

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

*Wissenschaftlicher Film C 785/1958*

Aus der Forschungsstelle Spannungsoptik  
am Mechanisch-technischen Laboratorium der  
Technischen Hochschule München  
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. E. MÖNCH)

**Räumliche Spannungsoptik (Einfrierverfahren)**

Von  
Prof. Dr.-Ing. E. MÖNCH

Mit 2 Abbildungen

GÖTTINGEN 1959

Aus der Forschungsstelle Spannungsoptik  
am Mechanisch-technischen Laboratorium der Techn. Hochschule München  
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. E. MÖNCH)

## Räumliche Spannungsoptik (Einfrierverfahren)

Von Prof. Dr.-Ing. E. MÖNCH

Ein früherer Film [2]<sup>1)</sup> zeigte die Spannungsbestimmung in zweidimensionalen Feldern (ebene Spannungsoptik). Der vorliegende Film erläutert die Auswertung räumlicher Modelle. Ein einfaches Anwendungsbeispiel — Welle mit Flansch — wird vollständig behandelt, vom Gießen des Modells bis zum zahlenmäßigen Ergebnis. Von zwei weiteren Beispielen — Schrägverzahnung und Rohrverzweigung — zeigt der Film das Wesentliche.

### I. Allgemeine Vorbemerkungen

Die Spannungsoptik [1] beschäftigt sich damit, Festigkeitsaufgaben, die rechnerisch nicht oder nur schwer zu behandeln sind, durch Modellversuche zu lösen. Zur Untersuchung zweidimensionaler Spannungszustände dient die ebene Spannungsoptik [2]. Hierbei wird ein aus einer Kunststoffplatte von etwa 1 cm Stärke herausgeschnittenes Modell belastet und im Polariskop unter Verwendung monochromatischen Lichts beobachtet. Es zeigen sich dann im Modell Interferenzlinien, die sogenannten Isochromaten. Diese sind Linien konstanter Hauptspannungsdifferenz. Die Ordnung  $\delta$  der Isochromaten, die von der Nullisochromate aus abgezählt wird, ist nämlich der Differenz der beiden Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  proportional:

$$\delta = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d/S \quad (1)$$

$d$ : Modelldicke,  $S$ : spannungsoptische Konstante

Damit ist im ganzen Feld ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) und am lastfreien Rand, wo  $\sigma_1$  oder  $\sigma_2$  verschwindet, die Spannung selbst bekannt.

Diese einfache Arbeitsweise ist bei dreidimensionalen, also räumlichen Spannungszuständen nicht möglich. Denn ein polarisierter Lichtstrahl, der das ganze Modell durchdringt, trafe auf seinem Weg von Stelle zu Stelle auf verschiedene Spannungszustände, deren Einzelwirkungen aus

<sup>1)</sup> Siehe Literaturverzeichnis am Ende des Textes.

dem allein beobachtbaren Gesamteffekt nicht zu ermitteln wären. Man kann jedoch einen räumlichen Spannungszustand der polarisationsoptischen Untersuchung zugänglich machen, indem man ihn „einfriert“. Bei diesem Verfahren wird ein Kunststoffmodell bei höherer Temperatur belastet und sodann unter Aufrechterhaltung der Belastung langsam abgekühlt. Wenn das ganze Modell wieder Raumtemperatur erreicht hat, können die Lasten weggenommen werden, ohne daß die Verformungen wieder zurückgehen. Sie sind gewissermaßen eingefroren. Mit den Verformungen friert auch der optische Effekt ein. Die Modelle werden dann zerschnitten und im Polariskop untersucht. So wird jede gewünschte Stelle der optischen Auswertung zugänglich.

Für das Einfrierverfahren eignen sich am besten gewisse sogenannte vernetzte Kunststoffe, z. B. Araldit. Erwärmt man ein solches Material, dann löst sich mit zunehmender Temperaturerhöhung ein großer Teil der zwischen den Molekülen vorhandenen Bindungen, bis schließlich von einer bestimmten Temperatur an nur mehr ein Netz makromolekularer Bindungen übrig bleibt, das stabil ist, sich also auch bei noch weiterer Temperaturerhöhung nicht mehr weiter abbaut. Diesen für sich stabilen Temperaturbereich nennt man „Hochelastizität“. Das Material ist in diesem Zustand großer Verformungen fähig, ähnlich wie Gummi, und hat auch wie dieser einen niedrigen Elastizitätsmodul; er beträgt z. B. bei Araldit etwa  $200 \text{ kg/cm}^2$ . Wieder auf Raumtemperatur abgekühlt, gewinnt das Material seinen normalen Elastizitätsmodul von etwa  $30000 \text{ kg/cm}^2$  zurück, indem die vorher gelösten Bindungen wieder wirksam werden. Diese Bindungen sind es auch, die einen bei der erhöhten Temperatur aufgebrauchten Verformungszustand bei der Abkühlung festhalten. Sie bewirken das „Einfrieren“.

Die im Bereich der Hochelastizität aufgebrauchten Spannungszustände sind — wenn auch ziemlich große Verformungen auftreten — elastisch im Sinne des Hookeschen Gesetzes und können daher, eingefroren, dazu dienen, modellmäßig räumliche Spannungszustände quantitativ auszumessen.

Der Film zeigt die Durchführung des Einfrierverfahrens bei Verwendung des warmhärtenden Äthoxilin-Gießharzes „Araldit B“ (Hersteller: CIBA AG, Basel) als Modellwerkstoff. Ein solcher Versuch geht wie folgt vor sich:

*Herstellung des Modells.* Die Modelle werden in Metallformen gegossen, die zwecks Vermeidung des Anklebens mit einem Silikon-Trennmittel eingefettet sind. Zum Guß schmilzt man zunächst das in Brocken angelieferte monomere Rohmaterial im Heizschrank bei  $150$  bis  $160^\circ \text{C}$ . Hierauf wird in die Schmelze der pulverförmige Härter eingerührt. Dieser bewirkt die Polymerisation, das ist die Ausbildung des erwähnten makromolekularen Netzes. Das Einrühren kann außerhalb des Ofens vorgenommen werden, weil die Polymerisation exotherm vor sich geht. (Nur bei kleinen vergossenen Mengen muß die Schmelze zeitweilig wieder in den Ofen gestellt werden, damit sie sich nicht zu stark abkühlt.) Nach spätestens einer Stunde muß der Härter gelöst sein, da dann infolge der

Polymerisation die Schmelze zu gelieren beginnt. Nun wird die Schmelze, die nach dem Einrühren eine Temperatur von 100 bis 110° C besitzt, in die auf 100° C vorgewärmte Form gegossen. Hierauf wird auspolymerisiert, z. B. 20 Stunden lang bei 100° C. Dadurch wird die Schmelze zu einem festen Körper und das Stück kann jetzt, noch warm, ausgeformt werden. Der ausgeformte Gußrohling wird wieder in den Ofen gestellt, zunächst einige Stunden bei 150° C getempert und hierauf — damit keine Temperaturspannungen entstehen — langsam abgekühlt.

An dem gegossenen Stück ist schließlich im allgemeinen noch eine Nachbearbeitung auf genaues Maß durch Drehen, Fräsen, Hobeln, Feilen usw. erforderlich, es sei denn, daß das Modell durch eine maßhaltig hergestellte Gießform bereits beim Gießen seine endgültige Gestalt erhalten hat (siehe Beispiel 3, Rohrverzweigung).

*Belasten des Modells und Einfrieren des Spannungszustandes.* Hierzu wird das Modell zunächst samt seiner Belastungsvorrichtung im Heizschrank auf 150° C erwärmt und so in den hochelastischen Zustand versetzt. Hierauf werden die Lasten aufgebracht und dann wiederum langsam abgekühlt, damit nur der durch die Lasten aufgebrachte Spannungszustand einfriert, nicht aber zusätzlich Temperaturspannungen, die bei schneller Abkühlung entstehen würden.

Nach der Abkühlung werden die Lasten entfernt, das Modell aus der Belastungsvorrichtung herausgenommen und, wenn es nicht sofort zerschnitten wird, in einen Exsikkator gelegt. Alle Aralditmodelle und Schnitte aus solchen müssen in trockener Luft aufbewahrt werden, da sich sonst infolge der Luftfeuchtigkeit an den freien Oberflächen störende Eigenspannungen einstellen („Randeffekt“).

*Auswertung.* Zur Auswertung wird das Modell mit dem eingefrorenen Spannungszustand so in Schnitte von gewöhnlich 3 bis 4 mm Stärke zerlegt, daß alle Stellen, die ausgewertet werden sollen, in diesen Schnitten liegen. Das Heraussägen der Schnitte muß mit sehr kleinem Vorschub erfolgen, denn es muß jede größere Wärmeentwicklung dabei vermieden werden, da sonst die eingefrorenen Spannungen zurückgehen.

Zur Beobachtung des optischen Spannungsbildes bringt man die Schnitte in das gleiche Polariskop, das auch in der ebenen Spannungsoptik [2] verwendet wird. Für die Auswertung im Räumlichen ist jedoch das optische Grundgesetz allgemeiner zu fassen. Darauf kann hier nicht erschöpfend eingegangen werden. Zum Verständnis des Films ist das Auswertungsgesetz nur für den wichtigen Sonderfall eines Symmetrieschnittes erforderlich. Der Schnitt werde senkrecht durchleuchtet. Im Symmetrieschnitt wirkt eine der drei Hauptspannungen, die mit  $\sigma_3$  bezeichnet sei, senkrecht zur Schnittfläche, ihre Richtung fällt also mit der Lichtrichtung zusammen. In diesem Falle ist der optische Effekt unabhängig von  $\sigma_3$ , und für seine Abhängigkeit von den beiden übrigen Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ , deren Richtungen in der Schnittebene liegen, gilt auch im Räumlichen Gl. (1). Die Ordnung  $\delta$  der in den Schnitten beobachteten Isochromaten ist also auch hier proportional der Hauptspannungsdifferenz ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ). Am lastfreien Rand eines Symmetrie-

schnittes ist ebenso, weil eine von den Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  gleich Null ist, die Isochromatenordnung  $\delta$  proportional der tangential zum Rand wirkenden Spannung.

Die beim Symmetrieschnitt senkrecht zur Schnittebene wirkende Hauptspannung  $\sigma_3$  kann am lastfreien Rand durch eine zusätzliche Beobachtung unter schrägem Lichteinfall bestimmt werden. Auch wenn es sich nicht um einen Symmetrieschnitt handelt, können am lastfreien Rand beide Hauptspannungen und auch ihre Richtung durch Beobachtungen bei Schrägeinfall ermittelt werden. Die Versuchstechnik des schrägen Lichteinfalls wird bei Beispiel 2 (Schrägverzahnung) erläutert. Wegen der quantitativen Auswertung der Spannungen muß jedoch auf die Literatur verwiesen werden [1].

## II. Erläuterungen zum Film

### *Welle mit Flansch<sup>1)</sup>*

Dieses einfache Anwendungsbeispiel<sup>2)</sup> zeigt ausführlich die vollständige Durchführung des Einfrierverfahrens zur Lösung einer Festigkeitsaufgabe. Ein kleiner Trickteil erläutert die gestellte Aufgabe: Beanspruchung der Welle durch ein Kräftepaar auf reine Biegung. Am Übergang von Welle zu Flansch mit kleinem Radius erhöhte Spannung infolge Kerbwirkung. Die maximalen Spannungen sind im Symmetrieschnitt zu erwarten. Die Spannungserhöhung am Übergang ist im Verhältnis zur Biegebeanspruchung der Welle als Formzahl anzugeben.

Für das Gießen des Modells wird eine abgewogene Menge von Araldit-Brocken (monomeres Rohprodukt) in eine Pfanne gelegt und diese in den Ofen gebracht. Schmelzen bei 160°C. Hierauf wird die (vorher eingefettete) Gießform zum Vorwärmen in den Ofen gestellt und die Pfanne mit dem geschmolzenen Araldit herausgenommen. Der Ofen wird auf 100°C umgestellt. Außerhalb des Ofens wird jetzt eine abgewogene Menge Härter eingerührt. (Dies dauert in Wirklichkeit etwa 1/2 Stunde; außerdem muß bei einer so kleinen Menge Schmelze diese zwischendurch wieder kurzzeitig in den Ofen gestellt werden.) Hierauf Gießen, dann 20 Stunden Polymerisieren im Ofen bei 100°C. Das jetzt fest gewordene Gußstück wird noch warm (daher Verwendung von Handschuhen) ausgeformt und zum Tempern wieder in den Ofen gebracht, die Welle senkrecht hängend, damit keine Biegespannungen infolge des Eigengewichts einfrieren. Der Ofen wird für das Tempern auf 150°C umgestellt. Nach etwa 2 Stunden wird durch selbsttätige Temperaturregelung langsam (Temperatursenkung etwa 3°C/Std.) abgekühlt.

Die Bearbeitung des Modells erfolgt zunächst auf der Drehbank: erst grober, dann feiner Span<sup>3)</sup>, dazwischen Durchmesserkontrolle mit Schub-

<sup>1)</sup> Die *Kursiv*-Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film.

<sup>2)</sup> Dieses Beispiel stammt von Th. GAYMANN und ist in [3] veröffentlicht.

<sup>3)</sup> Der Span muß sich in der hier gezeigten Form ausbilden, wenn eine einwandfreie, glatte Oberfläche erzielt werden soll.

lehre. Hierauf Bohren der Schraubenlöcher (hier ist schnelles Arbeiten erlaubt, da in der Umgebung der Löcher nicht ausgewertet wird; außerdem verschwinden eventuell entstandene Bearbeitungsspannungen wieder bei der Erwärmung). Zur Bearbeitung werden Hartmetallwerkzeuge verwendet.

### *Einfrieren des Spannungszustandes*

Das bereits in der Einspannvorrichtung befestigte Modell wird mit dieser in den auf 150°C eingestellten Ofen gebracht. Erwärmung einige Stunden (je nach Größe des Modells). Ein leichter Fingerdruck auf das Modell zeigt, daß es gummiartig weich geworden ist (Hochelastizität). Aufbringen des belastenden Kräftepaars durch Anhängen von zwei Gewichten. Nach Schließen des Ofens wird die Temperatur noch etwa 1 Std. auf 150°C gehalten und dann wieder langsam, mit 3°C/Std., abgekühlt. Jetzt wird die Belastungsvorrichtung aus dem Ofen herausgenommen und die Belastung entfernt. Die ziemlich große Verformung geht nicht mehr zurück: der Spannungszustand ist eingefroren. Das Modell wird von der Einspannvorrichtung losgeschraubt.

Hierauf wird das Zerschneiden des Modells gezeigt. Ein erster Sägeschnitt durch das Modell ist bereits erledigt. Der zweite, parallel zu ihm, wird im Film gezeigt. Es wird ein ca. 5 mm starker Schnitt aus dem Bereich der Symmetrieebene herausgearbeitet. Sehr langsamer Vorschub, um Erwärmung zu vermeiden! Hierauf Planfräsen des Schnittes auf 3 mm Stärke mit Hartmetall-Messerkopfräser.

Zur Auswertung wird der inzwischen im Exsikkator aufbewahrte Symmetrieschnitt aus diesem herausgenommen, zwecks besserer Durchsichtigkeit mit Öl benetzt und zur Beobachtung ins Polaroskop gebracht. Es zeigt sich das Isochromatenbild. In der Welle reine Biegung. Maximale Isochromatenordnung am Rand  $\delta_1 = 3,8$  (von der Mittellinie aus abzuzählen, Zehntel werden durch Extrapolieren zum Rand erhalten). Am Übergang maximale Ordnung  $\delta_2 = 5,8$ . Da  $\delta$  der Randspannung proportional ist, ergibt sich die Formzahl  $\alpha_k$  zu:

$$\alpha_k = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{3,8}{5,8} = 0,655$$

Ergebnis: Spannungserhöhung von 53% am Übergang.

### *Schrägverzahnung*

Bei diesem zweiten Anwendungsbeispiel [4] wird zunächst die Belastung der im Ofen aufgestellten und bereits auf 150°C erwärmten Versuchsanordnung gezeigt. Durch Anhängen der Gewichte  $G_1$  (Abb. 1) erfährt das Verzahnungssegment  $Z_1$  über den Hebel  $H$  ein Drehmoment und drückt seine Zahnflanken gegen das feste Segment  $Z_2$ . Ferner wird für jedes Segment ein zugehöriger Eichstab ( $E_1$  und  $E_2$ ) durch An-

hängen der Gewichte  $G_2$  auf reine Biegung belastet. Die Eichstäbe dienen zur Bestimmung der spannungsoptischen Konstanten und der Elastizitätsmoduln der Segmente.

Gegenstand der Untersuchung ist die Verteilung des Zahndrucks längs der Berührungslinie der Zahnflanken und die Verteilung der Kerbspannung am Zahnfuß. Hierzu werden aus einem Zahnsegment 11 parallele Schnitte herausgenommen, die auf den Zahnflanken ungefähr senkrecht stehen, also angenähert Normalschnitte sind. Das Zersägen des Segments wird im Film kurz angedeutet und hierauf der fertige Satz der 11 Schnitte überblendet, so daß man ihre Lage im Segment erkennt.

Nun wird der erste Schnitt ins Polariskop gebracht. Man erkennt an der Anhäufung von Isochromaten die Druckstelle der Zahnkraft an der Zahnflanke und die Kerbspannung am Zahnfuß. Zugleich mit dem ersten Schnitt erscheint einer der auf reine Biegung beanspruchten Eichstäbe. Sodann wird der zweite Schnitt ins Polariskop gebracht und anschließend alle weiteren Schnitte nacheinander überblendet. Dadurch wird deutlich, wie die Beanspruchung des Zahnprofils längs des schraubenförmig gewundenen Zahns veränderlich ist. Es verändert sich sowohl der Ort der Druckstelle als auch die Stärke der Beanspruchung dort und am Zahnfuß.

### *Auswertung mittels schiefer Durchstrahlung<sup>1)</sup>*

Die gezeigten Normalschnitte eines Zahns der Schrägverzahnung sind keine Symmetrieschnitte. Bei solchen Schnitten allgemeiner Art ist die genaue quantitative Auswertung schwieriger. Im vorliegenden Fall der Schrägverzahnung zeigt sich jedoch, daß die Schnitte zum größten Teil wie Symmetrieschnitte ausgewertet werden dürfen. Die herausgenommenen Schnitte sind — wie erwähnt — praktisch Normalschnitte der Zähne. Die Zähne werden quer zu ihrer (schraubenförmig gewundenen) Längsachse gebogen. Infolgedessen liegen die Spannungsrichtungen im allgemeinen fast genau in den Normalschnitten. Nur in der Nähe der Zahnradstirnflächen hat man Abweichungen, weil ja an der Stirnfläche diese selbst Hauptebene ist; sie steht aber schräg zur Zahnachse und damit schräg zum Normalschnitt des Zahns.

Bei der Auswertung kann man also verfahren wie bei Symmetrieschnitten, wenn vorher festgestellt worden ist, daß die Spannungsrichtung an der betreffenden Stelle tatsächlich praktisch in die Schnittebene fällt. Dies kann durch das Verfahren der schiefen Durchstrahlung geschehen. Der Film erläutert am Beispiel der Untersuchung der maximalen Kerbspannung am Zahnfuß, wie man dabei vorzugehen hat:

Der Schnitt wird in eine Vorrichtung eingespannt, die gestattet, ihm um vorgegebene Winkel zu schwenken. Diese Vorrichtung wird in einen mit einem Mittel gleicher Brechung gefüllten Trog gebracht. Der Schnitt liegt so in der Schwenkvorrichtung (Abb. 2), daß die (horizontale)

---

<sup>1)</sup> Dem Vortragenden wird empfohlen, diesen Abschnitt vor der Vorführung des Films zu erläutern, da der Inhalt sonst während der kurzen Ablaufdauer nicht verständlich gemacht werden kann.

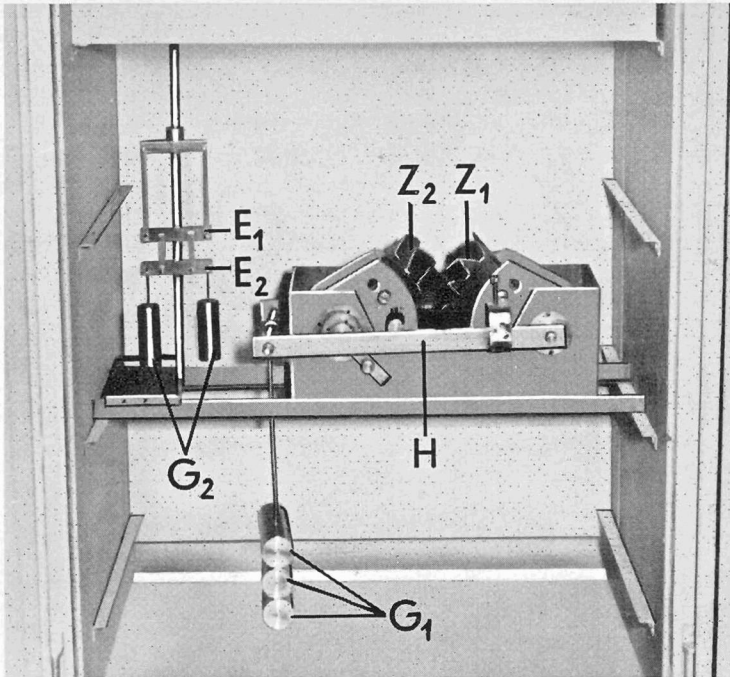


Abb. 1. Belastungsvorrichtung der Verzahnungssegmente  
 $Z_1, Z_2$ : Verzahnungssegmente;  $G_1, G_2$ : Gewichte; H: Belastungshebel;  $E_1, E_2$ : Eichstäbe

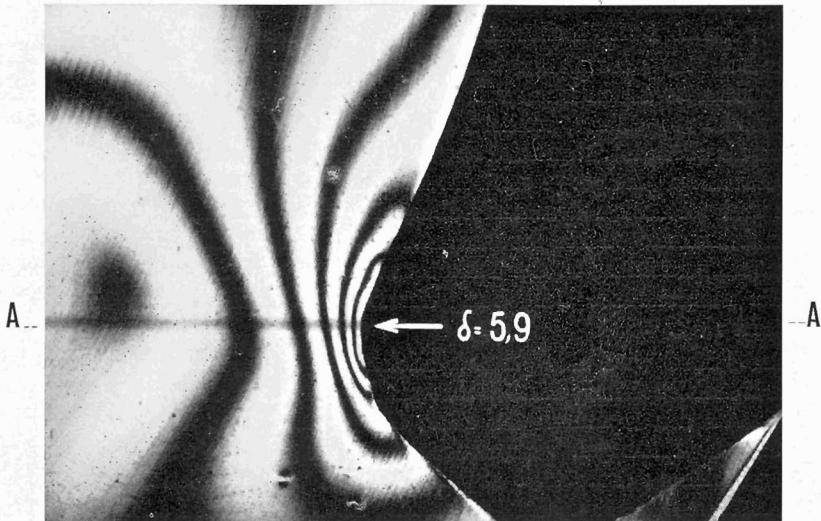


Abb. 2. Zur Auswertung eines Schnittes der Schrägverzahnung  
 am Zahnfuß mittels schiefer Durchstrahlung  
 A—A: Drehachse



Drehachse  $A-A$  durch die auszuwertende Randstelle (Kerbspannungsmaximum am Zahnfuß) geht und auf dem Rand senkrecht steht. Während man nun den zuerst frontal stehenden Schnitt nacheinander um  $+30^\circ$  und um  $-30^\circ$  neigt, stellt man fest, wie sich dabei an der auszuwertenden Randstelle die Isochromatenordnung  $\delta$  verändert. Wenn sie symmetrisches Verhalten zeigt, d. h. wenn für die Neigung  $\pm 30^\circ$  die gleiche Ordnung  $\delta$  beobachtet wird, liegt eine Hauptspannungsrichtung in der Schnittebene wie bei Symmetrieschnitten. Bei unsymmetrischem Verhalten von  $\delta$  dagegen sind die Hauptrichtungen gegen die Schnittebene geneigt. Im Falle des im Film vorgeführten Schnitts war der linke Zahnfuß im Verzahnungssegment sehr nahe an dessen Stirnfläche gelegen, der rechte dagegen mehr im Innern. Es zeigt sich daher am rechten Zahnfuß symmetrisches Verhalten der Isochromatenordnung  $\delta$ . Bei frontaler Betrachtung (Neigung  $0$ , Abb. 2) ist  $\delta = 5,9$ , bei Neigung um  $\pm 30^\circ$  wächst beide Male  $\delta$  auf  $6,1$  an. Dagegen liegt bei demselben Schnitt am linken Zahnfuß unsymmetrisches Verhalten vor: bei  $+30^\circ$  nimmt  $\delta$  von  $6,3$  auf  $4,8$  ab, bei  $-30^\circ$  dagegen steigt es bis auf  $7,0$  an.

### *Rohrverzweigung unter Innendruck*

[5]

Es handelt sich um eine rechtwinkelige Abzweigung. Das abzweigende Rohr hat den halben Durchmesser des Hauptrohres.

Zunächst wird kurz das Gießen des Modells gezeigt. Die Form für dieses Modell ist aus Stücken von Präzisionsstahlrohren zusammengesetzt und so genau gearbeitet, daß ein maßhaltiges Modell erhalten wird, an dem keine Nachbearbeitung mehr notwendig ist. Die Schmelze wird durch ein Rohr am tiefsten Punkt der Form eingefüllt („steigender Guß“), damit Lufteinschlüsse möglichst vermieden werden.

Zur Belastung des Modells wurde während des ganzen Einfriervorgangs ein konstanter Innendruck von  $0,17$  atü aufrechterhalten. Dies wird im Film nicht vorgeführt, sondern der Gießform das bereits zerschnittene Modell überblendet. Nun wird es auseinandergenommen und die Schnitte im Polariskop gezeigt: je ein Schnitt von  $3$  mm Stärke aus der horizontalen und vertikalen Symmetrieebene. An der Anhäufung von mehreren nebeneinanderliegenden Isochromaten zeigen sich die Zonen von Biegebbeanspruchung in der Rohrwand. Man erkennt, daß diese Zonen auf die unmittelbare Umgebung der Durchdringung beider Rohre beschränkt sind.

Zum Schluß wird eine ganze Modellhälfte im Polariskop gezeigt. Bei dieser Durchleuchtung der Schalenwand geben die Isochromaten nur den Mittelwert der Spannungen über die Wandstärke, die sogenannten „Membranspannungen“. Man erkennt jedoch gut den Ort der stärksten Beanspruchung: diese tritt am oberen und unteren Scheitelpunkt der Durchdringungsfigur des kleinen Rohrs mit dem großen auf. Qualitativ kann man diese Spannungsspitze so erklären: Das Zugfeld im großen Rohr, dessen größere Hauptspannung längs seines Umfangs wirkt, wird durch die Öffnung der Abzweigung gestört und es tritt eine Spannungs-

konzentration ein, ähnlich wie beim gelochten Zugstab [2]. Die genaue Messung dieser Spannungsspitze kann im Film nicht gezeigt werden; hierzu muß der vorher gezeigte vertikale Symmetrieschnitt noch weiter unterteilt werden.

### Literatur

- [1] FÖPPL, L., u. E. MÖNCH, Praktische Spannungsoptik, 2. Aufl. Springer, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959.
- [2] FÖPPL, L., u. E. MÖNCH, Spannungsoptik. Wiss. Film C 558 Inst. f. d. Wiss. Film, Göttingen 1949.
- [3] FÖPPL, L., u. E. MÖNCH, Spannungsoptische Messungen. In: E. SIEBEL, Handb. d. Werkstoffprüfung, 2. Aufl., S. 543, Springer, Berlin-Göttingen-Heidelberg.
- [4] MÖNCH, E., u. A. K. ROY, Spannungsoptische Untersuchung eines schrägverzahnten Stirnrades, Konstruktion **9** (1957) S. 429/38.
- [5] GAYMANN, Th., Spannungsuntersuchungen an Schalen durch das spannungsoptische Einfrierverfahren. Diss. T. H. München 1957, VDI-Forschungs-Heft Nr. 471, Düsseldorf 1959.

*(Eingegangen am 20. 2. 1959)*