist es nötig auch Bruchteile von Isochromaten zu bestimmen. Es gibt unterschiedliche Methoden zur Bestimmung dieser Bruchteile:

- am Rand durch Extrapolieren
- durch Hellfeldaufnahmen (halbe Ordnung)
- durch kompensieren mit Viertelwellenplatten nach Sénarmont

Die Auswertung der Isokline

Möchte man die Hauptspannungslinien ermitteln, so ist es nötig ein Bild der Isoklinen aufzunehmen, da diese als Unterlage für die Ermittlung dienen. Dies erfolgt am Besten während des Versuchs. Die Isoklinen werden für verschiedene Stellungen des Polarisators (0° bis 90° in Schritten von 10°) aufgenommen und in einem einzigen Bild zusammengetragen. Zwischen zwei benachbarten Isoklinen wird mittig eine Hilfslinie gezogen. Die Hauptspannungslinien werden so eingezeichnet, dass sie senkrecht auf den Isoklinen stehen.

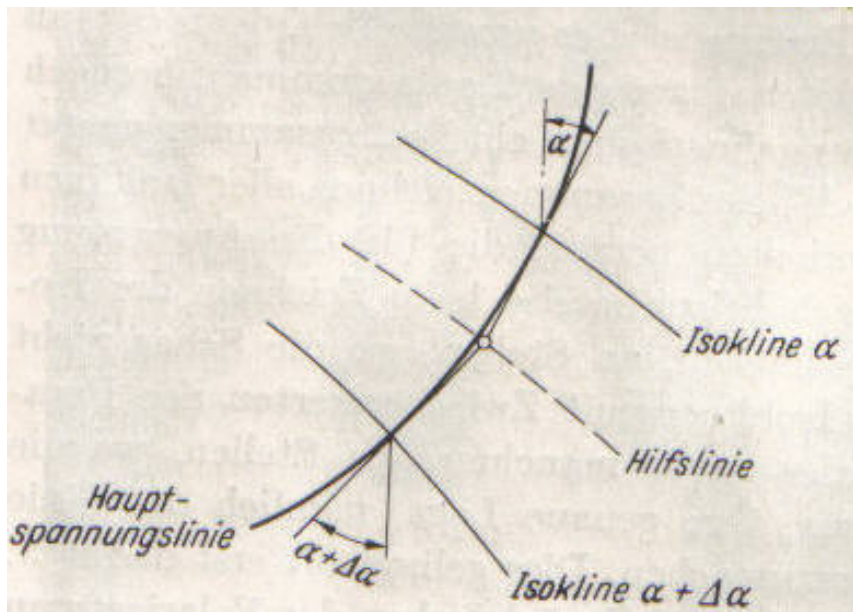


Abb.7: Zeichnen der Hauptspannungslinien; Quelle: /Föp 59/

2.2.2. Die räumliche Spannungsoptik

Die räumliche Spannungsoptik soll hier nur als weitere Möglichkeit erwähnt werden. Sie ist nicht Bestandteil des Praktikums.

Auch räumliche Spannungsfelder können mittels Spannungsoptik untersucht werden. Jedoch sind die Spannungszustände nach allen Richtungen unterschiedlich, was ein Verfahren wie bei der ebenen Spannungsoptik unmöglich macht. Es können aber einzelne, für die Untersuchung wichtige Stellen zugänglich gemacht werden. Man bedient sich hier des Einfrierverfahrens. Dafür wird ein Modell bei erhöhter Temperatur belastet und unter Beibehaltung der Belastung wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Nun wird die Belastung weggenommen, die Verformung, und damit die doppelbrechende Eigenschaft, bleibt aber erhalten. Das Modell kann an den erforderlichen Stellen zerschnitten und unter dem Polarisator betrachtet werden.

2.2.3. Die Modellwerkstoffe

Als Modellwerkstoffe eignen sich fast alle durchsichtigen Körper, die unter mechanischer Beanspruchung doppelbrechend werden.

Vorraussetzungen sind:

- hohe optische Empfindlichkeit
- lineare Abhängigkeit zwischen Spannung, Dehnung und Isochromatenordnung
- möglichst geringes Kriechen
- Freiheit von Vorspannungen und Haltbarkeit
- leichte Bearbeitbarkeit
- Isotropie

Bei der Wahl des Modellwerkstoffes sollte man sich an den für die Isochromaten geeigneten Werkstoffen orientieren, da die Aufnahme des Isochromatenbildes im Vordergrund steht. Mögliche Werkstoffe sind Araldit B, VP1527, Glas(veraltet), Plexiglas, Gelatine, Gummi und andere gummielastische Stoffe.

Die Ergebnisse der spannungsoptischen Untersuchung werden über die im Vorfeld festgelegten Maßstäbe wieder auf das originale Bauteil übertragen.

2.3. Finite-Elemente-Methode (FEM)

Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung.

Ein zu untersuchendes Bauteil wird hierbei in endlich viele Elemente, „finite Elemente“, unterteilt. Für jedes „finite Element“ ist die Beziehung zwischen Kräften und Verformungen an den Knoten bekannt, die so genannte Steifigkeitsmatrix. Verbindet man die einzelnen Elemente über Gleichgewichts- und Kompatibilitätsbedingungen miteinander, so erhält man die Gesamtsteifigkeitsmatrix. Dieses Gleichungssystem lässt sich, nachdem Randbedingungen und Lasten angegeben wurden, lösen.

Mit der FEM-Analyse entfallen aufwendige Versuchsreihen und komplizierte Berechnungen mit Papier, Bleistift und Taschenrechner. Ergebnisse werden schneller erhalten und können besser verglichen werden. Außerdem lassen sich schnell Geometrien verändern, ohne dass ein komplett neues Modell erstellt werden muss.

Die Ergebnisse einer theoretischen FEM-Analyse sollten nach Möglichkeit messtechnisch überprüft werden. Die Spannungsoptik ist hierzu ein geeignetes Werkzeug. Deshalb werden im Praktikum vergleichende Untersuchungen durchgeführt.

3. AUFGABEN ZUR VERSUCHSVORBEREITUNG (MÜNDLICHE ABFRAGE)

- Ebener Spannungszustand
- Anwendung und Unterteilung der Spannungsoptik
- Ergebnisse der spannungsoptischen Untersuchung
- Definition von Isochromaten und Isoklinien
- Welche Unterschiede bestehen in den spannungsoptischen Bildern bei:
 - monochromatisches Licht
 - weißem Licht
 - in zirkular polarisiertem Licht
- Erzeugung folgender Lichter:
 - linear polarisiertes Licht
 - zirkular polarisiertes Licht
- Hauptgleichung der Spannungsoptik
- Wofür wird die Auswertung der Isoklinie benötigt?
- Wie kann man räumliche Probleme erfassen und auswerten?

/***** Ende der Versuchsvorbereitung *****/

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Hinweis: Für eine schnelle Durchführung des Praktikums ist es hilfreich, jedoch nicht dringend erforderlich, wenn Sie sich im Vorfeld mit dem Programm ANSYS vertraut machen (Tutorial 1).

4.1. Qualitative Untersuchung mit dem optischen Spannungsprüfer 300

Das bereits eingespannte Modell wird unter linear polarisiertem und zirkular polarisiertem Licht betrachtet.

Aufgaben:

- Bestimmen Sie die Isochromaten und Isoklinien!
- Welche Veränderungen treten bei der Betrachtung unter unterschiedlichem Licht auf?

4.2. Qualitative Untersuchung mit dem Polariskop für Lichtschreibgeräte

Drei verschiedene Modelle werden in ein Polariskop für Lichtschreibgeräte gespannt und belastet.

Aufgaben:

- Bestimmen Sie anhand des spannungsoptischen Bildes wann Polarisator und Analysator um 90° versetzt zueinander stehen. Wie können Sie dies feststellen?
- Zeichnen Sie für alle Modelle das spannungsoptische Bild. Bestimmen Sie dabei die Ordnungen der Isochromaten.

4.3. FEM

Die in Teil 2 verwendeten Modelle sind mit ANSYS zu öffnen und zu simulieren. Die simulierten spannungsoptischen Bilder sind abzuspeichern und auszudrucken.

Aufgaben:

- Vergleichen Sie die aufgenommenen Bilder aus Teil 2 mit denen aus Teil 3.

4.4. Untersuchung eines Modells mit dem LF/Z-2 Reflexionspolariskop

Eine vollständige Auswertung des Spannungszustandes des vorgegebenen Modells ist zu erstellen.

Speichern Sie die mit PSCalc erhaltenen Ergebnisse.

Allgemeiner Hinweis:

Die detaillierte Vorgehensweise zur Einstellung der Apparaturen und der Bedienung der Programme entnehmen Sie bitte den am Praktikumsplatz ausliegenden Anweisungen oder wenden Sie sich an ihren Betreuer.

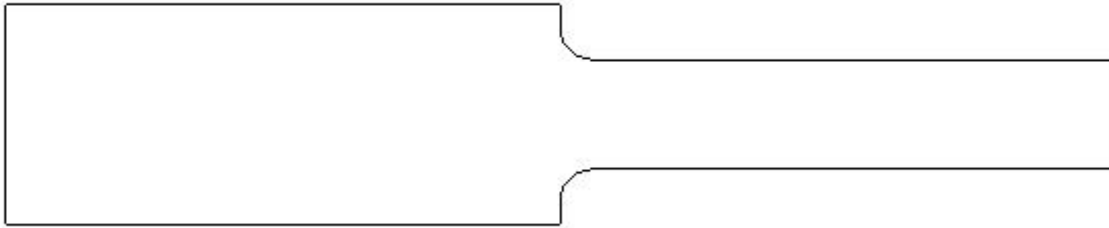
5. VERSUCHSAUSWERTUNG:

Erforderliche Bestandteile des Protokolls:

- Schriftliche Ausführung der Aufgaben unter 5.1
- Sämtliche gezeichneten und aufgenommenen Bilder (Teil 2, Teil 3, Teil 4)
- Sämtliche Berechnungsergebnisse (Teil 4)
- Schriftliche Beantwortung der Fragen (Teil 1, Teil 2, Versuchsdurchführung)

6. MODELLE FÜR VERSUCHSTEIL 4.2:

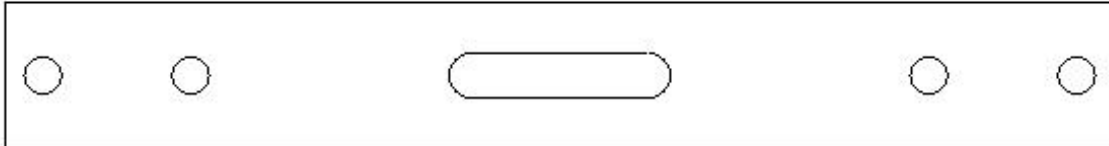
Modell 1:



Modell 2:



Modell 3:



7. LITERATUR

- /Föp 59/ Föppl, Ludwig (Dr.phil.); Mönch, Ernst (Dr.-Ing.): Praktische Spannungsoptik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1959
- /Kus 71/ Kuske, Albrecht (Prof.Dr.-Ing.): Taschenbuch der Spannungsoptik. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 1971
- /Kus 59/ Kuske, Albrecht (Prof.Dr.-Ing.): Einführung in die Spannungsoptik. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 1959
- /Wol 76/ Wolf, Helmut: Spannungsoptik. Bd. 1 - Grundlagen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1976