

SPEKTRALANALYTISCHE AUSWERTUNG SPANNUNGSOPTISCHER BILDER

Von

T. FEKETE

Lehrstuhl für Mechanik, Fakultät für Verkehrswesen
Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 2. April, 1971.)

Vorgelegt von Prof. Dr. P. MICHELBERGER

I. Einleitung

Die Spannungsoptik ist z. Z. eine der meistbenützten Verfahren der experimentellen Spannungsanalyse. Die physikalische Grundlage des Verfahrens wurde von BREWSTER bereits im Jahre 1816 entdeckt, aber es mußten noch fast hundert Jahre verstreichen, ehe aus der physikalischen Beobachtung ein für die technische Praxis brauchbares Verfahren zur Spannungsmessung entwickelt wurde. Die Möglichkeit der Bestimmung des in Bauteilen tatsächlich auftretenden Spannungszustandes wirkte befruchtend auf die weitere Entwicklung der Spannungsoptik, da sich die Konstrukteure bei der Anwendung der immer neueren Bemessungsverfahren in wachsendem Umfang mit Festigkeitsproblemen konfrontiert sahen, die auf theoretischem Wege nicht zu lösen waren. Als Ergebnis dieser Entwicklung stehen heute bereits serienmäßig hergestellte Geräte und spezielle Modellwerkstoffe den sich mit diesem Verfahren beschäftigenden Forschern zur Verfügung und die mannigfaltigen Arten der Spannungsoptik werden in einem reichen Schrifttum behandelt ([1], [2], [3], [4]).

Anfangs erfolgte die spannungsoptische Durchleuchtung in weißem Licht, wobei aus der Farbe der Isochromaten auf den Spannungszustand geschlossen wurde. Mit Hilfe kolorimetrischer Methoden kann jedoch gezeigt werden, daß zwischen den Ordnungszahlen von sog. Farben höherer Ordnung und der Wegdifferenz der beiden zueinander senkrecht schwingenden Lichtkomponenten während des Lichtdurchganges durch das Modell kein linearer Zusammenhang besteht. Zudem ist die visuelle Identifikation der zu steigenden Ordnungen zugeordneten Isochromatenfarben prinzipiell unmöglich, da diese Farben sowohl in physikalischem Sinne wie auch der Farbempfindung nach voneinander abweichen.

Mit der Einführung monochromatischer Lichtquellen sind auch die Schwierigkeiten der visuellen Farbenidentifikation behoben worden. Die Durchleuchtung in weißem Licht beschränkte sich von nun an auf die Auf-

nahme der Isoklinen. Durch die Verwendung monochromatischer Lichtquellen wurde eine genauere Auswertung schon dadurch erreicht, daß in diesem Fall zwischen den Ordnungszahlen und der schon erwähnten Wegdifferenz der Lichtkomponenten eine einfache Proportionalität besteht. Die Vorteile der Durchleuchtung im monochromatischen Licht gaben der Spannungsoptik zweifellos einen großen Aufschwung, lenkten aber zugleich von der Erforschung weiterer Auswertmöglichkeiten ab, obwohl sich aus der Tatsache, daß die einzelnen Isochromatenfarben auch ihrem physikalischen Inhalt nach voneinander abweichen, die Möglichkeit eines bis jetzt nicht ausgenutzten Auswertungsverfahrens ergibt. Im folgenden soll dieses Verfahren in großen Zügen beschreiben werden.

2. Energieverteilungsfunktion der Isochromatenfarben

Die als Grundlage der Spannungsoptik dienende Spannungsdoppelbrechung und deren mathematische Behandlung werden in den in der Einleitung angeführten umfassenden Fachbüchern ausführlich behandelt, so daß von der Ableitung der Grundgleichungen Abstand genommen werden kann.

Das Maß der optischen Doppelbrechung eines belasteten Modells kann durch die Wegdifferenz (δ) zwischen den in den Hauptspannungsrichtungen schwingenden Lichtkomponenten in folgender Weise ausgedrückt werden:

$$\delta = C \cdot d \cdot (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (1)$$

Hierin ist C eine Materialkonstante, d die optische Weglänge des Lichtstrahls im Modell, σ_1 und σ_2 sind die beiden Hauptspannungen.

Im folgenden soll die Durchleuchtung mit einem Lichtstrahl erfolgen, der in gewissem Ausmaß alle Wellenlängen des sichtbaren Bereichs enthält. Die physikalischen Eigenschaften derartiger Lichtquellen können durch die spektrale Energieverteilung des ausgesandten Lichtes beschrieben werden, woraus naturgemäß auch das subjektive Farbempfinden abgeleitet werden kann.

Für die meistgebräuchlichen Glühlampen kann in guter Annäherung z. B. die für die Wärmestrahlung des absolut schwarzen Körpers gültige PLANCKSche Formel [5] angewendet werden:

$$E(\lambda, T) d\lambda = \frac{c^2 h}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad (2)$$

Hierin ist

c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,

h das PLANCKSche Wirkungsquantum,
 k die BOLTZMANSche Konstante,
 λ und ν Wellenlänge bzw. Schwingungszahl des Lichtes
 T die absolute Temperatur des Glühfadens.

Die ursprüngliche Energieverteilung einer Lichtquelle kann durch Farbfilter oder durch Reflexion an farbigen Oberflächen stark beeinflusst werden, wobei jedoch der stetige Charakter der spektralen Energieverteilung erhalten bleibt.

Die Farbzusammensetzung des aus dem Beleuchtungssystem austretenden Lichtstrahls erfährt beim Durchgang durch die Polarisationsfilter der spannungsoptischen Einrichtung und durch das belastete Modell eine weitere wesentliche Änderung. Die Energie der Lichtkomponente mit der Wellenlänge λ eines zirkularpolarisierten Lichtstrahls wird durch die Spannungsdoppelbrechung folgendermaßen vermindert

$$E_{\varphi} = E_0 \varphi = E_0 \sin^2 \left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Hierin ist

E_0 die Energie des in das Modell eintretenden Lichtstrahls mit der Wellenlänge λ ,

E_{φ} die geänderte Energie des aus dem Analysator austretenden Lichtes.

Die Kenntnis des zu einer einzigen Wellenlänge gehörenden Wertes der Multiplikatorfunktion φ der Gl. (3) würde an sich schon genügen, um die Wegdifferenz δ oder gemäß Gl. (1) die Hauptspannungsdifferenz zu bestimmen, da

$$\delta = c \cdot d(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\lambda}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{E_{\varphi}}{E_0}} \quad (4)$$

ist. Eine derartige Bestimmung von δ würde jedoch die genaue Messung der Änderung der Lichtenergie erfordern, was zunächst recht schwierig ist. Außerdem ist die untersuchte Funktion nicht einwertig. Die Messung der Energieverminderung kann jedoch unterbleiben, wenn Wellenlängen ausgewählt werden, für die eine vollkommene Auslöschung erfolgt, d. h.

$$\varphi = \sin^2 \left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \right) = 0 \quad (5)$$

ist. Voraussetzung für die vollkommene Auslöschung ist, daß die Wegdifferenz eine ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge ist:

$$\delta = m \lambda_m \quad (6)$$

mit $m = 0, 1, 2, \dots$, usw.

Die experimentelle Bestimmung der ausgelöschten Wellenlängen kann derart erfolgen daß mit Hilfe eines Glasprismas oder eines optischen Gitters die Isochromatenfarbe in ihr Spektrum aufgelöst wird (Abb. 1) und auf einer zum Spektrum kalibrierten Skala innerhalb des sichtbaren Bereichs die Wellenlängen der ausgelöschten Farben (λ_1 , λ_2 , λ_3 usw.) abgelesen werden.

Die Wegdifferenz kann aus jeder der gemessenen, ausgelöschten Wellenlängen errechnet werden:

$$\delta = 1\lambda_1 = 2\lambda_2 = 3\lambda_3 \dots \text{ usw.} \quad (7)$$

In Kenntnis der zu zwei benachbarten dunklen Isochromatenstreifen gehörenden Wellenlängen kann die Wegdifferenz auch dann eindeutig berechnet werden, wenn die Ordnungszahlen der Streifen nicht eindeutig ermittelt werden können. Werden nämlich die Ordnungszahlen der benachbarten Streifen mit m bzw. $m + 1$ bezeichnet, dann kann geschrieben werden

$$m\lambda_m = (m + 1)\lambda_{m+1}$$

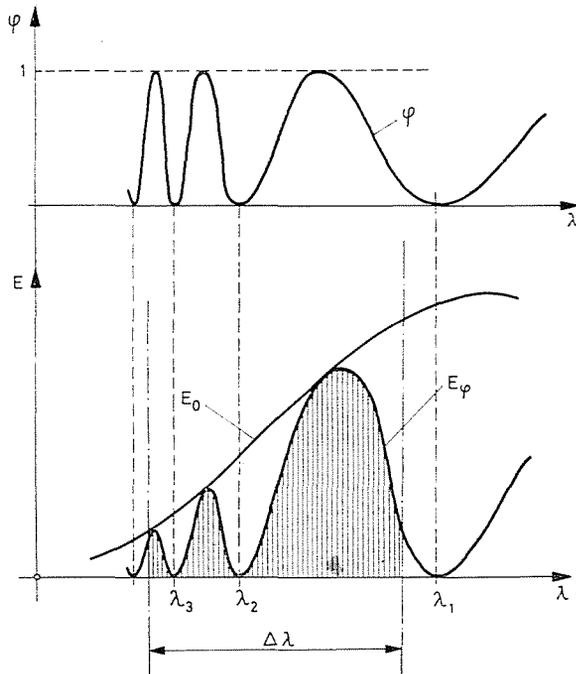


Abb. 1. Herstellung der Energieverteilungsfunktion der Spektralfarben mit Hilfe der Multiplikatorfunktion φ . E_0 : ursprüngliche Energieverteilungsfunktion der Lichtquelle. $\Delta\lambda$: Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums

und daraus

$$m = \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m - \lambda_{m+1}} \tag{8}$$

sowie

$$\delta = \frac{\lambda_m}{m} = \frac{\lambda_{m+1}}{m+1}, \tag{9}$$

3. Praktische Anwendung

Die Hauptspannungsdifferenz in einem belasteten ebenen Modell und damit die Isochromatenfarben ändern sich von Ort zu Ort. Vor das Modell wurde ein dunkler Schirm mit einer Spaltblende gestellt. Wird in den Strahlengang der durch den Spalt durchtretenden Strahlen ein Glasprisma oder ein optisches Beugungsgitter gestellt, erscheint an Stelle des schmalen, hellen Lichtbündels ein breites Spektrum, in dem die den ausgelöschten Wellenlängen entsprechenden Spektralpunkte zu stetigen Linien verschmelzen.

Der Verlauf dieser dunklen Spektrallinien kann in einigen Fällen auch auf theoretischem Wege ermittelt werden. Ein derartiger Fall ist der auf reine Biegung beanspruchte Balken, bei dem die Hauptspannungsdifferenz und die dazu proportionale Wegdifferenz δ entlang eines Querschnittes linear verteilt sind (Abb. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_1 - \sigma_2; \\ \delta &= kd(\sigma_1 - \sigma_2) = kd \frac{M}{I} y = \text{const. } y. \end{aligned} \tag{10}$$

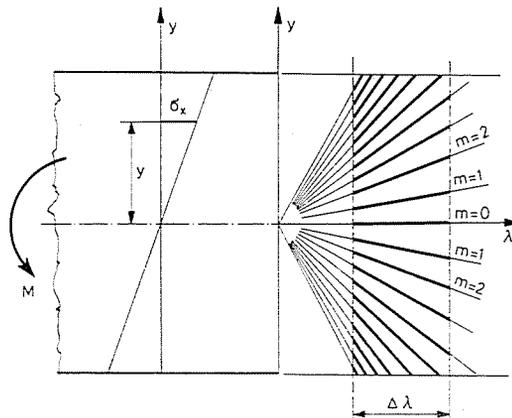


Abb. 2. Konstruktion der dunklen Linien des Spektrums der Isochromatenfarben für einen Querschnitt eines auf reine Biegung beanspruchten, geraden Balkens

Die Funktion (10) des Verlaufs der Wegdifferenz in Gl. (6) eingesetzt, ergibt

$$\text{const. } y = m\lambda_m. \quad (11)$$

Gl. (11) kann, da der Wert von m eine ganze Zahl sein muß, in einem y, λ -Koordinatensystem durch eine Geradenschar dargestellt werden.

Abb. 3 zeigt das Spektrum eines Durchmessers des Isochromatenbildes einer Kreisscheibe. Die Scheibe wird durch die beiden eingezeichneten Einzelkräfte belastet.

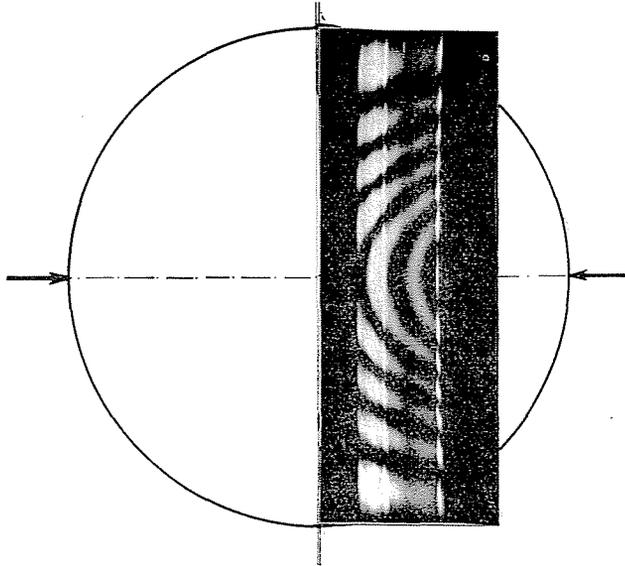


Abb. 3. Lichtbild der dunkeln Streifen im Spaltspektrum des Isochromatenbildes eines Durchmessers einer Kreisscheibe. Spektrale Auflösung durch Glasprisma

Bei der ausführlichen Analyse derartiger Spektren ist unbedingt zu beachten, daß die Lichtstrahlen durch ein Glasprisma nicht proportional ihrer Wellenlänge abgelenkt werden. Zur schnellen und bequemen Ermittlung der Spannungswerte ist es deshalb zweckmäßig, ein Vergleichsspektrum herzustellen, das unmittelbar auf Spannungswerte kalibriert werden kann. Zur Herstellung eines derartigen kalibrierten Spektrums kann zweckmäßigerweise das Modell in Abb. 2 benützt werden.

Schließlich sei noch erwähnt, daß nach der beschriebenen Methode die stetige Kurve der Verteilung der Hauptspannungsdifferenzen längs einer beliebigen Geraden der Modellfläche erzeugt werden kann. Aus der Verteilung und Steigung der dunklen Linien im Spektrum kann auch das in der Theorie der Werkstoffermüdung wichtige bezogene Spannungsgefälle [6] mit hoher Genauigkeit ermittelt werden.

Zusammenfassung

Die Spannungswerte, die den in weißem Licht aufgenommenen farbigen Isochromaten entsprechen, wurden früher durch einfaches Farbempfinden bestimmt. Werden jedoch die Farben in ihr Spektrum aufgelöst, so erscheinen darin eine oder mehrere dunkle Streifen. Die zu diesen Streifen gehörenden Wellenlängen können mit der Hauptspannungsdifferenz in einen verhältnismäßig einfachen mathematischen Zusammenhang gebracht werden. Die dunklen spektralen Streifen bilden in Spaltspektren von Schnitten durchleuchteter Modelle stetige Linienzüge, die zur stetigen Darstellung des Spannungsverlaufs geeignet sind. Durch die Messung der Steigung dieser Linienzüge kann auch das bezogene Spannungsgefälle mit hoher Genauigkeit ermittelt werden.

Literatur

1. FÖPPL—MÖNCH: Praktische Spannungsoptik, Springer-Verlag, Berlin, 1959
2. WOLF: Spannungsoptik, Springer-Verlag, Berlin, 1969
3. KUSKE, A.: Verfahren der Spannungsoptik, Deutscher Ingenieur-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1950
4. THAMM—LUDVIC—HUSZÁR—SZÁNTÓ: A szilárdságtan kísérleti módszerei (Experimentelle Spannungsanalyse). Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968
5. PAPALESZI, N. D.: Fizika II. (Physik) Tankönyvkiadó, Budapest, 1951
6. ZSÁRY, Á.: A feszültségesési tényező meghatározása bemetszett húzott próbatesteken. (Bestimmung des bezogenen Spannungsgefälles in gekerbten Zugstäben.) ÉKME Tudományos Közleményei, 13, 61. (1967)

Dr. Tibor FEKETE 1450 Budapest, Postfach 93. Ungarn.