

Photoelastische Modellversuche an glasfaserverstärkten Kunststoffen*

Von KARL FREY **

Summary

In mechanical engineering, glass reinforced plastics are increasingly used for the production of highly stressed structural parts. As reinforced plastics consists of two components, glass and synthetic resin, which differ considerably in respect to their YOUNG's modulus, the stress distribution under load may be very different from the stress distribution in structures of identical shape but consisting of an uniform material. To investigate this difference in the stress pattern caused by bending forces, models composed of plastic rods with inserted layers of glass web and corresponding models of an uniform synthetic resin have been compared by photoelastic analysis.

Das Interesse des Kunststoffchemikers ist naturgemäß in erster Linie auf die Möglichkeiten einer Synthese

von Kunststoffen, auf den Reaktionsmechanismus dieser Synthesen und gegebenenfalls auf den Chemismus von modifizierenden Reaktionen oder von Härtungsvorgängen gerichtet. Demgegenüber stützt sich die werkstoffgerechte und zweckentsprechende Anwendung der Kunststoffe wie auch das Bestreben, Fehlschläge durch unsachgemäßen Einsatz zu vermeiden – im Sinne eines mehr ingenieurmäßigen Denkens –, auf eine genaue und möglichst umfassende Kenntnis der einwandfrei hergestellten, verwendungsbereiten Produkte und auf das Vertrautsein mit ihrem Verhalten gegenüber den verschiedenartigsten Beanspruchungen, die sich aus der jeweiligen praktischen Verwendung ergeben. Je höhere Ansprüche hinsichtlich einer bestmöglichen Ausnützung eines Werkstoffes gestellt werden, je mehr derselbe hinsichtlich bestimmter Eigenschaften hochgezüchtet ist,

* Vorgetragen am 4. Symposium über makromolekulare Stoffe, 7./8. September 1967, Brunnen (Schweiz).

** Adresse des Autors: Dr. KARL FREY, Rebgeasse 30, 4102 Binningen (Schweiz).

um so eingehender müssen diese werkstoffkundlichen Grundlagen abgeklärt werden.

Die Versuche, über die im folgenden auszugsweise berichtet wird, wurden in der Absicht durchgeführt, auf einem umgrenzten Teilgebiet, nämlich auf dem der *mechanischen Beanspruchung glasverstärkter Kunststoffe*, einen Beitrag zu einer vertieften Kenntnis des werkstofflichen Verhaltens dieser Produkte zu leisten, die heute zunehmend Verwendung für mechanisch hoch beanspruchte Bauelemente im Maschinen- und Apparatebau wie auch bei der Konstruktion von Fahrzeugen und Flugzeugen finden¹.

Ihrem Wesen nach handelt es sich bei glasverstärkten Schichtstoffen um *Verbundwerkstoffe*, in denen Schichten eines Verstärkungsmaterials mit hohem E -Modul – Glasgewebe bzw. Glasfäden – durch ein als Bindemittel dienendes Kunstharz mit niedrigem E -Modul eingehüllt und zu Platten oder anderem Halbzeug verklebt sind. Wegen des starren Verbandes zwischen Glas und Kunstharz müssen unter mechanischer Beanspruchung die beiden Komponenten des Schichtstoffes zwangsläufig gleichgroße Deformationen erfahren, was infolge der verschiedenen großen E -Moduln dazu führt, daß die Spannungen und damit die von jeder Komponente übertragenen Kräfte Funktionen des Glasgehaltes und des Verhältnisses der beiden E -Moduln werden.

Für einen *Zugstab* (einachsiger Spannungszustand), dessen Querschnitt aus q_g Anteilen Glas und q_h Anteilen Kunstharz besteht, läßt sich unter Berücksichtigung der obenerwähnten Feststellung gleichgroßer Dehnungen eine Beziehung ableiten, aus der zu entnehmen ist, welcher prozentuale Anteil der gesamten einwirkenden Zugkraft durch den Glasquerschnitt allein übertragen wird:

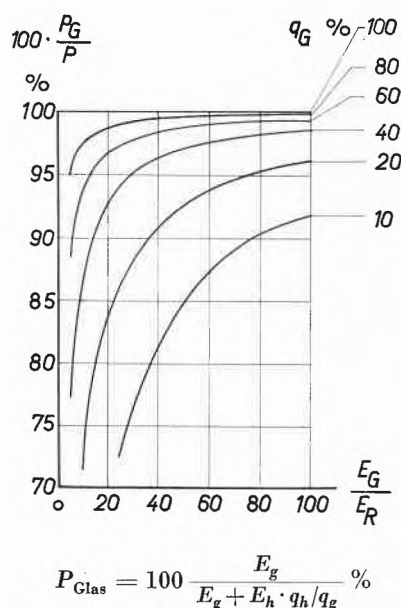


Abb. 1. Verteilung der Zugkraft zwischen Glas und Kunstharz in Zugstäben aus Schichtstoff als Funktion des Glasgehaltes und des Verhältnisses der E -Moduln

Bei den in der Praxis verwendeten Schichtstoffen – Glasanteil q_g etwa 60 Querschnitts-%, E_g etwa $600\,000 \text{ kg cm}^{-2}$, E_h etwa $30\,000 \text{ kg cm}^{-2}$ – werden also durch das Glas allein etwa 97% der gesamten Zugkraft übertragen. Da die Zugfestigkeit der Glasfasern ein Mehrfaches derjenigen der Kunstharze beträgt, geht aus diesen Überlegungen die hohe technologische Bedeutung der Zugabe von Glas als Verstärkungsmaterial klar hervor.

In einem durch äußere Kräfte beanspruchten Konstruktionsteil wird bekanntlich im Innern ein mit diesen Kräften im Gleichgewicht stehendes *inneres Spannungsfeld* hervorgerufen. Im allgemeinen Falle ist dieses Feld inhomogen, d. h. der die Materialanstrengung kennzeichnende Spannungstensor wechselt seine Größe von Punkt zu Punkt. Die Kenntnis dieser Spannungsfelder, also die Spannungsverteilung im Innern des belasteten Bauteiles nach Größe und Richtung, ist für den Konstrukteur von fundamentaler Bedeutung. Aus ihr sind diejenigen räumlichen Bereiche ersichtlich, in denen die Höhe der Materialbeanspruchung eine für den betreffenden Werkstoff kritische Größe erreichen kann, deren Überschreitung zu Brucherscheinungen oder zu unzulässig großen Deformationen führen könnte.

Die an einem beliebig gewählten Punkt A im Innern auftretenden Spannungen eines belasteten Bauteiles sind, sofern es sich um einfache Belastungsfälle und um einfache geometrische Gestaltgebung handelt, der Berechnung zugänglich, wobei in erster Annäherung auf die elementare Festigkeitslehre zurückgegriffen werden soll, indem die Annahme zugrunde gelegt wird, daß ein ebener, zweiachsiger Spannungszustand vorliege und daß ferner das Hookesche Gesetz und die Bernoulli-Naviersche Forderung erfüllt seien.

Für einen an beiden Enden aufgelagerten, in der Mitte durch eine Einzelkraft belasteten *Biegebalken* von rechteckigem Querschnitt, auf den sich die folgenden Ausführungen im Hinblick auf die zu beschreibenden Versuche beschränken sollen, berechnet sich unter den genannten Voraussetzungen

- a) die durch das Biegemoment M hervorgerufene *Normalspannung* σ_{xx} parallel der Stablängsachse zu

$$\sigma_{xx} = \frac{M}{J} \cdot y \quad \text{kg cm}^{-2}$$

(J = Trägheitsmoment $\frac{bh^3}{12} \text{ cm}^4$, y Abstand des Punktes A von der neutralen Faser),

- b) die durch die Querkraft Q bedingten, einander zugeordneten *Schubspannungen* $\tau_{xy} = \tau_{yx}$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} \quad \text{kg cm}^{-2}$$

$$\left(S = \int_y^{h/2} b \cdot y \cdot dy \text{ cm}^3 \right).$$

Aus diesen Spannungsgrößen lassen sich rechnerisch oder, mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises, gra-

phisch die beiden Hauptspannungen σ_1 und σ_2 sowie deren Richtungen in bezug auf die Stabachse ermitteln, wodurch der Spannungszustand an dem herausgegriffenen Punkt *A* eindeutig festgelegt ist. Durch die Wiederholung dieser Rechnungen für weitere Punkte ist die Ermittlung des gesamten Spannungsfeldes grundsätzlich möglich.

Es ist aber bereits betont worden, daß diese elementare Berechnungsart von Voraussetzungen ausgeht, die nur als Annäherung an die wirklichen Verhältnisse gelten können. Weiterhin läßt sie auch die Spannungskonzentrationen unberücksichtigt, welche an den Stellen, an denen die äußeren Kräfte in den Biegestab eingeleitet werden, auftreten, also an den beiden Stabenden und am Angriffspunkt der Last. Gemäß dem von SAINT-VENANT ausgesprochenen Prinzip darf deshalb erst in einem gewissen Abstand von diesen Stellen eine ungestörte Spannungsverteilung angenommen werden.

Sofern die Versuchskörper aus einem durchsichtigen Werkstoff bestehen, wie dies für viele Kunststoffe zutrifft, bietet die *Spannungsoptik*, d.h. die Durchleuchtung mit polarisiertem Licht, eine heute oft benutzte Möglichkeit, Spannungsfelder in übersichtlicher, quantitativ auswertbarer Weise erkennbar zu machen, wobei auch die soeben erwähnten sekundären Einflüsse lokaler Spannungskonzentrationen, die bei der Berechnung unberücksichtigt gelassen wurden, miterfaßt werden.

Die Spannungsoptik beruht bekanntlich im Prinzip darauf, daß die in unbelastetem Zustande optisch isotropen Versuchskörper durch eine mechanische Beanspruchung doppelbrechend werden, wobei die Schwingungsebenen des ordentlichen und des außerordentlichen Strahles in die Richtung der mechanischen Hauptspannungen fallen. Da die beiden Strahlen beim Durchgang durch den Versuchskörper infolge der verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine Gangdifferenz erfahren, geben sie bei ihrer Überlagerung im Analysator zu Interferenzerscheinungen Anlaß, die sich im Auftreten von Kurvenscharen bemerkbar machen. Dabei

sind die Isoklinen von den Isochromaten zu unterscheiden (Abb. 2).

Jede *Isokline* stellt den geometrischen Ort aller Punkte dar, für den die beiden Hauptspannungen bezüglich einer an sich frei wählbaren Bezugsrichtung gleiche Winkel einschließen. Aus einer Schar von Isoklinen, die durch Drehung der Schwingungsebene des einfallenden Lichtes bezüglich des Versuchskörpers erzeugbar ist, läßt sich das Netz der Spannungstrajektorien aufzeichnen, der Kurven also, welche als orthogonales System die *Richtungen* der Hauptspannungen festlegen.

Die *Isochromaten* andererseits sind die geometrischen Orte aller Punkte, in denen die Differenz $\sigma_1 - \sigma_2$ der beiden Hauptspannungen oder, damit gleichbedeutend, die maximalen Schubspannungen konstant sind. Da diese Differenz von Isochromate zu Isochromate um einen gleichen, durch Eichversuche zu ermittelnden Betrag zunimmt, ist ihr Gradient um so größer, je näher die Isochromaten beieinanderliegen. Ihre Anzahl längs einer bestimmten Strecke ist proportional $\sigma_1 - \sigma_2$ bzw. proportional der maximalen Schubspannung $\tau_{\max}$.

Isoklinen und Isochromaten erlauben aufgrund bestimmter Auswerteverfahren für beliebige Punkte des Versuchskörpers Richtung und Größe der dort bestehenden Hauptspannungen festzulegen und damit das gesamte Spannungsfeld darzustellen. Darauf kann hier nicht eingegangen werden, es sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen².

Die vorliegende Untersuchung hatte nun das Ziel, folgende Fragestellung zu beantworten:

Nach dem bisher Gesagten ist durch spannungsoptische Verfahren das Spannungsfeld aufzufinden, das sich im Innern eines mechanisch beanspruchten, aus einem homogenen Werkstoff bestehenden Prüfkörpers aufbaut. Grundlage dafür bilden die Kurvenscharen der Isoklinen und Isochromaten.

Wie ändert sich nun bei der spannungsoptischen Untersuchung dieses Kurvensystem, wenn in die untersuchten Prüfkörper Schichten eingefügt werden, die aus einem Werkstoff mit einem stark verschiedenen *E*-Modul bestehen, wenn also im hier besprochenen Falle in Biegestäbe aus Kunstharz Schichten aus Glasgewebe eingelagert sind?

Derartige geschichtete Prüfstäbe können als grob vergrößerte Modelle glasgewebeverstärkter Schichtstoffe angesehen werden. Die Auswertung derartiger Modellversuche sollte also Aufschluß darüber geben können, wie sich der Kraftfluß im Innern der Schichtstoffe vollzieht, welche Spannungs- bzw. Kraftverteilung zwischen Glasfaser und Kunstharz sich bei Belastung einstellt.

Die folgenden Isochromatenbilder, die zwecks Ausschaltung der Isoklinen im zirkulär polarisierten, monochromatischen Licht einer Natriumdampflampe im Dunkelfeld aufgenommen sind, zeigen zunächst (Abb. 3) einen in der Mitte belasteten Biegestab aus einem homogenen Epoxy-Gießharz. Dieses Bild möge als Vergleich dienen für die zwei folgenden Aufnahmen:

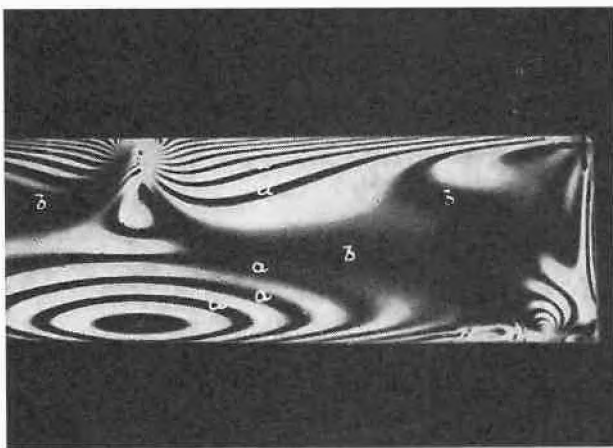


Abb. 2. Isochromaten (a) und Isoklinen (b) in einem auf Biegung beanspruchten Stab aus homogenem Kunststoff

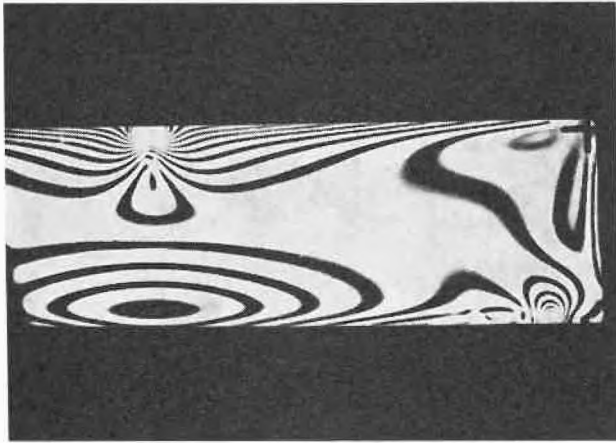


Abb. 3. Isochromatenbild eines auf Biegung beanspruchten Stabes aus homogenem Kunststoff

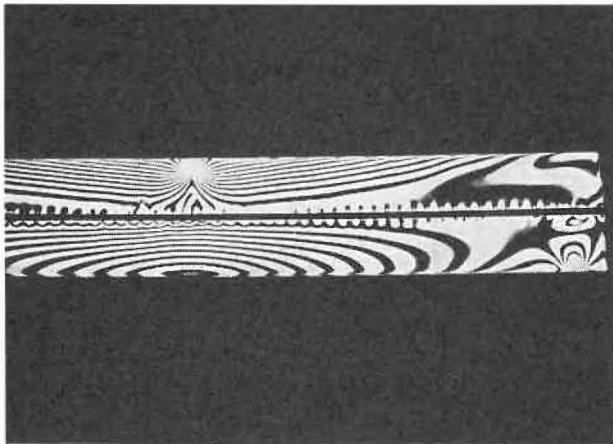


Abb. 4. Isochromatenbild eines auf Biegung beanspruchten Stabes aus Kunststoff mit Glasgewebeeinlage in der Stablängsachse

Biegestab mit einer Glasgewebeeinlage in der Biegemittelzone, d.h. in der neutralen Schicht. Die Längsfasern dieser Schicht sind im homogenen Stab spannungsfrei, $\sigma_{xx} = 0$. Auf Seite der belastenden Einzelkraft treten gegen den Stabrand zunehmende Druckspannungen in Erscheinung, auf der Gegenseite die entsprechenden Zugspannungen. Andererseits erreichen die durch die Querkräfte bedingten Schubspannungen in der neutralen Schicht ihr Maximum, $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_{max}$. Die Spannungstrajektorien schneiden demzufolge die Mittellinie im Winkel von 45° .

Biegestab mit zwei Glasgewebeeinlagen symmetrisch zur Mittellinie in einer Distanz von $1/3$ der gesamten Stabhöhe. In einem Querschnitt eines entsprechenden Biegestabes aus einem homogenen Werkstoff werden bei dieser Anordnung etwa 33% der maximalen Randspannung als Normalspannung σ_{xx} und etwa 89% der in der neutralen Schicht auftretenden maximalen Schubkraft τ_{max} übertragen.

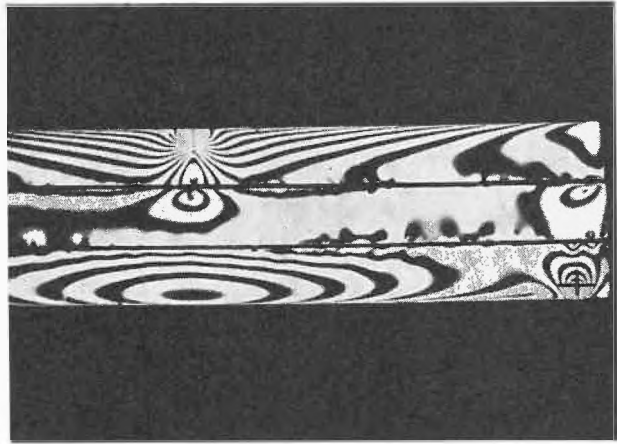


Abb. 5. Isochromatenbild eines auf Biegung beanspruchten Stabes aus Kunststoff mit zwei, symmetrisch zur Stablängsachse eingelagerten Glasgewebeeinlagen

Aus diesen zwei Beispielen, die nur eine Auswahl aus vielen Versuchen sind, geht – vorläufig in qualitativer Hinsicht – hervor, daß die eingelagerten Glasgewebeeinlagen gegenüber einem Vergleichsstab aus einem homogenen Werkstoff eine sehr augenfällige Veränderung des Isochromatenbildes bewirken, was andererseits auf eine entsprechende Veränderung des Spannungsfeldes hindeutet. Es soll nicht verschwiegen werden, daß die numerische Auswertung derartiger Aufnahmen vorläufig nicht unerhebliche Schwierigkeiten bietet. Diese rühren davon her, daß es trotz vieler Anstrengungen bis jetzt noch nicht gelungen ist, die glasgewebeverstärkten Prüfstäbe in einer Weise herzustellen, daß sie in unbelastetem Zustande spannungsfrei sind, wodurch die Aufnahme der Isoklinen und die Bestimmung der Interferenzordnung der Isochromaten sehr erschwert und unsicher wird. Das Vorhandensein solcher von der Herstellung der Prüfkörper herrührender inneren Materialspannungen läßt sich in bekannter Weise durch Kompensationsversuche leicht nachweisen und wertmäßig bestimmen.

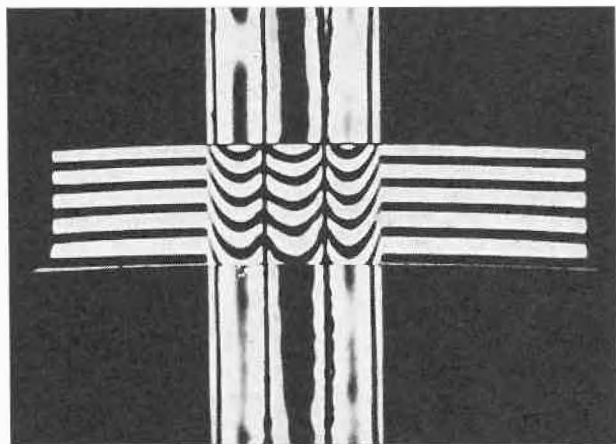


Abb. 6. Kompensationsversuch zur Darstellung der Eigenspannungen in unbelastetem Zustande. Prüfstab wie in Abb. 5, Kompensationsstab aus Plexiglas

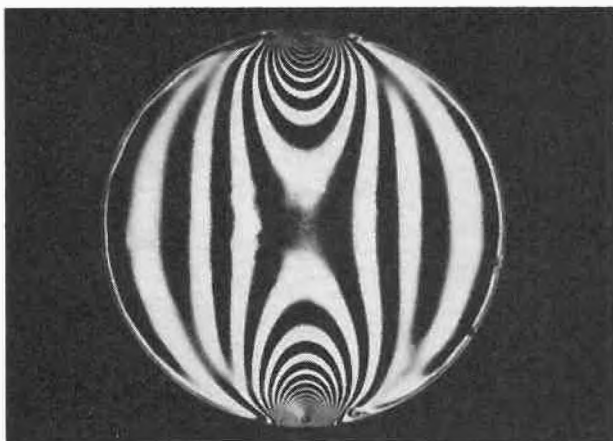


Abb. 7. Isochromatenbild einer längs eines Durchmessers auf Druck beanspruchten Scheibe aus homogenem Kunststoff

Diese Schwierigkeiten führten dazu, neben den hier behandelten Biegestäben auch anders gestaltete Prüfkörper in die Untersuchung einzubeziehen, die eher Gewähr bieten sollten, sich frei von Eigenspannungen herstellen zu lassen. So z. B. runde, längs einem Durchmesser auf Druck beanspruchte Scheiben. Die Spannungsfelder, die sich in belastetem Zustand aufbauen, sind spannungsoptisch gut erfaßbar und hinsichtlich ihrer Auswertung bereits beschrieben³. Werden in derartige Scheiben Glasstränge oder Glasgewebe eingelagert, so werden sehr eindruckliche Veränderungen im Isochromatenbild bemerkbar, deren Auswertung ebenfalls zu einer Klärung der Spannungsverteilung in Schichtstoffen führen sollte. Diese Untersuchungen werden noch weitergeführt.

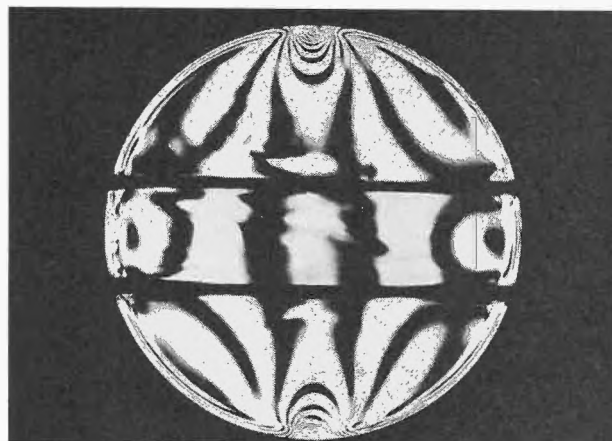


Abb. 8. Isochromatenbild einer Scheibe aus Kunstharz mit zwei quer zur Druckrichtung eingelagerten Glassträngen

Die beschriebenen Modelle sind aus Araldit®-Gießharzen bzw. Laminierharzen der CIBA Aktiengesellschaft in Basel hergestellt worden. Der Autor ist dieser Firma für die Überlassung von Versuchsmaterial zu bestem Danke verpflichtet.

Literatur

1. H. HAGEN, *Glasfaserverstärkte Kunststoffe*, Verlag Springer, Berlin 1961.
2. H. WOLF, *Spannungsoptik*, Verlag Springer, Berlin 1961.
L. FÖPPL und E. MÖNCH, *Praktische Spannungsoptik*, Verlag Springer, Berlin 1950.
A. KUSKE, *Einführung in die Spannungsoptik*, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1959.
3. H. T. JESSOP und F. C. HARRIS, *Photoelasticity*, Clever-Hume Press, London 1949.

® Registrierte Wortmarke der CIBA Aktiengesellschaft, Basel.