Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 85 (1967)

Heft: 28

Artikel: Anwendung der Moiré-Methode beim Studium der Wechselwirkung zwischen Platte und Unterzug

Autor: Rabinovici, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69495

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: 10.07.2025

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

erschlagen und untröstlich. So vielversprechend und herzerfreuend die Sache begonnen hatte, so düster und traurig sah sie nun aus. Es blieb meinem Boss nichts anderes übrig, als von seinen eingehenden Studien für ein Klein-Venedig Abschied zu nehmen. «Ein bitterer Abschied, fürwahr; fast wie von einer Geliebten, die man mit der ganzen Kraft seines Herzens jahrelang umwirbt.» Armer Boss! Wie gerne hätte er dem einst reichen und nun schuldlos verarmten, braven Bauherrn geholfen. Er selber war aber noch ein Habenichts, und ich sah, wie verstohlene Tränen rannen, als mein Boss vom ruinierten Auftraggeber Abschied nahm und damit auch vom Projekt an der Maggia. Es sollte nicht sein.

Das Land gehört heute einem Grossindustriellen. Erst kürzlich, 35 Jahre nach diesem Erlebnis, hiess mich mein Boss die letzten, als schöne und schmerzliche Erinnerung zurückbehaltenen Pläne zerreissen und in den Papierkorb tun. Ich tat es wortlos, und mein Boss ging ins Nebenzimmer.

Fortsetzung folgt

Anwendung der Moiré-Methode beim Studium der Wechselwirkung zwischen Platte und Unterzug

Von Dr. **A. Rabinovici**, dipl. Ing., Ingenieurbüro Emch & Berger, Bern

DK 624.073.001.6

Im vorliegenden Aufsatz wird die Wechselwirkung von Platten und Randbalken, einschliesslich Plattenbalkenwirkung, behandelt. Beschrieben wird eine experimentelle Untersuchung einer gleichförmig belasteten quadratischen Platte, die monolithisch mit den tragenden Unterzügen, mit verschiedenen Trägheitsmomenten, verbunden ist. Die Unterzüge sind an den Eckpunkten der Platte frei gelagert. Dieses System ist abhängig von einem Parameter γ, der gleich dem Verhältnis der Unterzugsteifigkeit zur halben Plattensteifigkeit ist

$$\left(\gamma = \frac{EI}{D\,L/2}\right).$$

Bei der Anwendung auf kleine Modelle können mit der Moiré-Methode Biegemomente und Durchbiegungen errechnet werden. Die Moiré-Methode ist auch brauchbar für die qualitative Darstellung der Oberflächenverformung der Platte. Mit wachsendem γ kommen zur Wechselwirkung noch negative Biegemomente entlang des Randbalkens und Membranspannungen in der Platte hinzu. Der Torsionswiderstand des Unterzuges wird berücksichtigt und allgemein erläutert.

Einleitung

Der Begriff der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Teilen einer Konstruktion ist wichtig für das Verständnis ihres Verhaltens als Ganzes. Um Bauteile berechnen und konstruieren zu können, vereinfacht der Ingenieur die Belastungs- und Auflagerbedingungen und wendet bekannte statische Fälle an. Im wirklichen Gebrauchszustand findet jedoch eine Wechselwirkung statt, und die theoretischen Spannungen können sich ändern. Diese Wirkung des gegenseitigen Einflusses findet auch bei der Verbindung zwischen Platten und Unterzügen statt. Die statischen Eigenschaften (Durchbiegungen, Biegemomente, Verteilung der Auflagerkräfte) einer Platte, die mit Randbalken mit verschiedenen Trägheitsmomenten verbunden ist, sind variabel in Abhängigkeit eines dimensionslosen Parameters γ. Dieser Parameter wird definiert als das Verhältnis der Unterzugsteifigkeit zur halben Plattensteifigkeit. Die mathematische Behandlung des vollen Zusammenwirkens ist im allgemeinen kompliziert. Daher werden Vereinfachungen in die Rechnung eingeführt.

Betrachtung des Problems

Bild 1 zeigt zwei Verbindungsmöglichkeiten zwischen Platte und Randbalken. – In Bild 1a fällt die Schweraxe des Plattenquerschnittes mit der Schweraxe des Unterzugquerschnittes zusammen. Wir erhalten so einen verminderten Grad der Wechselwirkung. Es treten keine Normalkräfte in den Platten auf, Verdrehungen des Unterzuges und Durchbiegungen der Platte am Rand werden vernachlässigt. Unter diesen Voraussetzungen wurde das Problem von *R. H. Wood* [1] untersucht mit Anwendung der Differenzenmethode. Momenten- und Durchbiegungswerte wurden in Abhängigkeit des Parameters γ ermittelt. Die Verformung der Platten mit verschiedenen γ-Werten kann man sich mit Hilfe der Bilder 2 und 3 vorstellen. Bei sehr weichen Unterzügen ($\gamma \to 0$) wird der Drehwinkel der Platte in der Nähe der Ecke in Richtung a–a grösser als im Punkt A des Mittelschnittes b–b. Die maximale Biegung wird im Punkt C und nicht im Plattenmittelpunkt auftreten. Die umgekehrten Verhältnisse werden bei starken Unterzügen ($\gamma \to \infty$) angetroffen. Der Drehwinkel an den Rändern geht gegen 0 und der Drehwinkel im Punkt A im Schnitt b–b nimmt zu. Das grössere Biegemoment tritt in der Plattenmitte auf. Es gibt einen Übergangsfall ($\gamma = 1$) mit gleichem Drehwinkel in den parallelen Schnitten. Das Drillmoment wechselt das Vorzeichen von einem Extremfall zum anderen. Die Platte im Fall $\gamma = 1$ kann beschrieben werden als eine Zusammensetzung von unabhängigen Streifen mit der gleichen Krümmung und ohne Drillmoment. Eine Platte, die von starren Wänden unterstützt ist, stellt eine frei aufliegende Platte dar.

In Bild 1b wird eine volle Wechselwirkung einschliesslich Plattenbalkenwirkung dargestellt. Die Biegemomente entlang des Randes werden im Unterzug Torsion erzeugen. In diesem Falle können die Normalspannungen in der Plattenebene nicht mehr vernachlässigt werden. Die mathematische Lösung wird in diesem Zustand schwierig. Eine genaue Lösung ist noch nicht gefunden. Im folgenden wird eine experimentelle Untersuchung einer gleichförmig belasteten quadratischen Platte, die mit Unterzügen verbunden ist und zusammenwirkt, erläutert. Die Moiré-Methode scheint dafür geeignet zu sein wegen der Möglichkeiten der Auslegung, welche die Streifen für die verschiedenen Querschnitte der tragenden Unterzüge erlauben. Wenn auch keine genauen quantitativen Ergebnisse vorliegen, so sollen doch wenigstens die qualitativen Kennzeichen diskutiert werden.

Experimentelle Erwägung

Es sei kurz das Prinzip der angewendeten Methode erläutert (Bild 4a). Man projiziert auf die polierte Seite des vertikal aufgestellten Modelles ein gleichmässiges System von abwechslungsweise weissen und schwarzen Linien, die zuvor auf dem Bildschirm eingezeichnet worden sind. Hinter dem Bildschirm, gegenüber der Öffnung O, ist ein Fotoapparat aufgestellt. Das Modell wird auf der selben Platte zweimal fotografiert, vor und nach der Belastung. Auf diese Weise erhalten wir Interferenzstreifen, die als erste Ableitung die Niveaulinien der Durchbiegung darstellen. Durch eine Differenzierung erhalten wir die notwendige zweite Ableitung (die Krümmung) zur Berechnung der Biegungsmomente.

Einzelheiten des Modells werden in Bild 4b gezeigt. Die Last wird gleichmässig verteilt auf das Modell aufgebracht, das sich in senk-

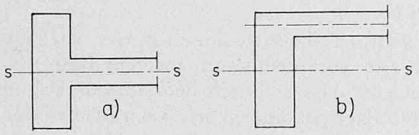


Bild 1. Zusammenwirkung zwischen Platte und Randbalken

a) Schweraxe von Platte und Randbalken zusammenfallend

b) Schweraxe von Platte und Randbalken nicht zusammenfallend

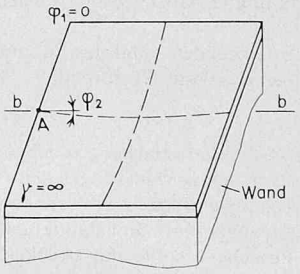


Bild 2. Quadratplatte allseitig auf Randwände frei aufgelagert ($\gamma = \infty$)

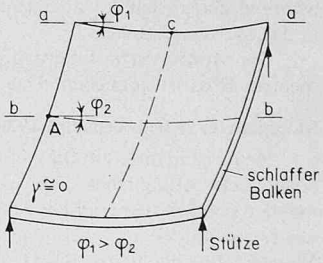


Bild 3. Quadratplatte auf schlaffen Randbalken (Vierpunktstützung) allseitig aufgelagert ($\gamma \cong 0$)

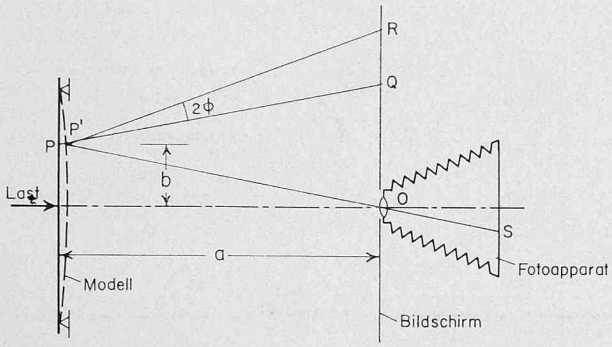


Bild 4a. Versuchseinrichtung

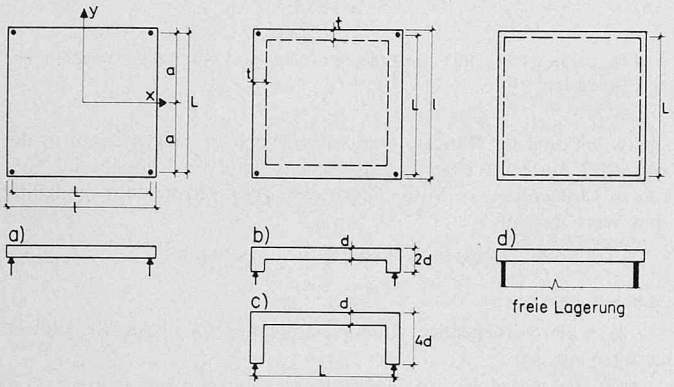


Bild 4b. Versuchsdetail

L = 19,0 cm
l = 20,0 cm
d = 0,32 cm
t = 1,0 cm
E = 33 000 kg/cm²
μ = 0,3

a) $\gamma = 0$
b) $\gamma \cong 1$
c) $\gamma = 6$
d) $\gamma = \infty$

$$D = \frac{E\,d^3}{12\,(1-\mu^2)} = 100 \text{ kg cm}$$

rechter Stellung befindet. Die Steifigkeit des Modells wurde mit Hilfe einer «Eichplatte» bestimmt und beträgt

$$D = \frac{E\,d^3}{12\,(1-\mu^2)} = 100 \text{ kg cm}$$

Die Moiré-Streifen für die Platte, welche direkt an den Ecken unterstützt ist und das Diagramm des Biegemomentes für den Mittelquerschnitt sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt. Man kann leicht sehen, dass das maximale Biegemoment am Rand auftritt.

Der zweite Versuch liegt ganz in der Nähe des Falles ohne Drillmomente, mit parallelen Streifen in gleichen Abständen. Da die Randbalken in Test Nr. 3 stark sind, zeigen die Streifen eine teilweise Einspannung der Platte und Torsion der Unterzüge. Die Moiré-Streifen und der Momentenverlauf werden in den Bildern 9 und 10 gezeigt. Zuletzt ist noch die frei aufliegende Platte auf starren Wänden, ohne Befestigung der Ecken, dargestellt. Diese Lösung ist gut bekannt (Bilder 11 und 12).

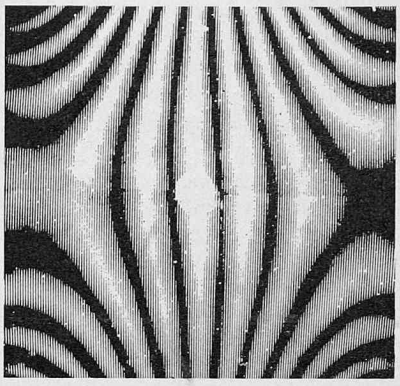
Ergebnisse

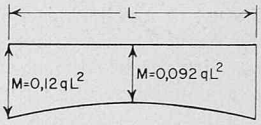
1. Durchbiegungen

Die Moiré-Streifen ermöglichen die Ermittlung der Durchbiegung, da sie die erste Ableitung oder den Drehwinkel in der Richtung senkrecht zu dem Netz darstellen. Aus dem Diagramm $\frac{\partial w}{\partial x}$ durch die Mitte der Platte erhalten wir:

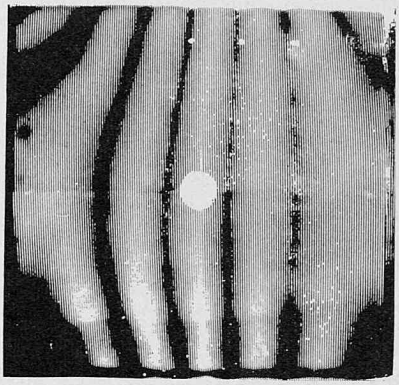
$$w_c = w_a + \int \frac{\partial w}{\partial x}\,dx$$

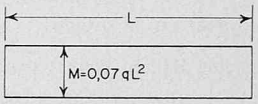
w_c = Durchbiegung in Plattenmitte
w_a = Durchbiegung der Mitte des Randbalkens



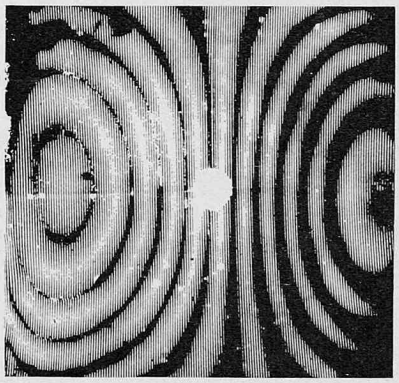


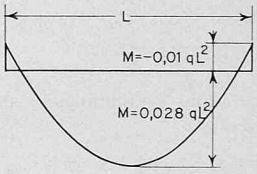
Bilder 5 und 6. Moiré-Interferenzlinien und Biegemomente für den Fall a: $\gamma = 0$



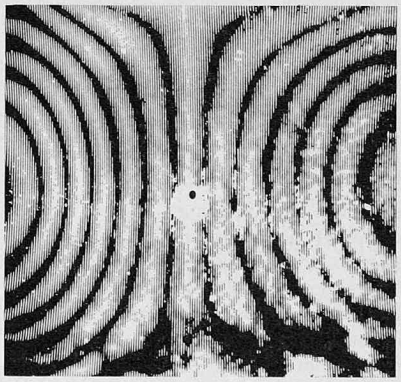


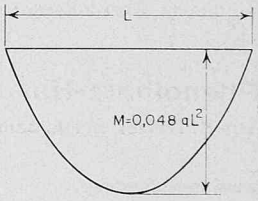
Bilder 7 und 8. Moiré-Interferenzlinien und Biegemomente für den Fall b: $\gamma \cong 1$





Bilder 9 und 10. Moiré-Interferenzlinien und Biegemomente für den Fall c: $\gamma = 6$





Bilder 11 und 12. Moiré-Interferenzlinien und Biegemomente für den Fall d: $\gamma = \infty$ (frei aufgelagerte Platte)

Der Wert w_a ergibt sich aus einem Schnitt durch die Ecke entlang der Randlinie. Auf diese Weise erhalten wir die folgenden Durchbiegungen in der Mitte der Platte entsprechend verschiedenen Werten für γ:

$\gamma = 0 \qquad w_c = 0{,}028\, q\, L^4/D$
$\gamma = 1 \qquad w_c = 0{,}013\, q\, L^4/D$
$\gamma \simeq 6 \qquad w_c = 0{,}003\, q\, L^4/D$

2. Biegemomente

Die analytischen Werte der Biegemomente unter Berücksichtigung der Zusammenwirkung in Bild 1, Fall a (für eine quadratische

Platte mit gleichförmiger Last und alle Werte von γ) überschreiten die Werte für die frei aufliegende Platte. Verglichen mit den Werten aus den Moiré-Versuchen (einschl. Plattenbalkenwirkung) können zwei unterschiedliche Gruppen umrissen werden.

a) Für $\gamma \leqslant 1$ besteht eine gute Übereinstimmung zwischen analytischen und experimentellen Werten.

b) Für $\gamma > 1$ erfolgt eine beträchtliche Entlastung des Momentes in Plattenmitte, und ein negatives Biegemoment erscheint entlang des Randes (Bild 13).

Für $\gamma = 6$ nähert sich dieser Wert des positiven Moments praktisch dem Wert einer eingespannten Platte. Es ist interessant festzustellen, dass die negativen Momente entlang des Randes nicht die Werte der Momente einer eingespannten Platte erreichen. Die Platte scheint Zugspannungen zu entwickeln, die zusammen mit den Randmomenten die Unterzüge verdrehen.

Es soll versucht werden, die Ergebnisse für $\gamma = 6$ unter folgenden Annahmen zu prüfen:

a) Die Balken biegen sich in der Senkrechten nicht durch.

b) Der Rand erfährt keine horizontalen Verschiebungen.

c) Die Durchbiegung der Platte ist

$$w = w_c \cos \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi y}{2a} .$$

Die Zugspannung, die notwendig ist, um diese Verschiebungen zu vermeiden, und die entsprechenden maximalen Biegemomente werden nach *J. Prescott* [4]

$$T = \frac{\pi^2 E w_c^2}{8(1-\mu^2)} \left(\frac{2-\mu^2+\mu}{L^2} \right)$$

(A)

$$M = \frac{\pi^2 E w_c d^3}{12} \left(\frac{1+\mu}{L^2} \right) .$$

Die Durchbiegung der Mitte muss der folgenden Beziehung genügen:

$$\frac{16}{\pi^6} q = \frac{E d^3 w_c}{48 L^4} + \frac{E d w_c^3}{2} \left\{ \frac{\mu}{L^4} + (3-\mu^2) \frac{32}{L^4} \right\} .$$

Von den Versuchswerten erhalten wir

$$w_c = 0{,}003\, q\, L^4/D .$$

Wenn wir diesen Wert in (A) einsetzen, erhalten wir

$$M = 0{,}035\, q\, L^2 .$$

Zu diesem Wert addieren wir den Einfluss eines gleichförmigen Moments entlang des Randes, vom Moiré-Versuch ausgemessen, in der Mitte [3]. Im Falle einer quadratischen Platte wird annähernd 60% dieses Momentes zur Mitte übertragen. Wir setzen dann endgültig den Wert fest mit

$$M = (0{,}035 - 0{,}006)\, q\, L^2 = 0{,}029\, q\, L^2 .$$

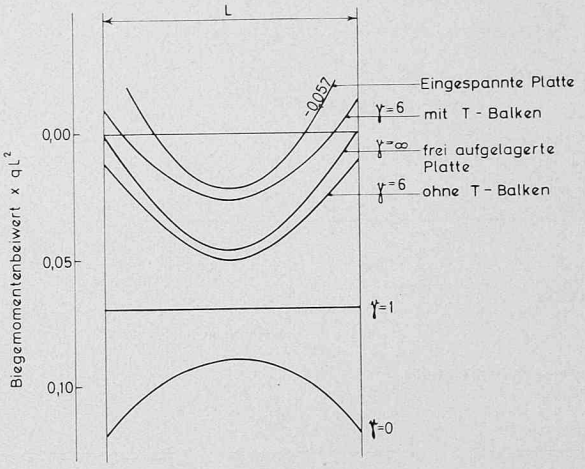


Bild 13. Darstellung der Abhängigkeit zwischen den Biegemomenten und den Beiwerten γ

Schlussfolgerungen

Aus den vorliegenden Untersuchungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

a) Die maximalen Biegemomente einer quadratischen Platte ändern sich mit der Steifigkeit der Randbalken.

b) Die Plattenbalkenwirkung ist verbunden mit der Membranwirkung bei Platten, die von starken Balken unterstützt werden.

c) Die Aussteifung der Randbalken durch die angrenzende Platte vermindert die Übertragung der Biegemomente in den Stützen.

Literaturverzeichnis

[1] *Wood, R. H.:* Studies in Composite Construction, Part II. Research Paper No. 22, 1955.

[2] *Ligtenberg, F. K.:* The Moiré Method, a New Experimental Method for Determination of Moments. «Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis», Vol. XII, No. 2, 1955.

[3] *Timoshenko, S. P.:* Theory of Plates and Shells, 1959.

[4] *Prescott, J.:* Applied Elasticity, 1946.

Adresse des Verfassers: Dr. *A. Rabinovici,* dipl. Ing., Ingenieurbüro Emch & Berger, Gartenstrasse 1, 3000 Bern.

Phenolharz-Hartschaum, ein neues Kunststoff-Isolierprodukt

DK 662.998:679.562

Von **K. Trefzer** und **A. Baldesberger,** Chemisch-Technische Werke, Muttenz

Zusammenfassung

Phenolharzschaum ist ein spröd-harter Schaumstoff aus Phenol-Formaldehyd-Harz. Im Vergleich zu anderen Schaumstoffen besitzt er einige besondere Vorzüge. Seine Herstellung aus einem Phenolharz ist relativ einfach und kann kontinuierlich und diskontinuierlich erfolgen; es sind dabei sowohl Kalt- als auch Warmverschäumungen möglich. Im folgenden wird auf Herstellung, Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung näher eingegangen.

Herstellung

Durch Vermischen eines mittelflüssigen (Viskosität bei 20 °C 3000 bis 5000 cP), neutral reagierenden Phenol-Resols, dessen B-Zeit auf der Heizplatte bei 130 °C etwa 7 Minuten beträgt, mit einem Treibmittel und einem Säurehärter können Phenolharzschäume vom Raumgewicht 30 kg/m³ bis zum Raumgewicht 100 kg/m³ und höher hergestellt werden. Die Verschäumungen lassen sich kontinuierlich, im allgemeinen aber diskontinuierlich sowohl als Warm- wie auch als Kaltverschäumungen durchführen.

Bei der diskontinuierlichen Verschäumung, wie sie neuerdings in den Chemisch-Technischen Werken AG in Muttenz durchgeführt wird, wird das Harz mittels eines starken und schnellaufenden Rührers in einem einfachen Stahlblech- oder Kunststoffbehälter zunächst mit dem Treibmittel und dann mit dem Säurehärter innig vermischt. Die Ausgangstemperatur des Harzes beträgt bei Warmverschäumungen etwa 15 bis 25 °C, während bei Kaltverschäumungen etwa 22 bis 30 °C erforderlich sind. Als Treibmittel wird meistens n-Pentan verwendet, während als Härter neben Schwefel- und Phosphorsäure auch Salzsäure eingesetzt werden kann.

Die Mengen des erforderlichen Treibmittels und der Säure richten sich nach der gewünschten Dichte des Schaumes und betragen etwa 5 bis 15% Pentan und 5 bis 15% Säurehärter. Die Mischung wird danach in eine aufklappbare Form gegossen. Diese ist zweckmässig eine 0,25 m³ bis 1 m³ grosse Kastenform, die zum Beispiel aus Spanplatten, Sperrholz oder Eisenblech, verstärkt durch Winkeleisen, bestehen kann. Zum besseren Lösen des fertigen Schaumes wird die Form mit Papier oder Polyaethylenfolie ausgekleidet oder mit einem speziellen Trennmittel versehen.

Bei einer Kaltverschäumung dauert der Treibprozess etwa 10 Minuten. Nach dieser Zeit ist das maximale Schaumvolumen erreicht. Die Aushärtung (bei Zimmertemperatur) benötigt 1 bis 2 Stunden. Im Falle einer Warmverschäumung erfolgen Hochschäumen und Aushärtung binnen 24 Stunden im Wärmeofen bei etwa 60 °C.

Nach der Entformung und einer gewissen Lagerung wird der