Die neuen Einrichtungen des Photoelastischen Laboratoriums an der Eidg. Techn. Hochschule und an der Eidg. Materialprüfungsanstalt

Autor(en): **Tank, F. / Baud, R.V. / Schiltknecht, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **109/110 (1937)**

Heft 21

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-49055

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

INHALT: Die neuen Einrichtungen des Photoelastischen Laboratoriums an der E. T. H. und an der Eidg. Materialprüfungsanstalt. — Ein elektrischer Stechpegel. — Das Projekt der Glatt-Vertiefung. — Zur Revision der schweiz. Drahtseil-Normen. — Mitteilungen: Akustik der Konzertsäle. Der Juliana-Kanal. Versuchsanlage für Dampfturbinen. Die grosse Oper in Paris. Druckleitung in Eisenbeton. Rauhreifbildungen an Gebirgsleitungen. Die schweizerische Elektrizitätserzeugung 1935/36. Die Rhein-See-Schiffahrt. Internat. Kongress über die Anwendungen der Beleuchtung. Oberingenieur des Schweiz. Vereins von Dampfkesselbesitzern. — † Prof. Dr. Emil Bosshard. — Wettbewerbe. Turnhalle und Gemeindehaus Dintikon (Aarg.). Kasino Zürichhorn und Wirtschaftsgebäude Waid. — Literatur. — Schweizer Verband für die Mat.-Prüf. d. Technik. — Vortrags-Kalender.

Band 109
Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich.
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.
Nr. 21

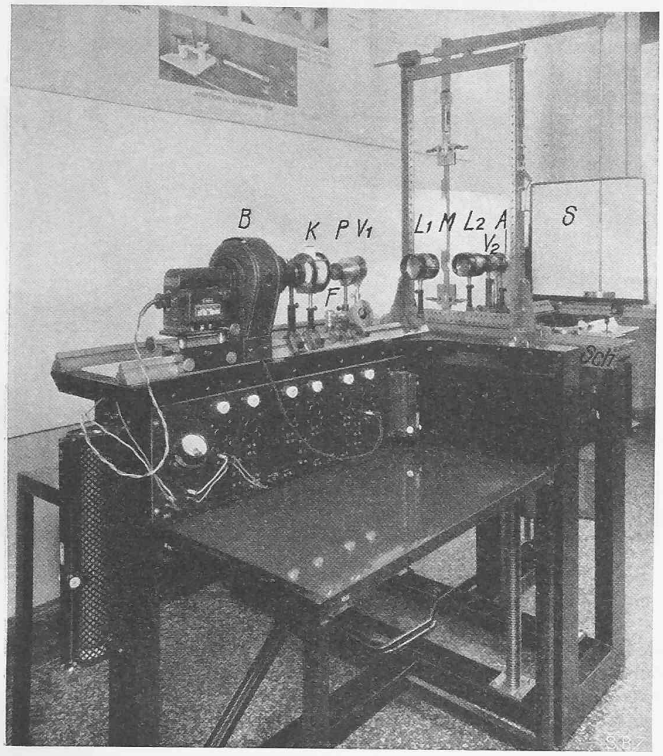


Abb. 1. Gesamtansicht der photoelastischen Messapparatur.

Die neuen Einrichtungen des Photoelastischen Laboratoriums an der Eidg. Techn. Hochschule und an der Eidg. Materialprüfungsanstalt

Von F. TANK, R. V. BAUD und E. SCHILTKNECHT

Im Laufe der Jahre 1935 und 1936 erfuhr das Photoelastische Laboratorium der Eidg. Technischen Hochschule[1]) in enger Zusammenarbeit mit der Eidg. Materialprüfungsanstalt eine Erweiterung, die, einem längst empfundenen Bedürfnis entsprechend, fortan die Möglichkeit schaffen soll, die bekannten photoelastischen Untersuchungsmethoden[2]) auch in den Dienst des Materialprüfungswesens, sowie allgemein der Technik und Industrie zu stellen.[3]) Ueber die geschaffenen Neueinrichtungen sei hier berichtet; mögen sie ihre Zweckbestimmung in fruchtbringender Weise erfüllen. Die erforderlichen Mittel wurden in sehr verdankenswerter Weise aus dem «Schulfonds» der E. T. H. bewilligt.

1. Es ist eine Eigentümlichkeit des ebenen, elastischen Spannungszustandes, dass bei gegebenen äusseren Kräften das Feld der elastischen Spannungen im allgemeinen von den Konstanten des Materiales vollkommen unabhängig ist. Auf diese Tatsache gründet sich das photoelastische Modellverfahren, wonach die Spannungen an durchsichtigen elastischen Modellkörpern auf optischem Wege bestimmt werden und der Schluss auf den der Wirklichkeit entsprechenden Fall durch einfache proportionale Umrechnung zu geschehen hat. Die Methode in ihrem heutigen Entwicklungszustand gestattet in einwandfreier Weise zweidimensionale Probleme zu lösen, d. h. sie ermöglicht innerhalb dieses Rahmens die experimentelle Untersuchung der Spannungsfelder in Konstruktionsteilen, insbesondere also die Bestimmung der Randspannungen (Maximalspannungen), Hauptschubspannungen, Trajektorien, neutralen Linien, Singularitäten usw.

Die angewandten optischen Verfahren sind im Grunde der Kristalloptik entnommen, wird doch der Modellkörper infolge des Auftretens innerer Spannungen doppelbrechend (akzidentelle Doppelbrechung), sodass er einem Mosaik verschiedenartiger und verschiedenartig gelagerter zweiaxiger Kristalle gleicht, deren kristallographische Hauptaxen mit den elastischen Hauptspannungsrichtungen zusammenfallen. Die Veränderung der optischen Brechungsverhältnisse gegenüber dem spannungsfreien Zustande ergibt ein Mass für die Grösse der elastischen Spannungen.

Die Aufgaben eines photoelastischen Laboratoriums lassen sich in solche teilen, die, mehr im Sinne der praktischen Bedürfnisse der Technik, rasch und sicher erledigt werden sollen, ohne dass dabei jedoch die grösste Genauigkeit von ausschlaggebender Bedeutung ist, und solche, bei denen der Aufwand an Zeit und Mitteln weniger in Frage kommt, dafür aber eine möglichste Präzision und Vollständigkeit der Lösung erstrebt wird. Bei dieser zweiten Gruppe wird es sich vor allem um die wissenschaftliche Bearbeitung ausgewählter Beispiele handeln, namentlich um die Prüfung von Theorien und Berechnungsmethoden. Entsprechend diesen Anforderungen sind auch die Messapparaturen zu bauen. Zur Ausführung rascher Messungen entschieden wir uns für die flächenhaften Verfahren[4]), ergänzt durch die elektrische Aehnlichkeitsmethode zur Bestimmung der Summe der Hauptspannungen[5]); für Präzisionsmessungen behalten wir die rein optische Interferometermethode bei, die sich für solche Zwecke bisher sehr gut bewährt hat.[6])

Die sog. flächenhafte Methodik erlaubt, mit Hülfe des auf einen Schirm oder auf die photographische Platte entworfenen, von den schwarzen «Isoklinen» und den farbigen «Isochromaten» durchzogenen Bildes des elastisch beanspruchten Modells zuverlässig und in kurzer Zeit die Richtung der Hauptspannungen σ_1, bezw. σ_2 und die Differenz $\sigma_1 - \sigma_2$ ihres Betrages auszuwerten. Die Isoklinen dienen zur Zeichnung der Scharen der Hauptspannungstrajektoren, während die Isochromaten gestatten, jene Kurven anzugeben, längs denen mit praktisch meist genügender Genauigkeit die maximale Schubspannung konstante Werte besitzt.

Der Ermittlung der Hauptspannungen selbst aber stehen grössere Schwierigkeiten im Wege. Man hat entweder die Dickenänderung des Modelles zu messen (Mesnager, Coker) oder graphische Integrationen auszuführen (Filon, Coker, Baud, Föppl und Neuber)[7]). Beide Wege haben ihre Vor- und Nachteile, sei es hinsichtlich des Zeitbedarfes oder der Zuverlässigkeit der Apparaturen.

So entschlossen wir uns denn, einem zuerst von Den Hartog[8]) gemachten Vorschlage folgend, auf die Tatsache zurückzugreifen, dass beim ebenen Spannungszustand (Scheibenprobleme) die Summe $\sigma_1 + \sigma_2$ der Hauptspannungen die Potentialgleichung $\Delta\varphi = 0$ befriedigt. Die Seifenhautmethode[9]), die man zur Ausnützung dieses Umstandes heranziehen kann, schien uns aus experimentellen Gründen nicht geeignet, vielmehr glauben wir, dass sich die obige Gleichung bei vorgeschriebenen Randbedingungen experimentell am besten durch eine Sondenmessung im «elektrolytischen Trog» auf rein elektrischem Wege lösen lässt (vergl. sub. 3).

2. Die von uns durchgebildete Anordnung der flächenhaften Methodik ist in den Abb. 1, 2 und 3 dargestellt. Das Licht einer selbsttätig regulierenden Bogenlampe B wird in einem Polarisator P (Nicol-Prisma oder noch besser «Pola»-Filter[10]) linear polarisiert und durch ein Linsensystem L_1 parallel gemacht. Es tritt durch das Modell M hindurch und passiert dann ein weiteres Linsensystem L_2, sowie den Analysator A (Nicol-Prisma oder Pola-Filter). Auf dem Schirm S entsteht das farbige Interferenzbild des Modelles, in dem als schwarze Streifen die Isoklinen zu sehen

[1]) «SBZ» Bd. 104, Nr. 5 (1934, S. 45*).

[2]) Vergl. z. B. *E. G. Coker* und *L. N. G. Filon,* Photoelasticity, Cambridge 1931; *L. Föppl* und *H. Neuber,* Festigkeitslehre mittels Spannungsoptik, München und Berlin 1935.

[3]) Zu diesem Zwecke wurde der E. M. P. A. eine Abteilung für Photoelastizität angegliedert.

[4]) *R. V. Baud,* «SBZ» Bd. 100 (1932) Nr. 1/2, S. 1*, 15*; Journal of Opt. Soc. of America, Vol. 18, Nr. 5 (1929) und Vol. 21, Nr. 2 (1931).

[5]) *H. Meyer* und *F. Tank,* Helv. Phys. Acta Bd. 8 (1935) S. 315.

[6]) *H. Favre,* «SBZ» Nr. 3 u. 10 (1927), S. 291*, 307*; Revue d'Optique 8 (1929) S. 193, 241, 289.

[7]) Ueber eine Zusammenstellung der Methoden vergl. *H. Favre,* Revue d'Optique Bd. 11 (1932). Eine weitere Zusammenstellung von R. V. Baud betreffend sämtliche heute bekannten Methoden erscheint demnächst.

[8]) *Den Hartog,* Z. A. M. M. Bd. 11 (1931), S. 156.

[9]) «SBZ» Bd. 105, Nr. 25 (1935), S. 289*.

[10]) Die Kodak «Pola»-Polarisationsfilter sind für photoelastische Apparaturen besonders geeignet, weil sie bei ihrem verhältnismässig grossen Durchmesser (bis rd. 115 mm) leicht grosse Gesichtsfelder ermöglichen und die unwillkommene Strahlenkonzentration, die bei Verwendung Nicol'scher Prismen notwendig ist, dahinfällt.

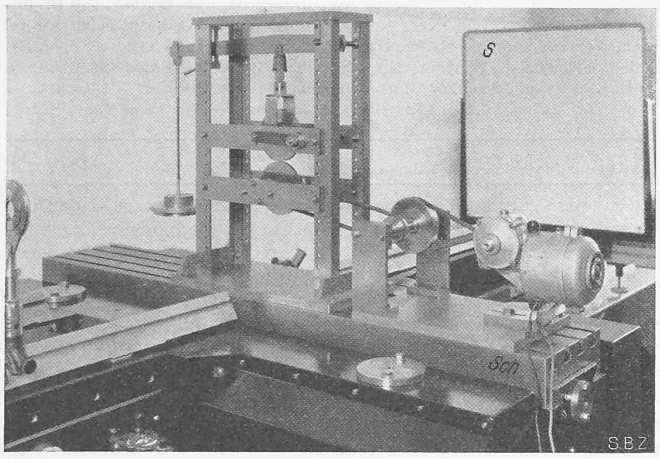


Abb. 2. Bühne, Modell und Projektionsschirm.

sind. Sie sind die Kurven gleicher Richtung der Hauptspannungen. Durch Drehen von Polarisator und Analysator, wobei aber beide stets um 90° gekreuzt bleiben, können diejenigen Kurvenzüge gefunden werden, die den verschiedenen Neigungswinkeln α der Hauptspannungsrichtungen gegen die Vertikale innerhalb 0° und $\pm$ 90° entsprechen.

Das System der Isochromaten wird durch einen Interferenzeffekt erzeugt und besteht bei Verwendung von weissem Lichte aus charakteristisch gefärbten Bändern, bei Anwendung monochromatischen Lichtes, zu dessen Gewinnung man sich des auf einem Knickreiter befindlichen Lichtfilters F bedienen kann, aus hellen und dunkeln Interferenzstreifen. Es ist für die Beträge von $\sigma_1 - \sigma_2$ charakteristisch. Um die Isoklinen zu eliminieren, werden die ebenfalls auf Knickreitern befindlichen Viertelwellenplatten V_1 und V_2 in den Lichtweg eingeschaltet.

Um trotz des beschränkten Gesichtsfeldes, entsprechend einem Kreise von 8 cm ∅ auf dem Modelle, auch grosse Stücke untersuchen zu können, werden die Hilfsapparaturen, die für das Anbringen der äusseren Kräfte dienen, auf eine Schiebebühne *Sch* (120 cm × 19,5 cm) aufgeschraubt. Bühne und Modell sind besonders deutlich in Abb. 2 zu erkennen. Mit Hilfe zweier Elektromotoren, die vom Standort des Beobachters (links oder rechts vom Instrument) aus gesteuert werden können, lassen sich Getriebe betätigen, welche die Bühne horizontal um $\pm$ 40 cm und vertikal in den Grenzen 20 bis 85 cm von der optischen Achse weg verschieben. Das «Ueberfahren» wird durch selbsttätige Endausschalter vermieden. Zwecks Messung der Verschiebungen sind an der Bühne zwei Masstäbe befestigt, die mit den feststehenden Mikroskopen M_1 und M_2 abgelesen werden (Abb. 3). Vermittelst dieser Anordnung lassen sich alle Punktkoordinaten des Modelles mit einer Genauigkeit von $\pm$ 0,1 mm bestimmen, und es erübrigt sich das Anbringen von besonderen Marken oder Blenden auf dem Modell.

Für den Schirm S (Abb. 1 und 2), der zur Beobachtung dient, falls man nicht die photographische Kamera benützt, ist ebenfalls eine weitgehende Bewegungsfreiheit vorgesehen worden, und zwar von einer Mittelstellung aus um $\pm$ 32,5 cm nach vor- und rückwärts, um $\pm$ 30 cm in der Querrichtung und um 28 cm nach oben bezw. 15 cm (im Bedarfsfall bis 45 cm) nach unten. Diese Verschiebbarkeit erlaubt, Blätter von 60 cm × 60 cm Grösse ohne Umspannen auszuzeichnen, was bei einer mittleren Vergrösserung von 3,65 einer Modellfläche von 16,5 cm × 16,5 cm entspricht. Die in der Schirmebene vorgesehene Schwenkmöglichkeit gestattet, vorgezeichnete Konturen, Axen, quadratische Netze usw. rasch mit den entsprechenden Linien des Modelles selbst in Einklang zu bringen. Ausserdem lassen sich dadurch Abweichungen korrigieren, die allenfalls bei der Drehung des Polarisators und Analysators entstehen können.

Ein elektrisches Schalttableau, das in Abb. 1 gut sichtbar ist, vermittelt eine Reihe elektrischer Anschlüsse, wie sie z. B. beim Arbeiten mit bewegten Modellen, vergl. Abb. 2, notwendig sind. Als Material für die Modelle dienen Platten aus Zelluloid, Bakelit, Phenolit, Plexiglas oder ähnlichen durchsichtigen Stoffen, die neben möglichst einwandfreien elastischen Eigenschaften die Forderung leichter Bearbeitbarkeit erfüllen sollen.

3. Nach der Ermittlung der Hauptspannungstrajektorien und der Kurven $\sigma_1 - \sigma_2 =$ konst. handelt es sich im Weiteren um die Bestimmung des Betrages von $\sigma_1 + \sigma_2$. Zu diesem Zwecke wird aus einer Platte aus isolierendem Material, z. B. Eternit, ein Stück, entsprechend der Form des Modelles, herausgeschnitten. Es entsteht so ein «Rand», an dem eine grössere Zahl von elektrischen Zuleitungen angebracht wird, wie z. B. aus Abb. 4 hervorgeht. Jeder dieser Spannungszuführungen wird vermöge von einstellbaren Potentiometern, die sich in einem Kasten G befinden, ein der elastischen Randspannung proportionales elektrisches Wechselstrompotential erteilt. Dies kann geschehen, weil wegen des Verschwindens der einen Hauptspannung (σ_2) am freien Rande die andere Hauptspannung (σ_1), sowohl mit der Summe, als mit der Differenz der Hauptspannungen identisch und daher durch die optischen Messungen von $\sigma_1 - \sigma_2$ bereits ermittelt ist. Damit zwischen den Punkten von fest aufgeprägtem elektrischem Potential ein stetiger Spannungsausgleich möglich ist, wird der Rand mit einem Halbleiteranstrich versehen. Der Widerstand des Halbleiterbelages ist gegenüber den Potentiometerwiderständen und im Verhältnis zur Leitfähigkeit der Flüssigkeit im Trog richtig zu wählen. Sehr gut bewährt hat sich eine Paste aus Graphitpulver und Wasserglas, die, auf Eternit aufgetragen, in einem Ofen bei einer Temperatur von 300° eingebrannt wird.

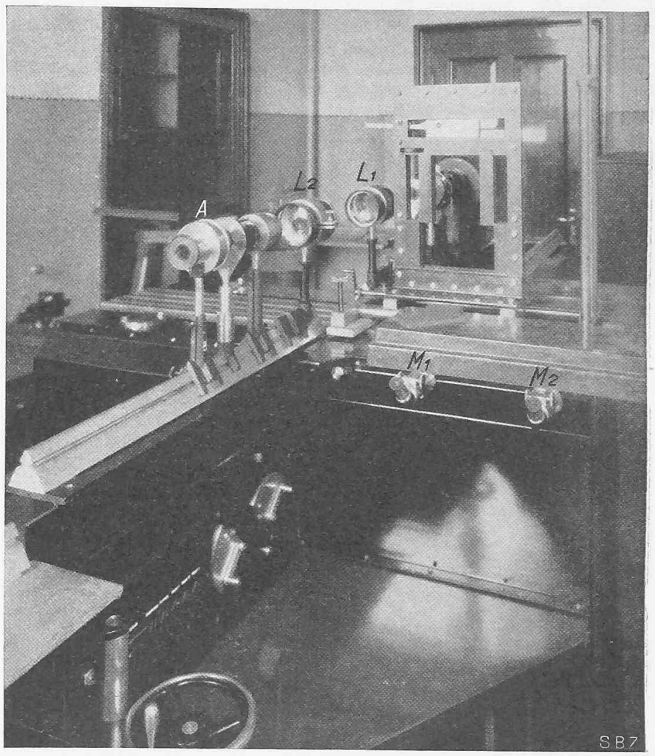


Abb. 3. Ansicht der photoelastischen Messapparatur mit Grundplatte des Interferometers.

Der so vorbereitete Modellrand besitzt nun eine dem elastischen Spannungsverlaufe proportionale elektrische Potentialverteilung. In den Trog T gebracht, der mit einer schwach leitenden Schicht Wasser gefüllt ist, erzeugt er in dieser Schicht ein elektrisches Potentialfeld, das eine Nachbildung des elastischen Feldes von $\sigma_1 + \sigma_2$ darstellt. Nach bekannten Methoden kann nun mit Hülfe einer «Sonde» dieses Potentialfeld abgetastet werden[11]).

Das elektrische Schaltschema zeigt Abb. 5. W ist ein Wechselstromgenerator für 10 bis 15 W Leistung bei etwa 400 Hz. Man bringt zuerst die Sonde Sd der Reihe nach mit den verschiedenen Randpunkten R_1 R_2 R_3 . . . in Kontakt und stellt mit Hülfe der Potentiometer P_1 P_2 P_3 . . . und des Voltmeters V das elektrische Potential an diesen Stellen der Grösse der bekannten elastischen Randspannungen entsprechend ein. Die richtige Abgleichung wird mehrfach überprüft. Nun kann man die Kurven $\sigma_1 + \sigma_2 =$ konst. für vorgeschriebene Werte von $\sigma_1 + \sigma_2$ zeichnen, entweder direkt auf ein Blatt Papier, das in den Trog gelegt wird, oder mit Hülfe des Pantographen P, indem man die Sonde Sd so führt, dass der Kopfhörer H stets stromlos bleibt. Häufig ist es auch zweckmässig, an einzelnen Koordinatenpunkten das Potential zu ermitteln. Dazu bringt man die Sonde an die vorgeschriebene Stelle und reguliert das Voltmeter auf Verschwinden des Stromes im Kopfhörer ein. Das Voltmeter zeigt dann das gesuchte Potential an, das wiederum der Summe der Hauptspannungen proportional ist.

Unsere Methode stellt ein ganz allgemeines experimentelles Verfahren zur Lösung der Potentialgleichung $\Delta \varphi = 0$ im ebenen Falle und bei beliebigen Randbedingungen dar. Es ist der sog.

[11]) Vrgl. *H. Meyer* und *F. Tank*, Helv. Phys. Acta, Bd. 8 (1935) S. 315.

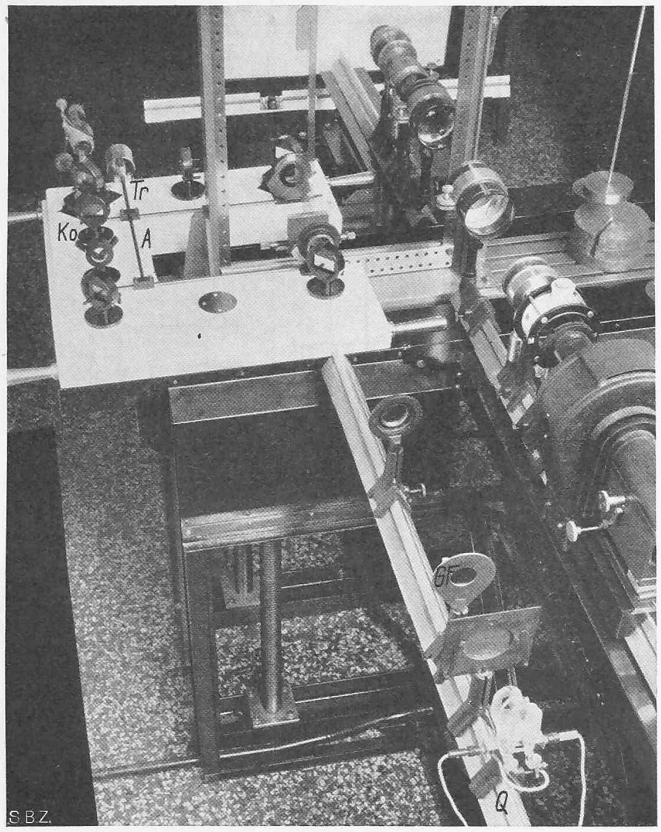


Abb. 6. Optisches Interferometer für photoelastische Messungen.

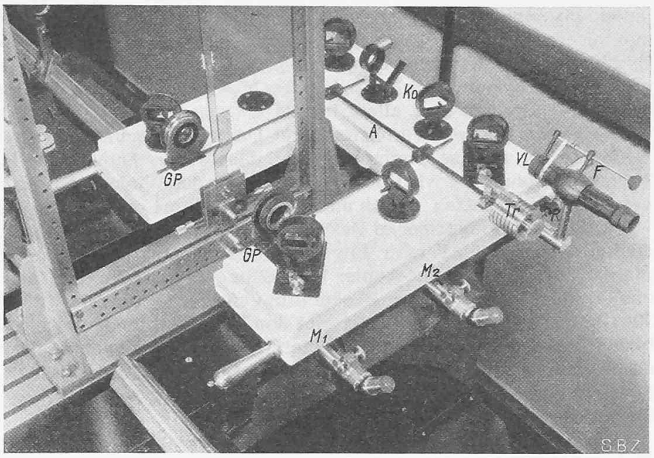


Abb. 7. Optisches Interferometer für photoelastische Messungen.

«Seifenhautmethode» in mehrfacher Hinsicht überlegen. Obschon die räumliche Streuung der elektrischen Feldstärkelinien gewisse Messfehler verursachen kann, so sind diese doch in der Regel von untergeordneter Bedeutung [12]).

4. Unsere optische Apparatur wird dadurch, dass sie auch für interferometrische Messungen verwendbar ist, zu einem photoelastischen Universalgerät. Sie ist so gebaut, dass auf sie ein Vierplatten-Interferometer aufgesetzt werden kann. Zur Messung schiebt man das Modell auf der beweglichen Bühne in den hufeisenförmigen Ausschnitt des Interferometers hinein. In Abb. 3 ist die Bühne mit dem Modell, sowie die Grundplatte des Interferometers sichtbar. Diese Grundplatte ist Träger der wesentlichen Teile der Interferometeroptik, wie der vier Spiegel, des Kompensators, der $\lambda/_2$-Glimmerplatten usw. Der ganze Apparat ist durch einen Kasten gegen Luftströmungen und Staub geschützt. Einzelheiten des Interferometers gehen aus Abb. 6 und Abb. 7 hervor. Als Lichtquelle dient eine Quecksilberdampflampe *Q*, aus der man durch ein Grünfilter *GF* (Abb. 6) monochromatisches Licht herausfiltert, das dann durch einen Polarisator (im Bild nicht sichtbar) mit vertikaler Schwingungsebene polarisiert wird.

[12]) Eine ausführliche Mitteilung über Ergebnisse, die mit dieser Methode bisher erzielt wurden, ist in Vorbereitung.

Das Interferometer stellt in seiner jetzigen Ausführung eine Vergrösserung und Verbesserung des von uns früher verwendeten Instrumentes dar. Die Grundzüge seiner Anwendung setzen wir als bekannt voraus [13]). Die Spiegeldistanz wurde von 28 cm auf 40 cm erhöht, wodurch sich eine Vergrösserung des U-förmigen Ausschnittes ergibt, die entsprechend grössere Belastungsvorrichtungen für die Modelle zulässt. Vor das Objektiv des Beobachtungsfernrohres lässt sich eine Vorsatzlinse *VL* klappen, damit das Fernrohr nach Bedarf auf «unendlich» oder auf die Oberfläche des Modelles eingestellt werden kann. Die zweite Einstellung ist von Bedeutung für das Aufsuchen des bei der Messung jeweils in Frage kommenden Modellpunktes. Der optische Kompensator *Ko*, der zum Auszählen der Streifenverschiebungen dient, wurde mit einer besonders empfindlichen Feinregulierung *R* versehen, da in der Regel ja nur Verschiebungen von ganz wenigen Wellenlängen auszumessen sind. Die Verbindung von *R* und *Ko* wurde unter die Grundplatte verlegt. Vermittelst des Antriebes *A* können die beiden $\lambda/_2$-Platten *GP* aus Glimmer gleichzeitig um gleiche Winkel gedreht werden. Die zugehörige Ablesung geschieht an einer ausserhalb des Kastens befindlichen Trommel *Tr*.

Durch Einbau eines als Analysator dienenden Nicol'schen Prismas im Okular des Beobachtungsfernrohres lässt sich eine erhebliche Erweiterung des Anwendungsbereiches des Interferometers erzielen, indem dann nicht nur die Grössen

$$\delta_1 = e\,(a\,\sigma_1 + b\,\sigma_2) \qquad a,\ b \text{ Materialkonstanten,}$$

und $\delta_2 = e\,(b\,\sigma_1 + a\,\sigma_2)$ e Modelldicke

nach Favre, sondern auch die Hauptspannungsrichtung α und die Grössen

$$\delta_3 = \delta_1 - \delta_2 = e\,(a - b)\ (\sigma_1 - \sigma_2)$$

und $$\delta_4 = \delta_1 + \delta_2 = e\,(a + b)\ (\sigma_1 + \sigma_2)$$

direkt messbar werden [14]).

Zur Ermittlung der Hauptspannungsrichtung α und von $\sigma_1 - \sigma_2$ wird der nicht durch das Modell hindurchtretende zweite Interferometerstrahl abgeblendet und das Nicol-Prisma im Okular zum

[13]) *H. Favre,* Revue d'Optique 8 (1929) S. 193, 241, 289. *J. Müller,* Revue d'Optique 9 (1930) S. 439. *H. Favre,* Revue d'Optique Bd. 11 (1932).

[14]) Vergl. *F. Tank,* Helv. Phys. Acta, Bd. 9 (1936) S. 611.

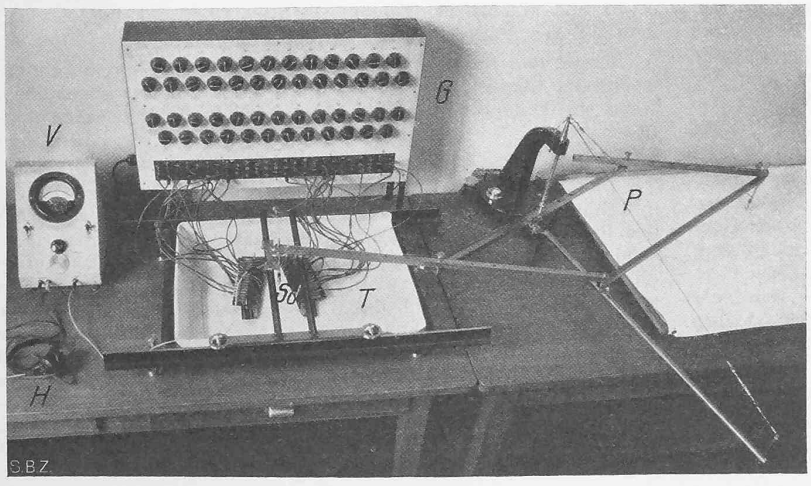


Abb. 4 (links). Der «elektrolytische Trog» mit Voltmeter, Potentiometerkasten und Pantograph.

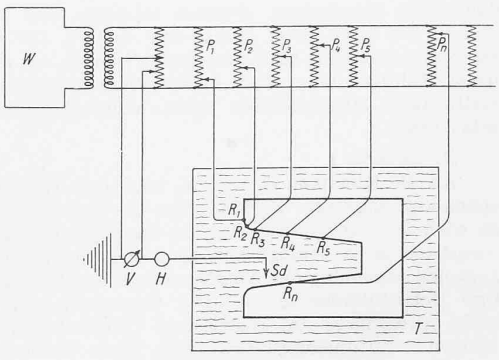


Abb. 5. Elektrisches Schaltschema für die Messung von $\sigma_1 + \sigma_2$.

Polarisator gekreuzt. Man dreht nun die beiden $\lambda/_2$-Platten so lange, bis eine Stellung gefunden ist, bei der das Gesichtsfeld dunkel erscheint. Der doppelte Wert der hierbei an der Trommel *Tr* abgelesenen Winkelstellung entspricht dann der Hauptspannungsrichtung α an dem betreffenden Messpunkte. Nun wird die erste $\lambda/_2$-Platte für sich allein um $22\,^1/_2{}^0$ weitergedreht, während die zweite $\lambda/_2$-Platte bei gleichzeitiger Dazwischenschaltung einer $\lambda/_4$-Platte für sich so eingestellt wird, dass wieder Dunkelheit im Fernrohr beobachtet wird. Aus der Differenz der Winkelstellungen der beiden $\lambda/_2$-Platten ergibt sich dann der Wert von $\sigma_1 - \sigma_2$ [15]).

Zur interferometrischen Bestimmung der Summe der Hauptspannungen verfährt man folgendermassen: Man dreht, indem man die soeben beschriebenen Einstellungen unverändert lässt, das Analysatorprisma im Beobachtungsfernrohr um 90° in die Vertikal-Schwingungsrichtung, gibt den Weg frei für den zweiten, bisher abgeblendeten Interferometerstrahl und beobachtet jetzt das System der Interferenzstreifen bei Belastung und ohne Belastung des Modelles. Die Streifenverschiebung entspricht der Beziehung

$$\delta_4 = \delta_1 + \delta_2 = e\,(a + b)\;(\sigma_1 + \sigma_2)$$

und ist damit ein Mass für die Spannungssumme $\sigma_1 + \sigma_2$.

Es ist bemerkenswert, dass mit dem Interferometer allein die Bestimmung sämtlicher mechanischer Spannungsgrössen des zweidimensionalen Falles auf rein optischem Wege möglich ist, und dass dabei der Betrag der Hauptspannungen σ_1 und σ_2 aus vier unabhängigen Messungen, nämlich der Grössen δ_1, δ_2, δ_3 und δ_4 folgt, weshalb eine entsprechende Kontrolle und Erhöhung der Genauigkeit möglich ist. Die interferometrische Methode wird eine bedeutende Zukunft haben, wenn es gelingt, nicht nur Modelle aus dem teuern und schwer zu bearbeitenden optischen Gussglase zu untersuchen, sondern auch Modelle aus den neueren Glasersatz-Stoffen, wobei nicht nur deren leichtere Bearbeitbarkeit, sondern der höhere Betrag an akzidenteller Doppelbrechung (grössere Streifenverschiebungen) entscheidend ins Gewicht fällt. Gegenüber den flächenhaften Verfahren hat die interferometrische Messung den Nachteil, dass sie als «Punkt für Punkt»-Methode nicht so rasch einen Ueberblick über den gesamten Spannungszustand vermittelt, und dass sie für den Beobachter ermüdend ist, dagegen ist in vielen Fällen ihre besondere Genauigkeit wertvoll.

Die hier beschriebenen Apparaturen dürften unter den zur Zeit bekannten in ihrer Gesamtheit die vollständigste und am vielseitigsten verwendungsfähige Einrichtung zu photoelastischen Messzwecken darstellen. Sämtliche Teile (mit Ausnahme der in der Eidg. Materialprüfungsanstalt von Herrn Kummli ausgeführten Einspannvorrichtungen für die Modelle, vergl. Abb. 1 und 2) wurden in den Werkstätten von E. Schiltknecht, Arterstr. 26, Zürich 7, hergestellt. Für wertvolle Hilfe haben wir auch unsern Mitarbeitern zu danken, nämlich den Herren Dr. H. Meyer, Dr. W. Sigrist, Dr. V. Blom, dipl. ing. E. Egger und dipl. ing. W. Schälchlin. Für die photographischen Aufnahmen sind wir Herrn Breier, E. M. P. A. verpflichtet. Wir erfreuten uns auch des besonderen Interesses, das Herr Prof. Dr. Roš, Direktor der E. M. P. A. dem Fortgang unserer Arbeiten entgegengebracht hat.

Ein elektrischer Stechpegel

Mitteilung aus dem Institut für Hydraulik und hydraulische Maschinen im Masch.-Lab. der E. T. H. (Vorstand: Prof. R. Dubs).

Von ARN. WÄLTI, dipl. El.-Ing., Assistent.

Bei Wassermessungen mittelst Messüberfall wird die Ueberfallhöhe $h_ü$ im allgemeinen durch einen mit Spitzen versehenen Stechpegel bestimmt. Diese Methode ist, besonders bei langandauernden Messungen, ziemlich mühsam und daher leicht ungenau. Sie kann aber durch eine andere, für den Beobachter weniger ermüdende Methode ersetzt werden, am zweckmässigsten unter Zuhilfenahme einer elektrischen Uebertragung. Von den vielfältigen Möglichkeiten seien nachfolgend einige kurz beschrieben.

A. zu Abb. 1.

An die Klemmen K_1 und K_2 wird eine Wechsel- oder Gleichspannung angelegt. Berührt nun die Pegelspitze P das Wasser, so wird der Stromkreis über die Tauchplatte S geschlossen; das Ampèremeter A schlägt aus. Beim Austauchen der Pegelspitze P geht der Ausschlag des Ampèremeters auf Null zurück. Die richtige Ueberfallhöhe $h_ü$ ist dann eingestellt, wenn die Zeitdauer eines Ausschlags am Instrument (Wellenberg) gleich ist derjenigen der Ruhelage (Wellental). Diese Methode bringt bei der Ablesung gewisse Unsicherheiten mit sich, da die Ausschläge am Instrument nicht jedesmal gleich sind. Der Ausschlag ist (bei Gleichstrom!) proportional der Eintauchtiefe, sowie der angelegten Spannung.

[15]) Bezüglich des Beweises vergl. *F. Tank*, l. c.

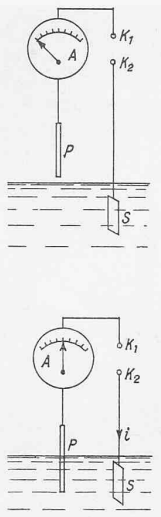


Abb. 1.

Abb. 2. A Ampèremeter, P Pegel, S Tauchplatte, K_1 K_2 Anschlussklemmen.

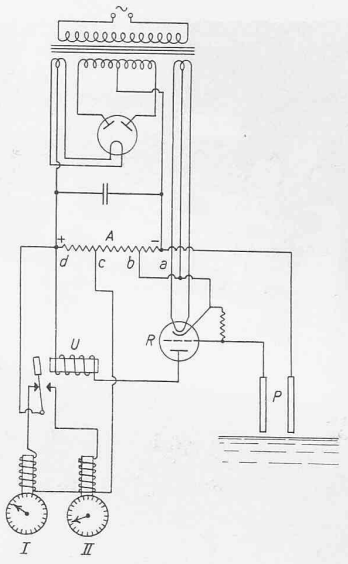


Abb. 3. A Abgriffpotentiometer, R Elektronenröhre (Tisode), P Pegel, U Umschaltrelais, I, II Stoppuhren.

B. zu Abb. 2.

Wieder wird an die Klemmen K_1 und K_2 eine Spannung angelegt, und zwar eine Wechselspannung, um eine Polarisation des Pegels P und der Platte S zu vermeiden. Der Pegel taucht hier dauernd ein; durch das Instrument fliesst dauernd ein Strom, und die Ruhelage des Instrumentes ist hier eine von Null verschiedene eichbare Lage. Steigt oder fällt nun der Wasserspiegel infolge der Wellenbewegung, so nimmt der Widerstand zwischen Pegel P und Platte S ab oder zu; das Instrument schwankt um eine Mittellage. Für den Beobachter ist das Ablesen nicht sehr angenehm, da der Ausschlag des Instrumentes eine quadratische Funktion des Stromes, also der Eintauchtiefe des Pegels P ist. Ausserdem ist der Widerstand zwischen Platte S und Pegel P eine stark variable Funktion der Wassertemperatur (vergl. unter D). Die Mittellage des Instrumentes ist also nicht nur von der angelegten Spannung abhängig, sondern auch von der Wasser-Temperatur.

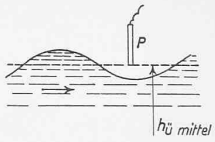


Abb. 4. P Pegel.

Beide vorstehend beschriebenen billigen Methoden sind in ihrem Aufbau etwas primitiv. Die nun folgenden Methoden C und D zeichnen sich durch exaktere Messmöglichkeit aus.

C. zu Abb. 3.

Diese Anordnung arbeitet vollkommen unabhängig von Spannungsschwankungen im Netz, sowie von Widerstandsänderungen des Wassers. Neu ist hier, dass die Zeitdauer der Wellenberge sowie der Wellentäler mittelst zweier elektrisch gesteuerter Stopp-Uhren gemessen wird. Jede Uhr kann mittelst einer Startertaste in Gang gesetzt werden. Durch eine Rückstelltaste können die Zeiger auf Null gebracht werden, ohne dass dabei der Gang gestoppt wird; die Zeiger laufen also sofort weiter. Jede Uhr ist mit einem Elektromagnet versehen. Wenn er Strom erhält, zieht er an und startet den Zeiger; bei Stromlosigkeit lässt er den Anker fallen, und der Zeiger wird gestoppt.

Es ist nun Sache des elektrischen Teils, die Stoppuhren abwechselnd immer dann in Gang zu setzen, bezw. abzustellen, wenn ein Wellenberg zwischen den beiden Pegelspitzen eine elektrisch leitende Verbindung herstellt oder ein Wellental diese Verbindung unterbricht. Dies geschieht folgendermassen:

Das Abgriffpotentiometer A erhält seine Spannung von einem gewöhnlichen Netzanschlussgerät. Die Gleichspannung zwischen den Punkten b und d dieses Potentiometers wird zwischen Kathode und Anode einer gewöhnlichen Triode R gelegt. Solange die Pegelspitzen P nicht eintauchen, fliesst durch den Anodenkreis, und damit durch das Umschaltrelais U ein dauernder Gleichstrom; dessen Anker wird angezogen und damit der Magnet von Stoppuhr II unter Strom gesetzt, ihr Zeiger läuft. Sobald der Pegel eintaucht, erhält das Gitter der Triode R ein stark negatives Potential gegenüber der Kathode. Der Anodenstrom wird gesperrt, Umschaltrelais U lässt seinen Anker los, und damit erhält der Magnet von Stoppuhr I Strom: Stoppuhr I beginnt zu laufen, während der Zeiger von Stoppuhr II still steht.