

INSTITUT FÜR FILM UND BILD IN WISSENSCHAFT UND UNTERRICHT
HOCHSCHULFILM C 558/1949

Aus dem Spannungsoptischen Laboratorium
der Technischen Hochschule München

Spannungsoptik

Von Prof. Dr. L. Föppl und Prof. Dr. E. Mönch

(Mit 2 Abbildungen)

Aus dem Spannungsoptischen Laboratorium der Technischen
Hochschule München

Spannungsoptik

Von Prof. Dr. L. Föppl und Prof. Dr. E. Mönch

(Mit 2 Abbildungen)

Der Film zeigt die Spannungsoptik in Anwendung auf zweidimensionale Spannungszustände. Am Modell in der einfachen spannungsoptischen Apparatur wird der Vorgang erläutert. Ein Trickteil gibt die physikalischen Erklärungen für das Zustandekommen der Isochromaten und Isoklinen. Beispiele von Isochromatenfeldern (reine Biegung, Biegestab mit Kerbe, gelochter Zugstab, statisch unbestimmter Träger, Zahnräder im Eingriff) führen in die wichtigste Auswertungsgrundlage der Spannungsoptik ein.

Der Film ist für den Hochschulunterricht bestimmt. Die Schmalfilmkopie (16 mm-Stummfilm) hat eine Länge von 137 m entsprechend 13 Minuten Vorführdauer bei einer Vorführgeschwindigkeit von 24 B/s.

I. Allgemeine Vorbemerkungen

Die Spannungsoptik dient dazu, elastische Spannungszustände, die in Konstruktionen der Technik auftreten, an einem durchsichtigen Modell aus Kunstharz mit Hilfe polarisierten Lichts sichtbar zu machen. Für den Konstrukteur bietet sich damit ein wertvolles Hilfsmittel bei der Dimensionierung vor allem solcher Konstruktionen, deren Berechnung zu schwierig oder unmöglich wäre.

Die am Modell gewonnenen Ergebnisse können dann durch einfache Rechnung mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze quantitativ auf die wirkliche Ausführung übertragen werden, und zwar unabhängig vom Werkstoff. Der Film zeigt die Spannungsoptik in Anwendung auf ebene, d. h. zweidimensionale Spannungszustände. Das Verfahren der ebenen Spannungsoptik ist besonders einfach und daher besonders erfolgreich.

Seitdem man statt der bekannten Nicolschen Prismen Großflächen-Polarisationsfilter zur Verfügung hat, hat sich die spannungsoptische Apparatur wesentlich vereinfacht. Sie besteht jetzt nur mehr (Abb. 1) aus einem durch eine Milchglasscheibe G abgeschlossenen Lampenkasten L und den beiden Filterträgern P_1 und P_2 mit den kreisrunden Polarisationsfiltern von etwa 30 cm Durchmesser. Zwischen die Filter wird das zu untersuchende Kunstharzmodell M mit seiner Belastungsvorrichtung B gebracht (in Abb. 1 ein gelochter Stab, der auf Zug beansprucht werden kann). Als Material für die Modelle eignen sich besonders die Phenol-Formaldehyd-Kunstharze, wie *Dekorit*, *Trolon*, *Bakelit* usw.

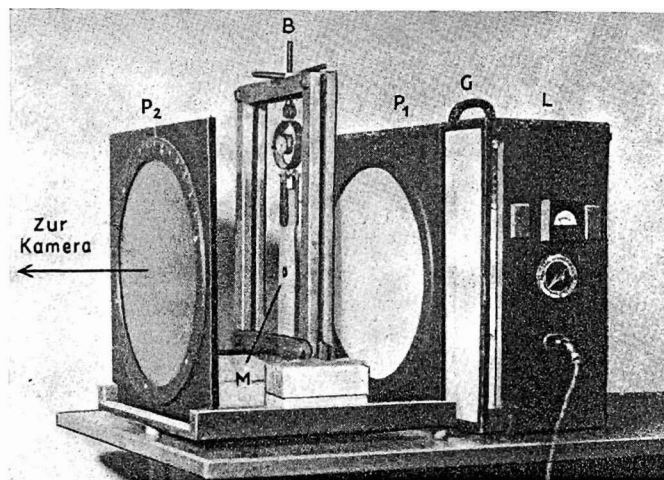


Abb. 1. Die einfache spannungsoptische Apparatur.
 L Lampenkasten, G Milchglasscheibe, P_1 Polarisator-Filter, P_2 Analysator-Filter,
 M Modell, B Belastungsvorrichtung.

Wird ein solches Kunstharzmodell belastet, so zeichnet sich auf ihm durch die Wirkung der sogenannten Spannungsdoppelbrechung im polarisierten Licht ein Bild des Spannungszustandes ab. Dieses Bild sieht ein vor der Apparatur stehender Beobachter unmittelbar; durch eine dort aufgestellte Kamera kann es photographisch aufgenommen werden.

Bei der Deutung des spannungsoptischen Bildes ist zu unterscheiden, ob linear oder zirkular polarisiertes Licht verwendet wird.

Im linear polarisierten Licht erscheinen bei gekreuzten Polarisatoren auf dem Modell zwei charakteristische Systeme von Linien, die Isochromaten und die Isoklinen.

Die Isochromaten sind Linien, längs deren die Differenz der beiden Hauptspannungen $\sigma_1 - \sigma_2$ und damit auch die Hauptschubspannung konstant ist. Von jeder Isochromate zur nächsthöheren steigt die Hauptspannungsdifferenz um den gleichen Betrag. Dieser Betrag kann durch einen Eichversuch ermittelt werden. Um die Hauptspannungsdifferenz für alle Punkte des Spannungsfeldes zu erhalten, hat man demnach lediglich von der Isochromate „nullter Ordnung“, d. h. derjenigen, längs der die Hauptspannungsdifferenz null ist, die Isochromaten abzuzählen und diese „Ordnungszahl“ mit der Eichkonstante zu multiplizieren.

Dieses Verfahren des Auszählens der Isochromaten ist das wichtigste und wertvollste in der Spannungsoptik. Es liefert mit der Verteilung von $(\sigma_1 - \sigma_2)$ gleichzeitig die Verteilung der Beanspruchung, da nach der Mohrschen Anstrengungshypothese die Hauptschubspannung

$$\tau_{II} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

maßgebend für die Beanspruchung der meisten Materialien ist. Die Isochromaten sind gleichsam experimentell gefundene Höhenlinien für die Beanspruchung.

Den Isochromaten überlagert sich im linear polarisierten Licht das Liniensystem der Isoklinen. Auf den Isoklinen ist die Richtung der Hauptspannung die gleiche, und zwar diejenige der Polarisation. Daher sind die Isoklinen abhängig von der Stellung der Polarisatoren und ändern Gestalt und Lage, wenn die Polarisatoren gegen das Modell oder das Modell gegen die Polarisatoren gedreht werden. In der spannungsoptischen Auswertungstechnik benutzt man die Isoklinen, um aus ihnen das Netz der Hauptspannungslinien zu konstruieren.

Gewöhnlich benötigt man in der Spannungsoptik nur die Isochromaten und wünscht keine Isoklinen im Bild, da sie das Isochromatensystem störend durchkreuzen. Man hält die Isoklinen aus dem Isochromatenbild fern, indem man zirkular polarisiertes Licht verwendet. Denn im zirkular polarisierten Bild können keine Richtungseffekte, also auch keine Isoklinen auftreten, wohl aber erscheinen die Isochromaten in gleicher Gestalt wie bei linearer Polarisation.

Zirkular polarisiertes Licht erhält man, indem man im Strahlen-
gang hinter den Polarisator und vor den Analysator eine Viertel-
wellenplatte einschaltet. In der einfachen spannungsoptischen
Apparatur sind die Viertelwellenplatten bereits fest auf die Polarisations-
filter aufmontiert. Man hat dann wahlweise linear oder
zirkular polarisiertes Licht in der Apparatur, je nachdem die Viertel-
wellenplatten sich außerhalb oder innerhalb der Filter befinden.
Die Umstellung der Apparatur von der einen auf die andere
Lichtart erfolgt daher durch einfaches Vertauschen der Filterträger.

Die Isochromaten sind unabhängig von der Art und Richtung der
Polarisation und behalten daher bei Drehung der Polarisatoren
ihre Lage und Gestalt. Sie sind nur abhängig von der Höhe der
Belastung. Will man ein Isoklinienbild erhalten, das durch Iso-
chromaten möglichst wenig gestört ist, so kann man dies erreichen,
indem man in linear polarisiertem Licht so wenig belastet, daß
noch keine Isochromaten höherer Ordnung auftreten; in der
Praxis verwendet man hierbei gewöhnlich ein besonderes Modell
aus Plexiglas, das eine geringere optische Wirksamkeit besitzt als
Phenolkunstharz.

II. Erläuterungen zum Film

Die einfache spannungsoptische Apparatur ¹⁾

In den ersten Szenen wird der Aufbau der Apparatur gezeigt. Die
beiden Polarisationsfilter werden eingesetzt und das Licht einge-
schaltet. Links außerhalb des Blickfeldes ist die Aufnahmekamera
zu denken. Zur weiteren Erläuterung wird die Apparatur gegen
den Beschauer zu gedreht. Wir haben in der Apparatur lineare
Polarisation und die Filter sind gekreuzt, daher erscheint das
Blickfeld dunkel. Bei Drehen des Analysators hellt es sich auf.
Nun wird ein Modell mit seiner Belastungsvorrichtung in die
Apparatur gebracht. Es handelt sich um eine rechteckige Scheibe,
die an zwei Punkten aufgelagert ist und durch eine Einzelkraft in
der Mitte belastet werden kann. Der Analysator wird wieder in
gekreuzte Stellung gedreht, und alles ist zunächst wieder dunkel.
Wird aber nun das Modell belastet, so hellt es sich auf, und die
Liniensysteme der Isochromaten und Isoklinien zeichnen sich ab.
Nachdem hiermit der Beschauer das Grundsätzliche kennenge-

¹⁾ Die Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film.

lernt hat, wird die Apparatur wieder in ihre normale Lage ge-
bracht, und wir sehen jetzt auch die Kamera zur Aufnahme des
spannungsoptischen Bildes.

Die Zerlegung des Lichtvektors in einem Modellpunkt

Der nun folgende Trickteil gibt die physikalische Erklärung für
das Zustandekommen der Isochromaten und Isoklinien. Ein linear
polarisierter Lichtstrahl, dargestellt durch seinen Schwingungs-
vektor, wird auf dem Weg durch die Apparatur verfolgt (Abb. 2).

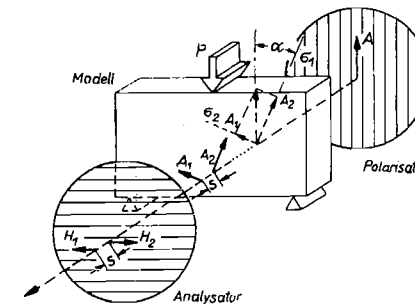


Abb. 2. Zerlegung eines linear polarisierten Lichtstrahls.

Im Modell bildet sich bei Belastung durch die Kraft P ein ebener
Spannungszustand aus, der an jeder Stelle, also auch an der, die
unser Lichtstrahl trifft, definiert ist durch Größe und Richtung
der beiden aufeinander senkrecht stehenden Hauptspannungen
 σ_1 und σ_2 . Diese Spannungen sind gleichmäßig über die ganze Modell-
dicke verteilt. Der Lichtvektor A trifft nun, vom Polarisator
kommend, auf den Spannungszustand im Modell und wird beim
Auftreten in zwei Komponenten A_1 und A_2 in Richtung der Haupt-
spannungen zerlegt. Diese Komponenten durchlaufen das Modell
mit verschiedener Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsänderung
jeder der beiden Lichtkomponenten gegenüber der Lichtgeschwin-
digkeit im unverspannten Material ist proportional den beiden
Hauptspannungen. Daher ist der Geschwindigkeitsunterschied
der beiden Komponenten im Modell und infolgedessen ihr Gang-
unterschied s nach Verlassen des Modells proportional der Differenz
der Hauptspannungen:

$$s = C (\sigma_1 - \sigma_2) d$$

(d = Modelldicke, C = Materialkonstante).

Die gewonnene Gleichung heißt die Hauptgleichung der Spannungsoptik; der Gesamtvorgang der beschriebenen Lichtzerlegung wird BREWSTERSCHES oder MAXWELL-WERTHEIMSCHES Gesetz genannt.

Zum Schluß treffen unsere beiden Lichtkomponenten A_1 und A_2 auf den Analysator. Dieser läßt nur die horizontalen Anteile H_1 und H_2 durch, die, wie leicht einzusehen ist, ihrer Amplitude nach immer gleich groß, aber in ihrer Phase im allgemeinen verschoben sind.

Zusammensetzung der beiden aus dem Analysator austretenden Lichtkomponenten

Für die auftretende Lichtwirkung ist die Superposition der beiden Wellenbewegungen (vektorielle Lichtkomponenten H_1 und H_2) maßgebend. Diese ist wesentlich abhängig vom Gangunterschied s und damit gemäß der Hauptgleichung von der Hauptspannungsdifferenz $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

Um die Erscheinungen näher zu präzisieren, denken wir uns $(\sigma_1 - \sigma_2)$ von null ausgehend ansteigen. Beim Nullwert ist auch $s = 0$, H_1 und H_2 sind in Gegenphase und ergeben keine resultierende Welle. Mit steigendem $(\sigma_1 - \sigma_2)$ wächst auch s und die jetzt phasenverschobenen Wellen haben eine Resultierende, so daß Aufhellung eintritt. Diese erreicht ihr Maximum bei $s = \lambda/2$ ($\lambda =$ Wellenlänge). Bei weiterem Anstieg der Spannung nimmt die Helligkeit wieder ab, bis bei $s = \lambda$ die Komponenten H_1 und H_2 wieder in Gegenphase sind und sich gegenseitig auslöschen. Dieses Spiel wiederholt sich in regelmäßigen Abständen. Die Stellen der Auslöschungen $s = \lambda, 2\lambda \dots$ bedeuten die ganzzahligen Isochromatenordnungen.

Steigende Isochromatenordnung bei der Belastung eines Zugstabes

Zur experimentellen Verdeutlichung der steigenden Isochromatenordnung wird ein Stab auf reinen Zug beansprucht. In seinem prismatischen Mittelteil ist der Spannungszustand gleichmäßig und zeigt daher überall dieselbe Isochromatenordnung, bei steigender Belastung also abwechselnd gleichmäßige Aufhellung und Verdunkelung.

Entstehung der Isoklinen

Wir verfolgen nochmals den Strahlengang gemäß Abb. 2 für den Fall, daß die Polarisationsrichtung mit der Hauptspannungsrichtung zusammenfällt. Zu diesem Zweck denken wir das Modell so gedreht, daß der Winkel α (Abb. 2) null wird. Dann wird bei der Zerlegung die Komponente A_1 null, der Vektor passiert also unzerlegt senkrecht polarisiert das Modell und wird demgemäß vom Analysator ausgelöscht. Alle Punkte, wo die Hauptspannungsrichtung mit der Polarisationsrichtung zusammenfällt, erscheinen also dunkel, sie bilden die Isoklinen.

Isoklinen und Isochromaten

Wir betrachten nun die an dem eingangs gezeigten Modell eintretenden Lichterscheinungen genauer. Zunächst wird nur wenig belastet, so daß noch kaum Isochromaten, aber deutlich die Isoklinen auftreten. Daß sie richtungsabhängig sind, erweist sich bei einer Drehung des Modells. Bei stärkerer Belastung erscheinen auch die Isochromaten. Drehung des Modells zeigt jetzt, daß die Isoklinen dabei wieder ihre Lage verändern, die Isochromaten dagegen ortsgebunden sind.

Im zirkular polarisierten Licht keine Isoklinen

Die Apparatur wird nunmehr von linear auf zirkular polarisiertes Licht eingestellt, indem die Filter vertauscht werden. Die Isoklinen sind jetzt verschwunden. Drehung des Modells ergibt, daß das allein verbliebene Isochromatenbild unabhängig von der Richtung ist.

Beispiele von Isochromatenfeldern

Das Isochromatenbild, das die wichtigste Auswertungsgrundlage der Spannungsoptik darstellt, wird nun an einigen praktischen Beispielen erläutert.

Reine Biegung

Ein prismatischer, durch ein reines Moment auf Biegung beanspruchter Stab zeigt infolge der von der neutralen Faser linear ansteigenden Biegespannung als Isochromaten parallele Gerade gleichen Abstandes. Der Zuschauer merke sich zum Vergleich mit dem nächsten Versuch, daß am Rand die maximale Isochromatenordnung vom Wert 2 auftritt.

Da der reine Biegespannungszustand theoretisch leicht und exakt erfaßt werden kann, dient er in der Spannungsoptik gewöhnlich als Eichversuch.

Biegestab mit Kerbe

Der vorher gezeigte Biegestab wurde mit einer Rundkerbe versehen und wird durch das gleiche Moment wie vorher belastet. Am Kerbgrund steigt jetzt die Ordnung bis auf den Wert 4. Die Spannung ist also gegenüber vorher auf das Doppelte gestiegen.

Spannungsoptische Untersuchung des Zugstabes

Das Isochromatenbild eines Zugstabes mit Bohrung läßt ebenfalls eine starke Spannungserhöhung an der Bohrung durch Kerbwirkung erkennen. In einiger Entfernung vom Bohrloch dagegen ist der Spannungszustand annähernd gleichförmig.

Statisch unbestimmter Träger

Die Biegespannungen in Trägern mit biegeunflexiblen Knotenpunkten können, da sie hochgradig statisch unbestimmt sind, meist nur unter erheblichem Aufwand von Rechenarbeit theoretisch erfaßt werden. Mit Hilfe der Spannungsoptik kann man diese Rechenarbeit außerordentlich reduzieren, indem man die Momentennullpunkte bestimmt, die im Isochromatenbild leicht und genau zu erkennen sind.

Der Film zeigt zunächst das Aufbringen einer Last an der durch ein helles Dreieck gekennzeichneten Stelle (rechts oben). Hierauf wird die Last nach links verschoben und man erkennt, wie sich dabei der Spannungszustand ändert. Bei dem Spannungszustand, der eintritt, wenn die Last in der Mitte angreift, werden einige Momentennullpunkte durch Pfeile markiert.

Zahnräder im Eingriff

Die letzte Szene zeigt ein Zahnradpaar im Eingriff. Zunächst wird bei noch stehenden Rädern ein Drehmoment aufgebracht und die Beanspruchung der Zähne wird sichtbar. Sie ist besonders groß an den sich berührenden Zahnflanken und am Zahnfuß. Bei der nun folgenden Drehung der Räder sieht man, wie sich der

Spannungszustand bei wechselnder Eingriffsstellung ändert. Besonders eindrucksvoll ist der Beginn eines neuen Eingriffs und die Umkehr der Richtung der Reibung an den Zahnflanken, wenn der Eingriffspunkt die Verbindungslinie der Zahnradachsen passiert.

(Eingegangen am 2. 4. 1949)

Die Herstellung des Films erfolgte im Jahre 1948 unter der wissenschaftl. Leitung von Prof. Dr. L. FÖPPL und Prof. Dr. E. MÖNCH durch das

Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht
Abteilung Hochschule und Forschung
(Dir.: Dr.-Ing. G. WOLF)

Sachbearbeitung: Dr.-Ing. J. RIECK — Aufnahme: G. SCHMID
Trick: Institut für wissenschaftliche Filme, E. MENZEL, Erlangen