

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 70 (1952)  
**Heft:** 38

**Artikel:** Die spannungsoptische Untersuchung elastischer Platten  
**Autor:** Kufner, Max  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-59677>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Die spannungsoptische Untersuchung elastischer Platten

Von Dr.-Ing. MAX KUFNER, München

### 1. Einleitung

Die Lösung von Differentialgleichungen, die zur Beschreibung physikalischer Vorgänge angesetzt werden, erfordert oft einen derart grossen Arbeitsaufwand, dass man lieber zum Experiment und insbesondere zum Modellversuch greift. So sind auch auf dem Gebiet der Spannungsuntersuchung von Konstruktionsteilen aller Art neben die theoretischen auch zahlreiche experimentelle Verfahren getreten. Dazu gehört die Spannungsoptik, die wegen ihrer umfassenden Anwendbarkeit grosse Verbreitung gefunden hat. Sie ist wohl das einzige Verfahren, das auch die Untersuchung räumlicher Spannungszustände erlaubt.

Im folgenden wird die im mechanisch-technischen Laboratorium der Technischen Hochschule München geübte Technik des Erstarrungsverfahrens gezeigt (\*). Selbst für das dabei untersuchte einfache Konstruktionselement einer Kreisplatte mit exzentrischem kreisrundem Loch und Einzellast ist keine theoretische Lösung bekannt. Die Spannungsoptik gibt hier Aufschluss über die auftretenden Spannungen. Die daran anschliessenden Untersuchungen an Platten mit starker Durchbiegung sollen zeigen, dass die Spannungsoptik auch zur experimentellen Nachprüfung theoretischer Lösungen und zu ihrer Erweiterung geeignet ist. Zum Schluss werden die in der Spannungsoptik erzielten Fortschritte den noch zu erwartenden gegenübergestellt.

### 2. Verfahren zur spannungsoptischen Untersuchung von Platten

Als Platten sollen flächenförmige Gebilde bezeichnet werden, die in unbelastetem Zustand eine Mittelebene aufweisen und deren Verformung senkrecht zu dieser Mittelebene gerichtet ist. Damit sind auch Stabilitätsprobleme eingeschlossen, bei denen die Richtung der Kräfte in der Mitteloberfläche der Platte liegt. Man kann vier Gruppen von Platten unterscheiden: die Membran, die Platte starker Durchbiegung, die Kirchhoffsche Platte und die dicke Platte.

Die Membran ist eine Platte mit verschwindend kleiner Biegesteifigkeit. Ihre Durchbiegung beträgt ein mehrfaches der Plattendicke. Nur bei der Membran liegt ein ebener Spannungszustand vor, der bei direkter Beobachtung in der spannungsoptischen Apparatur in Richtung senkrecht zur Plattenoberfläche untersucht werden kann. Die Schwierigkeit liegt hier in der geringen Plattenstärke von nur wenigen Millimetern. Bei der Verwendung von Paragummi scheint eine Spannungsmessung möglich zu sein, doch sind uns spannungsoptische Untersuchungen über Membranen nicht bekannt.

Bei den Platten starker Durchbiegung hat der Biegepfeil die Grösse der Plattendicke. Die Durchbiegung ruft wie bei der Membran einen Längs- oder Membranspannungszustand hervor. Dieser wird hier jedoch durch einen Biegespannungszustand überlagert, der sich aus der hier vorhandenen Biegssteifigkeit ergibt. Eine direkte Beobachtung senkrecht zur Plattenoberfläche kann nur über den Membranspannungszustand Aufschluss geben, da eine nach dem Geradliniengesetz verteilte Biegespannung keinen spannungsoptischen

\*) Die beschriebenen Versuche wurden hier durchgeführt. Der Verfasser schuldet dem Vorstand des Laboratoriums, Prof. Ludwig Föppl, für seine wirksame Unterstützung aufrichtigen Dank.

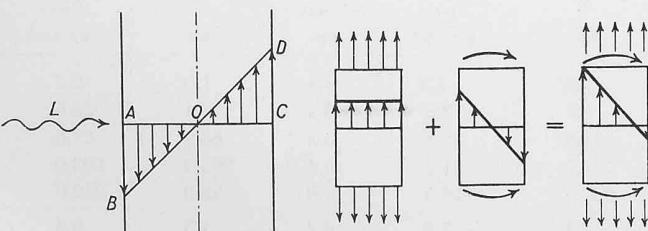


Bild 1. Lineare Verteilung der Biegespannungen nach dem Geradliniengesetz

Bild 2. Ueberlagerung von Zug- und Biegespannungen

Effekt hervorrufen kann. Dies ist leicht einzusehen, da die an einem Punkt eines spannungsoptischen Modells beobachtete Phasenverschiebung die Integration aller von dem Lichtstrahl L (Bild 1) auf seinem Weg durch das Modell berührten Spannungszustände darstellt. Da nun die beiden Dreiecke ABO und CDO flächengleich sind und in gleicher Entfernung von der Plattenmittelebene gleich grosse, aber mit entgegengesetzten Vorzeichen behaftete Spannungen auftreten, hat die gesamte Phasenverschiebung auf der Strecke AC den Betrag null.

Zur Untersuchung dieses aus Membran- und Biegespannung zusammengesetzten Spannungszustandes muss mit dem Erstarrungsverfahren gearbeitet werden, das von Oppel (22) entwickelt und in der angelsächsischen Literatur von Hetenyi (17) beschrieben wurde. Mit seiner Hilfe kann man in ein belastetes Modell die unter den angreifenden Lasten auftretenden Spannungen «einfrieren» lassen. Die eingefrorenen Spannungen und Formänderungen bleiben auch nach Wegnahme der äusseren Lasten im Modell erhalten. Man kann also das Modell aus der Einspann- und Belastungsvorrichtung herausnehmen und die Grösse der elastischen Verformung messen, man kann aber vor allem auch beliebige Stücke herauschneiden und in der spannungsoptischen Apparatur untersuchen. Bei diesen Platten wird man durch Symmetrieschnitt Streifen von 2 bis 4 mm Dicke aus der Platte herauschneiden und in Richtung der Plattenebene durchstrahlen.

Bei den Kirchhoffschen Platten ist der Biegepfeil klein im Verhältnis zur Plattendicke. Die die Membranspannung hervorrufende Dehnung ist dann verschwindend klein, und der Spannungszustand wird durch reine Biegung bestimmt, die bei direkter Beobachtung senkrecht zur Plattenebene keinen spannungsoptischen Effekt hervorruft. Zur spannungsoptischen Untersuchung Kirchhoffscher Platten sind drei verschiedene Verfahren möglich. Beim ersten sendet man den Lichtstrahl senkrecht zur Plattenoberfläche nur durch eine Hälfte der Platte, indem entweder eine das Licht reflektierende Metallfolie in die Mittelebene der Platte eingeklebt (Goodier und Lee [16]) oder eine Platte mit eingefrorenem Spannungszustand längs ihrer Mittelebene aufgeschnitten wird (Kuhn [19]). Das gleiche erreicht man mit einer aus zwei zusammengeklebten Schichten bestehenden Platte. Nur die eine Schicht besteht dabei aus einem optisch sehr aktiven Kunstharz (Dekorit u. ä.), die andere jedoch aus Glas oder Plexiglas, deren spannungsoptischer Effekt um eine ganze Größenordnung kleiner ist. Für den allgemeinen Fall, in dem die zusammengeklebten Teile verschieden dick sind und verschiedenen Elastizitätsmodul aber die gleiche Poissonsche Konstante aufweisen, wurde die Theorie kürzlich von Favre [12] gegeben und am Fall einer quadratischen Platte mit mittiger Einzellast und Auflagerung an drei Punkten erprobt. In ähnlicher Weise geht Hirschfeld [18] vor. Das zweite Verfahren wurde von Drucker [11] beschrieben. Hier wird zunächst in eine Platte ein Zustand einaxiger Zugspannung in Richtung der Plattenebene eingefroren und diesem dann Kirchhoffsche Plattenbiegung überlagert (Bild 2). Die optischen Effekte von Zug- und Druckseite heben einander nun nicht mehr auf. Das dritte Verfahren besteht darin, dass man durch eine Kirchhoffsche Platte mit eingefrorenem Spannungszustand senkrecht zur Plattenebene Schnitte legt und die gewonnenen Streifen in Richtung der Plattenebene untersucht (Poertner [23] und Kuhn [19]).

Bei den dicken Platten wird der Spannungszustand durch Biege- und Querkräfte bestimmt. Für ihre Untersuchung kommt das Erstarrungsverfahren in Frage.

### 3. Kreisplatte mit exzentrischem Loch

Diese Platte wird als Abdeckplatte verwendet, sie ist ringum frei beweglich aufgelagert. Die Abmessungen der 150 mm dicken Original-Platte gehen aus Bild 3 hervor. Im Punkt, der dem Mittelpunkt des Aussendurchmessers am nächsten liegt, greift eine Einzelkraft an. Die spannungsoptische Untersuchung soll Hinweise für das sparsame Be-

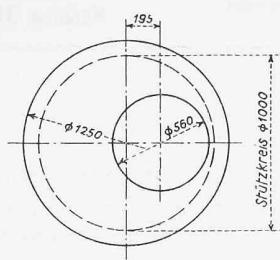


Bild 3. Abdeckplatte, Masse der Hauptausführung

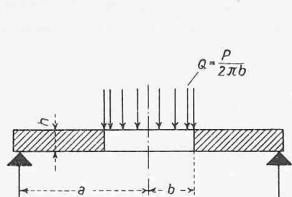


Bild 4. Kreisringplatte mit gleichmässig belastetem Innenrand

messen der Bewehrung der aus Stahlbeton herzustellenden Platten liefern. In der uns bekannten Literatur findet sich keine theoretische Lösung des Problems. Hier gibt die Spannungsoptik mit verhältnismässig kleinem Arbeitsaufwand die nötigen Aufschlüsse.

#### a) Prinzipielles über das Erstarrungsverfahren

Bei der ebenen Spannungsoptik kann man mit ein und selben Modell ganze Versuchsreihen durchführen, wobei nicht nur Grösse und Richtung der äusseren Lasten, sondern auch die geometrische Form des Modells im Laufe des Versuchs verändert werden kann. Eine Abschätzung der auftretenden Verformungen und Spannungen vor dem Versuch erübrigt sich dabei. Beim Erstarrungsversuch kann man dagegen mit jedem Modell nur einen einzigen Versuch durchführen. Stellt sich während eines Erstarrungsversuches heraus, dass etwa die elastische Verformung des Modells zu gross geworden ist, dann kann dies wegen der Eigenart des für Erstarrungsversuche bisher ausschliesslich verwendeten Phenol-Formaldehydharzes nicht mehr rückgängig gemacht werden, obwohl bei sachgemässer Durchführung des Erstarrungsversuchs eine rein elastische Verformung vorliegt. Der Grund liegt darin, dass bei der zur Durchführung des Erstarrungsverfahrens nötigen Temperatur von etwa 80 °C einerseits eine kautschukartige Erweichung des Kunstharzes eintritt, anderseits aber die Vernetzung der einzelnen Moleküle durch Polykondensation rasch voranschreitet. Würde nur die kautschukartige Erweichung eintreten, so könnten die Spannungen und Dehnungen des verformten Modells durch nochmaliges Erhitzen in unbelastetem Zustand wieder rückgängig gemacht werden, worauf das Modell wieder für einen neuen Versuch zur Verfügung stünde. Dies ist z. B. mit Plexiglas möglich. Diesem reversiblen Vorgang ist bei den zum Erstarrungsversuch verwendeten Phenol-Formaldehydharzen jedoch noch der irreversible Vorgang der Polykondensation oder Aushärtung überlagert. Mit fortschreitender Polykondensation nimmt die elastische Dehnung und der spannungsoptische Effekt ab. Das erste ist erwünscht, das zweite nicht. Es gilt, einen günstigen Kompromiss zwischen noch genügend grossem spannungsoptischem Effekt und noch nicht zu grosser Dehnung zu finden. Eingehende Versuche von Mönch ([21] und [14]) haben diese Verhältnisse geklärt, so dass der Modellwerkstoff voll beherrscht und der kleine, für den Erstarrungsversuch günstige Bereich ausgenutzt werden kann. Jede weitere Wärmebehandlung eines bereits einmal benutzten Modells aus diesem Kunstharz be-

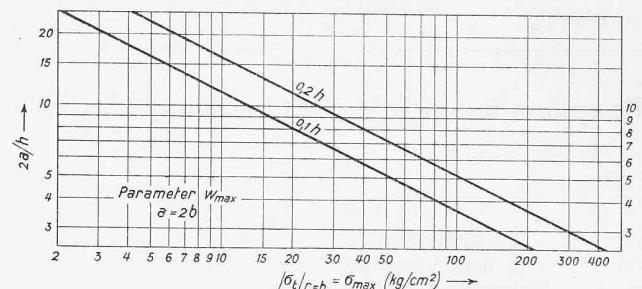


Bild 5. Maximale Spannungen in Kreisringplatten in Abhängigkeit vom Verhältnis a/h

wirkt eine weiter fortschreitende Polykondensation und damit ein Ueberschreiten des optimalen Aushärtungszustandes.

#### b) Abschätzung der Spannungen

Mit Hilfe der von Mönch gegebenen Tabellen kann für das Kunstharz Dekorit mit Sicherheit der der bekannten Wärmebehandlung entsprechende Elastizitätsmodul und spannungsoptische Effekt beim Erstarrungsversuch vorher festgelegt werden. Damit ist eine Abschätzung der zu erwartenden Spannungen und der dazu nötigen äusseren Kräfte möglich.

Der dem vorliegenden Problem ähnliche Fall fand sich bei Roark [7], S. 192. Hier sind für eine Kreisplatte mit konzentrischem kreisrundem Loch und einer am Innenrand gleichmässig verteilten Last (Bild 4) folgende Formeln für die grösste Spannung  $\sigma_{\max}$  und die grösste Durchbiegung  $w_{\max}$  angegeben:

$$\sigma_{\max} = - \frac{3P}{2\pi m h^2} \left[ \frac{2a^2(m+1)}{a^2 - b^2} \ln \frac{a}{b} + (m-1) \right]$$

$$w_{\max} = - \frac{3P(m^2-1)}{4\pi E m^2 h^3} \times$$

$$\times \left[ \frac{(a^2 - b^2)(3m+1)}{m+1} + \frac{4a^2 b^2(m+1)}{(a^2 - b^2)(m-1)} \left( \ln \frac{a}{b} \right)^2 \right]$$

Diese Höchstwerte treten am Innenrand der Platte auf. Auch in unserem Fall dürfte die Tangentialspannung am Innenrand und zwar an der Stelle der Lasteintragung die grösste Spannung sein. Tabelle 1 und Bild 5 geben mit Hilfe vorstehender Formeln gerechnete Werte für  $w_{\max}$  und  $\sigma_{\max}$ , wobei  $m = 2$  und  $E = 1350 \text{ kg/cm}^2$  eingesetzt wurden.

Mit abnehmenden Werten  $a/h$  wird das Gebiet der Kirchhoffschen Plattenbiegung mehr und mehr verlassen, und die Querkräfte nehmen immer grösseren Einfluss auf den Spannungsverlauf. Daher werden in Wirklichkeit mit abnehmenden Werten für  $a/h$  immer grössere Abweichungen von den obigen Zahlenangaben auftreten. Zur Bemessung des spannungsoptischen Modells und der aufzubringenden Last sind Tabelle 1 und Bild 5 jedoch brauchbar. Mit ihrer Hilfe kann nun festgelegt werden, bei welchen Abmessungen und mit welcher Last der grösstmögliche Wert für  $\sigma_{\max}$  zu erwarten ist. Im Interesse der Versuchsgenauigkeit ist eine grosse Zahl von Isochromaten erwünscht, da sich dann eine punktweise Auswertung durch Kompensation erübrigt. Ferner war durch die vorhandene Belastungsvorrichtung (Bild 7) die Grösse der Last auf 50 kg begrenzt. Unter diesen Umständen ist nach

Tabelle 1. Maximale Spannungen und Durchbiegungen bei Kreisringplatten nach Bild 4

2a cm	2b cm	h cm	2a/h	$\sigma_{\max}/P$ 1/cm²	$w_{\max}/P$ cm/kg	für $w_{\max} = 0,1 h$ wird			für $w_{\max} = 0,2 h$ wird		
						$w_{\max}$ cm	P kg	$\sigma_{\max}$ kg/cm²	$w_{\max}$ cm	P kg	$\sigma_{\max}$ kg/cm²
10	5	0,5	20	6,252	0,09728	0,05	0,5	3,2	0,1	1,0	6,4
		1,0	10	1,563	0,01216	0,1	8,2	12,8	0,2	16,4	25,6
		1,5	6,7	0,693	0,00361	0,15	41,6	28,8	0,3	83,2	57,6
		2,0	5	0,391	0,00152	0,2	131,6	51,5	0,4	263,2	103,0
		3,0	3,3	0,174	0,00045	0,3	667,5	116,0	0,6	1335,0	232,0
20	10	1,0	20	1,563	0,04875	0,1	2,1	3,3	0,2	4,2	6,6
		2,0	10	0,391	0,00609	0,2	32,8	12,8	0,4	65,6	25,6
		3,0	6,7	0,174	0,00181	0,3	166,2	28,9	0,6	332,4	57,8
		4,0	5	0,098	0,00076	0,4	527	51,7	0,8	1054	103,4

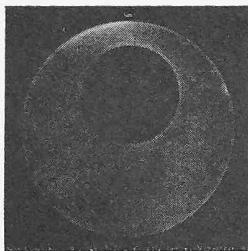


Bild 6. Unbelastetes Modell der Abdeckplatte in zirkular polarisiertem Licht

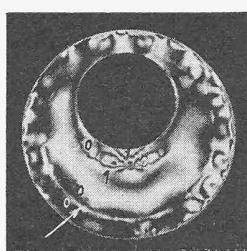


Bild 8. Unzerschnittenes Modell nach dem Erstarrungsversuch

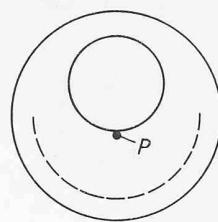


Bild 9. Linie der Krafteinleitung in das Auflager (gestrichelt gezeichnet)

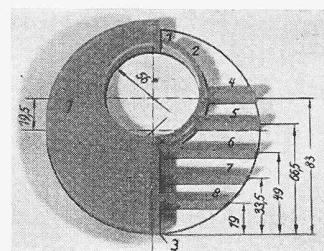


Bild 10. Lage der einzelnen Streifen

Tabelle 1 bei einer Durchbiegung  $w_{\max} = 0,1 h$  die grösste Spannung bei einer Platte von 10 cm Aussendurchmesser und 1,5 cm Dicke zu erwarten.

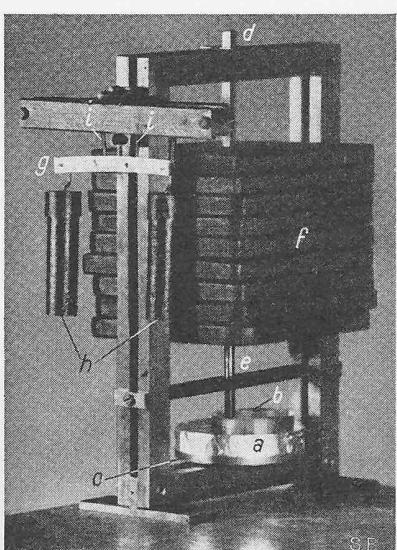
Da aber tatsächlich im Versuch am Lochrand eine Einzelmast angreift, ist bei sonst gleichen Bedingungen an der Stelle der Lasteintragung ein gröserer Biegepfeil zu erwarten, der das ertragbare Mass leicht übersteigen könnte. Daraus wurde eine Plattendicke von 2 cm gewählt<sup>1)</sup>.

#### c) Versuchsdurchführung

Das Modell, dessen Abmessungen aus Bild 13c hervorgehen, wurde aus einer Dekoritplatte hergestellt, die einer 5,5stündigen Härtung bei 115 °C unterzogen wurde. Die Aufnahme der Platte vor dem Versuch in polarisiertem Licht zeigt mit Ausnahme kleiner Aufhellungen an den Rändern Dunkelheit, ein Beweis für die Freiheit von Eigenspannungen (Bild 6). Die Belastungsvorrichtung zeigt Bild 7. Beim Erstarrungsversuch ist die Verwendung von Gewichtsbelastung den beim ebenen Versuch bequemeren Ringkraftmessern vorzuziehen. Der Grund liegt in den grösseren Formänderungen, durch die die federnden Kraftmessern während des Versuchs immer wieder entlastet werden. Zum Nachstellen ist ein öfters Oeffnen des Wärmedofens während des Erstarrungsversuches unvermeidlich. Diese Schwierigkeit wird bei einer Gewichtsbelastung vermieden. Ihre Anwendung ist jedoch durch die Grösse des vorhandenen Wärmedofens beschränkt, da ja die gesamte Belastungsvorrichtung in ihm Platz finden muss. Bei solchen Versuchen, bei denen mehrere Lasten in verschiedenen Richtungen angreifen, wird man daher trotz der genannten Unbequemlichkeit auf Kraftmesser zurückgreifen. Bild 7 zeigt im einzelnen das in eine Aluminiumfolie eingehüllte Modell a<sup>2)</sup>.

Als Auflager dient der Stahlring c. Die Last wird durch einen bei d und e in vertikaler Richtung frei verschiebbar gelagerten Stempel unter Zwischenschaltung eines Ringes b

Bild 7. Belastungsvorrichtung für die Kreisplatte. Buchstabenerläuterung im Text



1) In dem zweibändigen Werk von Frocht [15] und dem von Föppl und Mönch [14] hat die spannungsoptische Konstante die Dimension (kg/cm<sup>2</sup>/Ordnung).cm. Sie gibt den Wert für  $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$  (Frocht) bzw.  $\sigma_1 - \sigma_2$  (Föppl, Mönch) in kg/cm<sup>2</sup> für ein 1 cm dicken Modell an, der dem Übergang von einer Isochromatenordnung zur anderen entspricht, wenn Eich- und Modellversuch bei monochromatischem Licht der selben Wellenlänge gemacht werden. Die spannungsoptische Konstante c setzt dagegen die Messung der Phasenverschiebung in Längeneinheiten voraus. Sie ist mit S durch die Gleichung  $S = c/\lambda$  verbunden, wenn  $\lambda$  die Wellenlänge des verwendeten monochromatischen Lichtes ist.

2) Die gesamte Wärmebehandlung von Dekorit wird unter einer Schutzhülle aus Oel und Aluminiumfolie durchgeführt. Sie umfasst sowohl das Härteten des Materials zum Verbessern der elastischen Eigenschaften und zum Abbau von Eigenspannungen als auch den Erstarrungsversuch. Wegen weiteren Einzelheiten sei auf das Buch von Föppl und Mönch ([14]) oder ([21]) hingewiesen.

aus Kunstharz eingeleitet. Sie besteht hier aus neun Platten f von je 5 kg Gewicht und dem Eigengewicht des Stempels mit Auflageträger von 0,7 kg, insgesamt 45,7 kg. Ferner ist an der Belastungsvorrichtung eine Traverse befestigt, an der mittels zweier Haken i der Eichstab g aufgehängt ist. Zwei gleich grosse Gewichte h erzeugen im mittleren Teil des Eichstabes ein konstantes Biegemoment. Bild 7 zeigt den bereits verformten Eichstab nach Beendigung des Erstarrungsversuches. Dieser wurde hier z. B. bei 85 °C durchgeführt. Dazu wurden Modell und Eichstab zunächst unbelastet im Ofen auf diese Temperatur aufgeheizt und dann belastet. Nachdem diese Temperatur zwei Stunden konstant gehalten worden war, wurde unter der Last langsam abgekühlt. Nach erfolgter Abkühlung war der Erstarrungsversuch beendet, die bei 85 °C in Modell und Eichstab vorhandenen Spannungen waren eingefroren und verschwanden auch nach der Wegnahme der Last nicht mehr.

#### d) Auswertung des Versuchs

Der Biegepfeil betrug 0,7 mm. Bild 8 zeigt das Isochromatbild des unzerschnittenen Modells. Die Stellen der Platte, an denen sie auf der Unterlage tatsächlich auflag, heben sich deutlich ab. Es ist dies die kreisförmige, an einer Stelle durch den Pfeil gekennzeichnete Aufhellung. Demnach hat die Platte nur längs der in Bild 9 gestrichelt gezeichneten Linie getragen. Diese Erkenntnis führt zu dem anschliessend durchgeführten Versuch mit einer Halbkreisplatte. Ferner ergibt sich aus Bild 8 gemäss den unter 2. gemachten Ausführungen, dass der Fall der Kirchhoffschen Plattenbiegung nirgends rein verwirklicht ist.

Sodann wurden aus der Platte acht Streifen herausgeschnitten (Bild 10) und in Richtung der Plattenebene durchleuchtet. In den Streifen 1, 2 und 3 liegen ebene Spannungszustände vor, da Streifen 1 und 3 Symmetrieschnitte sind, während Streifen 2 einer lastfreien Oberfläche entnommen ist. In den Streifen 4 bis 8 liegt dagegen kein ebener Spannungszustand vor. Deshalb wurde bei diesen Streifen jeweils nur die Stelle, die an den Symmetrieschnitt unmittelbar anschliesst, zur Ermittlung der Tangentialspannung  $\sigma_t$  herangezogen. Nur die Streifen 2, 3, 6, 7 und 8 wiesen nennenswerte Spannungen auf; sie sind in den Bildern 11 a bis e wiedergegeben. Die Zahl der beobachteten Isochromaten war in allen Streifen sehr gering, wie nach der Abschätzung der Spannungen bereits zu erwarten war. Sie wurde hier durch Anwendung des Reflexverfahrens verdoppelt, bei dem der polarisierte Lichtstrahl nach dem Passieren des Streifens an einer Aluminiumfolie reflektiert wird und den Streifen ein zweites Mal durchläuft. Hier stellen die Linien der grössten Aufhellung Isochromaten mit ganzzahliger Ordnung 0, 1, 2 usf. dar, während sie beim üblichen Durchstrahlungsverfahren dunkel sind. Beim Reflexverfahren ist eine geringere Deutlichkeit der photographischen Aufnahmen nicht zu vermeiden, die Aufnahmen 11 a bis e genügen aber im Verein mit den bei direkter Beobachtung gemachten Aufzeichnungen vollauf zur Auswertung.

**Streifen 2:** Der halbkreisförmige Streifen (Bild 10) wurde durch senkrechte Schnitte noch weiter unterteilt, so dass er zur Aufnahme praktisch in eine Ebene abgewickelt werden konnte. Die auf Bild 11 a senkrecht verlaufenden dunklen Linien sind Schnittkanten. Die Stelle der Lasteintragung befindet sich über der linken oberen Ecke des Streifens. Der Streifen diente zur Ermittlung des Verlaufs der Spannung  $\sigma_t$  am Lochrand (Bilder 13 i und k).

**Streifen 3:** Das Isochromatenbild 11 b ist typisch für die Stelle des Angriffs einer Einzellast. Infolge der Durch-

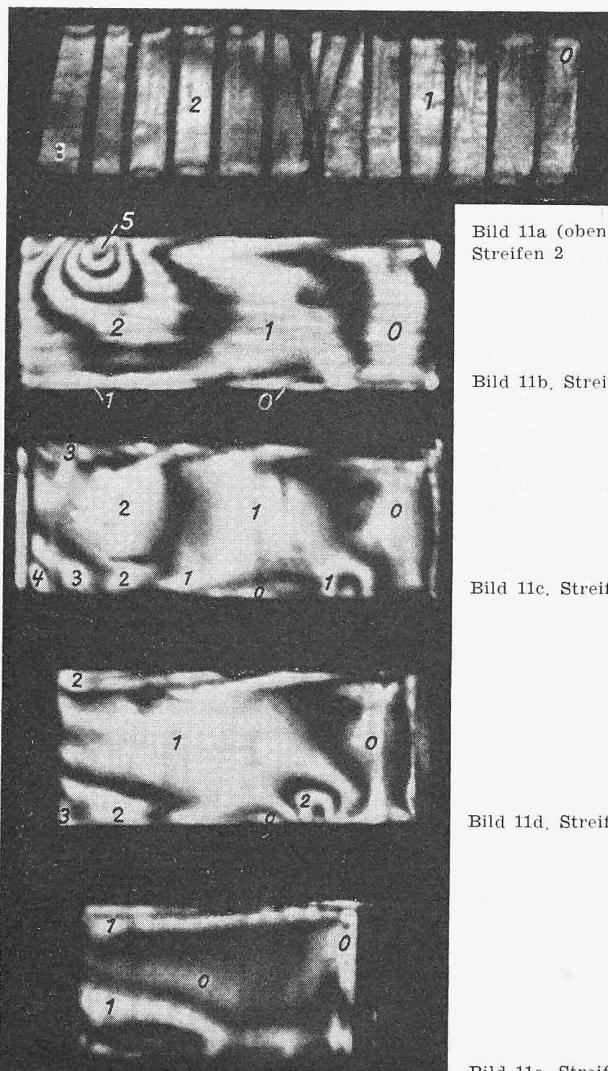


Bild 11. Verschiedene Streifen in zirkular polarisiertem Licht (Reflexaufnahmen)

biegung der Platte hat der zur Krafteinleitung verwendete Dekorirring nur an der Aussenkante getragen, wie in Bild 12 unter starker Ueberhöhung der Durchbiegung angedeutet ist. Der Streifen diente zur Ermittlung des Verlaufs von  $\sigma_r$  im Schnitt A—B (Bild 13 c).

**Streifen 6—8:** Das linke Ende dieser Streifen schliesst direkt an den Symmetrieschnitt 3 an, weshalb an dieser Stelle noch mit genügender Genauigkeit ein ebener Spannungszustand vorausgesetzt werden darf. Diese Streifen dienten zur Ermittlung des Verlaufs von  $\sigma_t$  im Schnitt A—B. Die Ergebnisse sind in Bild 13 zusammengefasst und mit den Spannungen in einer Halbkreisplatte verglichen, deren Untersuchung anschliessend geschildert wird. Die Spannungen in der Halbkreisplatte sind dabei gestrichelt gezeichnet.

#### e) Untersuchung einer Halbkreisplatte

Da bei der untersuchten Kreisplatte fast nur in der einen Plattenhälfte Auflagerkräfte übertragen wurden, liegt es nahe, die wenig beanspruchte Hälfte einfach wegzulassen. Dies führt auf den Fall einer in der Mitte des Durchmessers durch eine Einzelkraft belasteten, längs des Halbkreisbogens frei aufgelagerten Halbkreisplatte.

Der Erstarrungsversuch wurde hier in der bereits beschriebenen Weise durchgeführt; die Last betrug diesmal 30,7 kg, der nach Beendigung des Versuchs gemessene Biegepfeil 2,5 mm. Zum Vergleich der in diesem Versuch ermittelten Spannungen mit denen der Kreisplatte müssen unter Zugrundelelung des

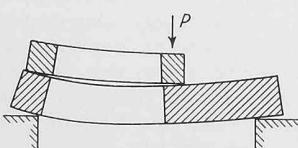


Bild 12. Elastische Verformung der Abdeckplatte

Bild 11a (oben). Streifen 2

Bild 11b. Streifen 3

Bild 11c. Streifen 6

Bild 11d. Streifen 7

Bild 11e. Streifen 8

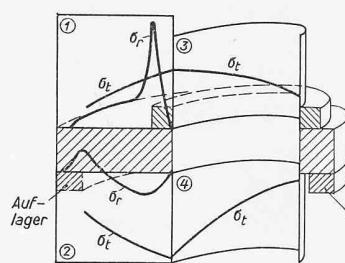


Bild 13a. Spannungsverlauf bei Platte 1

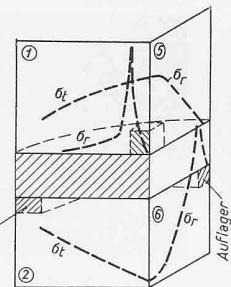


Bild 13b. Spannungsverlauf bei Platte 2

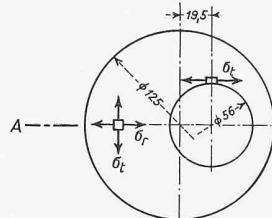


Bild 13c. Abmessungen der Platte 1

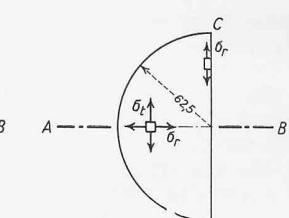


Bild 13d. Abmessungen der Platte 2

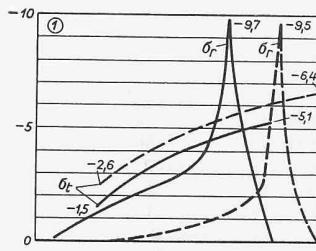


Bild 13e. Verlauf von  $\sigma_r$  und  $\sigma_t$  im Schnitt AB bei den Platten 1 und 2 (Seite oben)

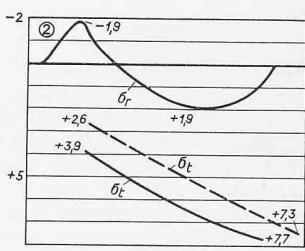


Bild 13f. Verlauf von  $\sigma_r$  und  $\sigma_t$  im Schnitt AB bei den Platten 1 und 2 (Seite unten)

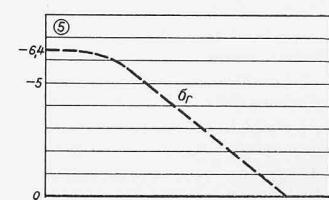


Bild 13g. Verlauf von  $\sigma_r$  längs C—D bei Platte 2

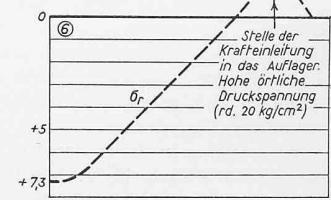


Bild 13h. Verlauf von  $\sigma_r$  längs C—D bei Platte 2

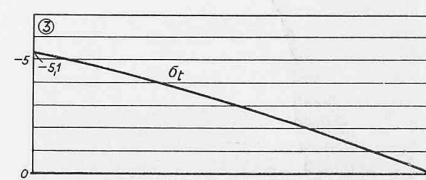


Bild 13i. Verlauf von  $\sigma_t$  am abgewickelten Lochrand der Platte 1 (obere Seite)

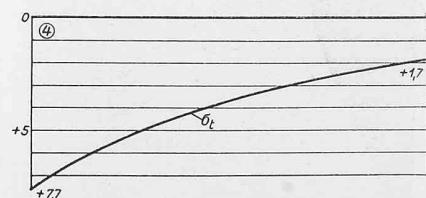


Bild 13j. Verlauf von  $\sigma_t$  am abgewickelten Lochrand der Platte 1 (untere Seite)

Hookschen Gesetzes die verschiedenen Elastizitätsmoduli und Dehnungen berücksichtigt werden. Im folgenden bezeichnet der Index K Grössen der Kreisplatte, der Index H solche der Halbkreisplatte. Aus

$$\sigma_K = E_K \varepsilon_K, \quad \sigma_H = E_H \varepsilon_H \quad \text{folgt}$$

$$\sigma_K = \frac{E_K \varepsilon_K}{E_H \varepsilon_H} \sigma_H$$

Als Mass der Dehnungen verwenden wir die gemessenen Biegepfeile; der Elastizitätsmodul wird aus den Durchbie-

gungen der im Erstarrungsversuch elastisch verformten Eichstäbe bestimmt. Durch Einsetzen dieser Werte in die Gleichung für  $\sigma_K$  erhalten wir

$$\sigma_K = \frac{1450 \cdot 0,7}{2460 \cdot 2,5} \sigma_H = 0,165 \sigma_H$$

In einer Halbkreisplatte wären also bei einem  $E$ -Modul von 1450 kg/cm<sup>2</sup> der Kreisplatte und einem Biegepfeil von 0,7 mm  $1/0,165 = 6,06$  mal kleinere Spannungen als bei der untersuchten Platte aufgetreten. Bild 13 enthält bereits die umgerechneten Spannungen.

Dekorit hat im Erstarrungsversuch eine Querdehnungszahl  $\mu = 0,5$ . Um eine Abschätzung des Einflusses der Querdehnungszahl auf die Werte  $w_0/h$  und  $\sigma_{\max} \cdot a^2/E h^2$  zu ermöglichen, wurde der theoretisch gelöste Fall der Kreisringplatte für gleiches Verhältnis  $a/b$  und  $\mu = 0,5, 0,3$  und 0 gerechnet und in Tabelle 2 eingetragen. Für  $\mu = 0$  kann mit einem um 10 % kleineren Wert  $\sigma_{\max} a^2/E h^2$  für die beiden Fälle der Kreisplatte mit exzentrischem Loch und der Halbkreisplatte gerechnet werden. Die Abschätzung für die Halbkreisplatte entstammt einer Arbeit von Kuhn [5]. Die Konstanten in Tabelle 2 wurden mit den angeführten Formeln aus Roark beziehungsweise aus den experimentell bestimmten maximalen Spannungen aus Bild 13 f gerechnet. Die im Versuch erreichten Werte von  $E$  betrugen 1450 (Kreisplatte) bzw. 2460 kg/cm<sup>2</sup> (Halbkreisplatte);  $h$  war in beiden Fällen 2 cm,

Tabelle 2. Biegepfeil und maximale Spannungen für  $a/b = 1,8$ 

$\mu$	0,5	0,3	0	0,5	0,5	$\times \frac{Pa^2}{Eh^4}$
	$\frac{w_0}{h} =$	0,621	0,630	0,643	0,712	
$\frac{\sigma_{\max} a^2}{Eh^2} =$	2,345	2,210	2,010	0,947	0,898	$\times \frac{w_0}{h}$
	1,457	1,390	1,290	0,674	5,76	$\times \frac{Pa^2}{Eh^4}$
Quelle	Roark, Formulas for Stress and Strain, New York and London 1943					spannungsoptisch ermittelt mit $2a/h = 5$

$a$  ist der Radius des Stützkreises = 5 cm (s. auch Bild 13 a und b).

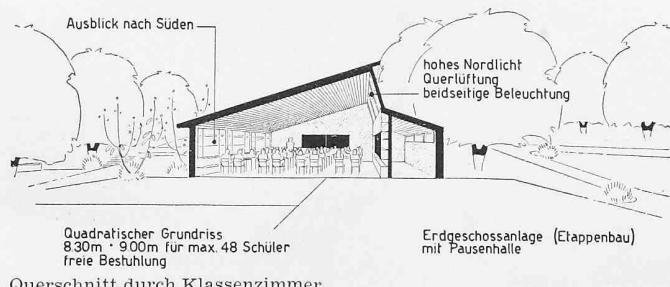
Die Spannungen im Rohrboden eines Wärmeaustauschers sind in einem Aufsatz von Föppl [13] mitgeteilt. Dieses sehr komplizierte Konstruktionselement kann nur an einem spannungsoptischen Modell untersucht werden. Schluss folgt

## Schulhausanlage in Uelikon/Stäfa

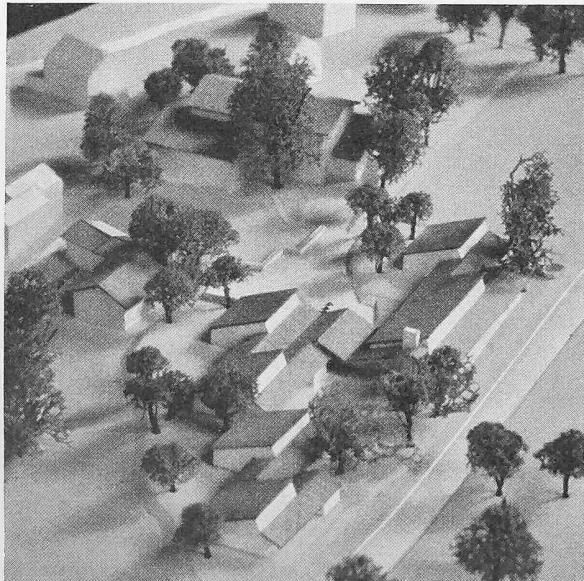
Architekt WALTER CUSTER, Zürich

Wir haben in Nr. 34, 69. Jg., 1951, S. 477 \*, den ersten Preis des Wettbewerbes für ein Quartierschulhaus in Stäfa

DK 727.1 (494.34)



Querschnitt durch Klassenzimmer



Modellansicht aus Nordosten

veröffentlicht. Das Projekt fand in der Fachwelt allgemeine Anerkennung, weil es neue Wege für den Bau von Kleinschulhäusern aufdeckte. Der Architekt arbeitete in der Folge ein Vorprojekt aus, das der Gemeinde vorgelegt worden ist. Diese sollte über den Kredit für die definitive Projektierung und den Kostenvoranschlag entscheiden. Trotzdem die Schulpflege das Projekt befürwortet hatte, lehnte es die Gemeindeversammlung mehrheitlich ab. Es liegt uns fern, die Gründe zu untersuchen, weshalb die Bürgerschaft zu diesem ablehnenden Entschluss kam. Vermutlich wollte sie nicht eigene, unerforschte Wege beschreiten, sondern die bewährten Vorbilder anderer Gemeinden befolgen. Ein wichtiges Argument gegen das Projekt eines Quartierschulhauses mit verhältnismässig wenig Schulzimmern sei die Landverschwendug; man müsse den kostbaren Boden besser verwenden und ausnutzen. Dieser Forderung darf man sich nicht verschliessen, doch sollte man sie nicht in erster Linie für Schulhausbauten aufstellen. Im Gegenteil, diese müssten in den gut genutzten und dichtbewohnten Siedlungsgebieten die Freiflächen sicherstellen. Der Entschluss der Gemeinde ist nicht ganz verständlich.

## Wettbewerb für ein Primarschulhaus in Hergiswil, Nidwalden

DK 727.1 (494.12)

Der heute von uns veröffentlichte Wettbewerb für ein Primarschulhaus in Hergiswil zeigt im erstprämierten Entwurf eine Lösung, die ebenfalls von der üblichen Norm abweicht. Dieser Entwurf wird ohne wesentliche Abänderungen bereits ausgeführt. Wir dürfen der Gemeinde Hergiswil und den Projektverfassern dazu gratulieren, dass sie den Versuch zu einer neuen Lösung wagen.

### Aus dem Raumprogramm

Es waren folgende Bauten zu entwerfen:

#### Schulhausneubauten

6 Klassenzimmer für je 44 Schüler, rd. 66 m<sup>2</sup>, 1 Mädchenhandarbeitszimmer für 24 Schülerinnen, rd. 66 m<sup>2</sup>, Singraum mit Projektionseinrichtung, abschliessbarem Altarplatz