

# Deformations- und Spannungsuntersuchungen beim Dreifachstrangpressen mit Hilfe des Moiréverfahrens

Ralf Burckhardt

## 1. Einleitung

Die ständig steigende Bedeutung der Umformverfahren erfordert in immer stärkerem Maße die Bereitstellung wissenschaftlicher Erkenntnisse der „Mechanischen Umformtechnik“ mit dem Ziel, diese Verfahren kostengünstiger und effektiver zu gestalten. Das Mehrfachstrangpressen ist dabei volkswirtschaftlich besonders interessant, es arbeitet energieökonomisch und verlustarm. Als Beispiel wurde das Dreifachstrangpressen gewählt. Bei leichtverformbaren Werkstoffen hat es sich gut bewährt. Jedoch sind bei Stahl und anderen schwerverformbaren Werkstoffen die Anforderungen an Presse, Werkzeug und Schmierung sehr viel höher, so daß die Ergebnisse bis heute noch nicht befriedigen konnten. Es sollen deshalb zur Verbesserung dieser Halbfabrikate Aussagen über den Werkstofffluß, die Beanspruchung der Preßmatrize und das Entstehen von Zugspannungen getroffen werden.

Zur Untersuchung des plastischen Fließens bei diesem komplizierten Umformproblem eignet sich das Moiréverfahren aus der experimentellen Festkörpermechanik sehr gut. Da Versuche an der Hauptausführung wegen den meist auftretenden hohen Geschwindigkeiten, großen Kräften und erhöhten Temperaturen nicht zu realisieren sind, wurden Modellversuche durchgeführt. Als Modellmaterial bewährte sich die eutektische Blei-Zinn-Legierung, deren superplastisches Verhalten mit den Warmfließkurven von Stahl näherungsweise ähnlich ist [1]. Zur Erzielung eines möglichst homogenen und feinkörnigen Gefüges wurde das Modellmaterial auf einer 16000/4000-kN-Stahlstrangpresse vorverformt.

## 2. Preßwerkzeug und Kontur der Matrize

Die Kontur der Preßmatrize im Modellversuch sollte eine wirklichkeitstreuere Nachbildung des realen Umformprozesses sein. Dort bildet sich in den Ecken des zylind-

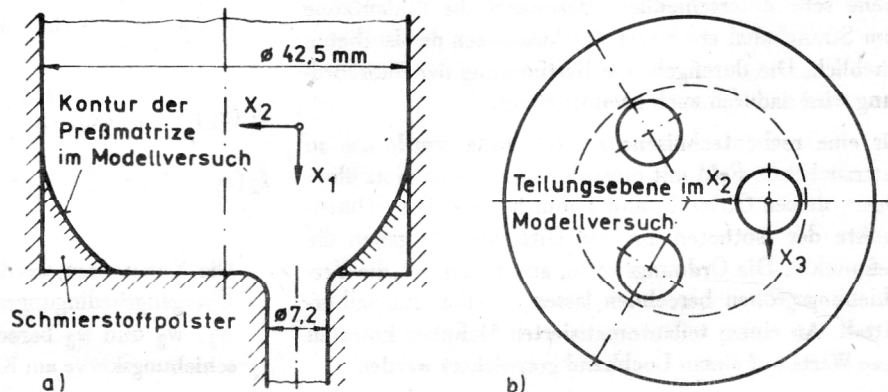
rischen Blockaufnehmers ein Schmierstoffpolster. Anhand von Preßresten wurde diese Geometrie als Durchschnittswert bestimmt [2]. Bild 1 zeigt die geometrischen Verhältnisse. Die Teilungsebene für den Modellversuch ist eine Symmetrieebene.

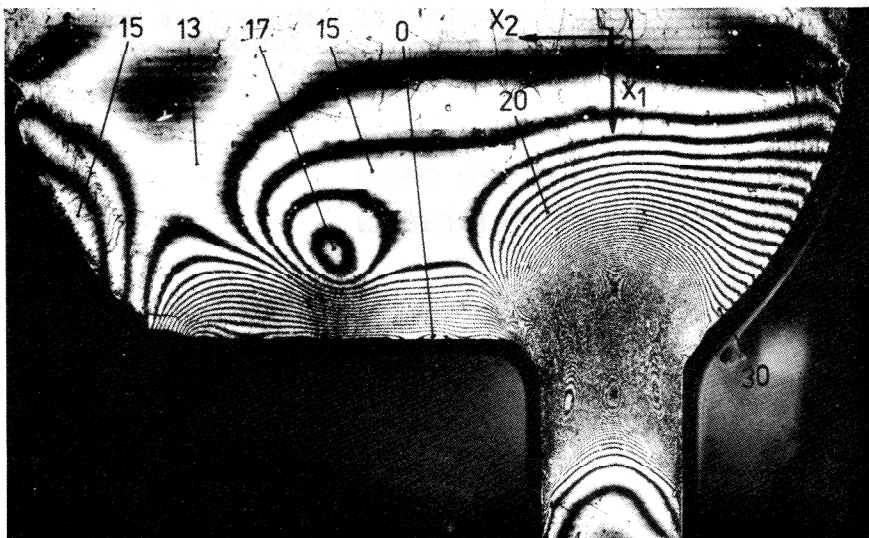
Das Preßwerkzeug mußte sehr robust konstruiert werden, um bei Belastung durch die hohen Umformkräfte das elastische Verhalten zu minimieren. Der Blockaufnehmer (Container) besteht aus zwei Hälften, um ein deformationsfreies Ein- und Ausbauen der Probekörper zu ermöglichen. Die Teilungsebene des Containers steht rechtwinklig zur Teilungsebene des Modells. Zum Ausdrücken des stranggepreßten Modells aus der ungeteilten Matrize ist eine Vorrichtung erforderlich. Für eine gute Schmierung zur Simulation der Reibungsverhältnisse an der Hauptausführung (Glasschmierung) wurde eine PTFE-Paste (Molykote D) verwendet.

## 3. Herstellung der Isothetenbilder

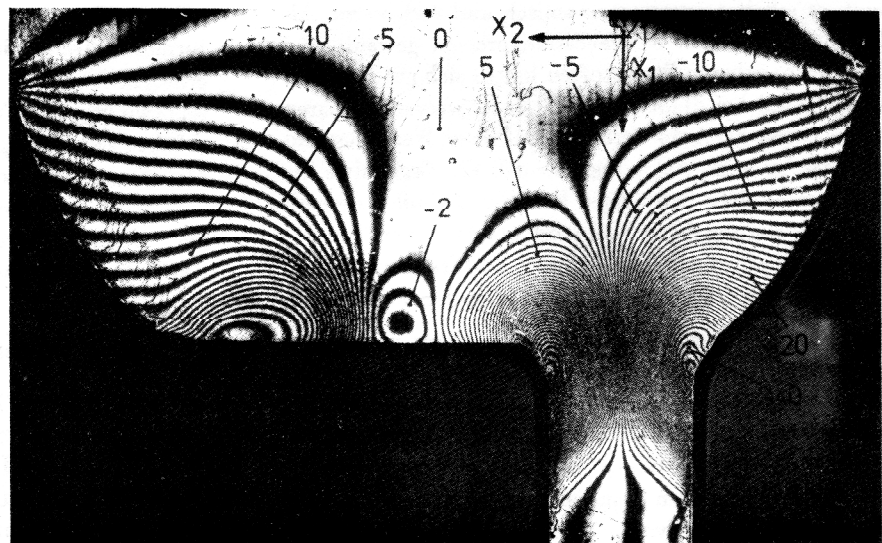
Die zylindrischen Probekörper wurden zuerst bis zu einer bestimmten geometrischen Form vorgepreßt. Nach dem Teilen jedes Dreifachpreßstückes konnten in der Teilungsebene übertragbare Indium-Kreuzraster (Rasterteilung  $p = 0,04$  mm) als Objektraster aufgeklebt werden. Die nun zu einer neuen Probe zusammengefügt Stranghälften wurden wieder in das Preßwerkzeug eingesetzt, und der Fließvorgang um ein kleines Zeitintervall  $\Delta t$  weitergeführt. Diese Versuchsdurchführung ist von Naumann in [3] vorgeschlagen worden. Die Bedingung für das Arbeiten mit geteilten Proben, das Vorhandensein von Druckspannungen normal zur Teilungsebene, ist erfüllt.

**Bild 1**  
Geometrische Verhältnisse beim Dreifachstrangpressen im Modellversuch  
a) Ansicht der Teilebene  
b) Draufsicht





**Bild 2**  
 Isothermbilder beim Dreifachstrangpressen  
 Objekt- und Bezugsraster  $p = 0,04 \text{ mm}$   
 Stempelgeschwindigkeit  $v = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$   
 Stempelweg  $s = 0,52 \text{ mm}$   
 Zeitintervall  $\Delta t = 31 \text{ s}$   
 Preßkraft  $F = 200 \text{ kN}$   
 a) Verschiebung in  $x_1$ -Richtung



b) Verschiebung in  $x_2$ -Richtung

Die wieder ausgebauten Proben mit dem deformierten Objektraster wurden mit einem Bezugsraster überlagert. Bild 2 zeigt die entstandenen Isothermbilder [4].

#### 4. Ausmessen der Isothermbilder

Da die Isothermbilder in der Teilungsebene der Dreifachstrangproben keine Symmetrie aufweisen, ist das gesamte Feld in die Auswertung einzubeziehen. Dies erfordert eine wesentliche Erhöhung des Auswerteaufwandes. Weiterhin ist die Dichte der Isothermen über die Teilungsebene sehr unterschiedlich. Besonders die Einlaufzone zum Strangkanal erschwert das Ausmessen der Isothermen erheblich. Die durchgehende Bestimmung der Moiréordnung wird dadurch auch beeinträchtigt.

Für eine rechentechnische Aufbereitung wurde das zu untersuchende Feld mit einem quadratischen Netz überzogen, dessen Gitterabstand 1 mm beträgt. Die Schnittpunkte der Isothermen mit den Gitterlinien ergaben die Meßpunkte. Die Ordnungswerte, aus denen sich die Verschiebungsgrößen berechnen lassen, wurden manuell ermittelt. An einem teilautomatisierten Meßplatz konnten diese Werte auf einem Lochband gespeichert werden.

#### 5. Versuchsauswertung unter Anwendung von Spline-Funktionen

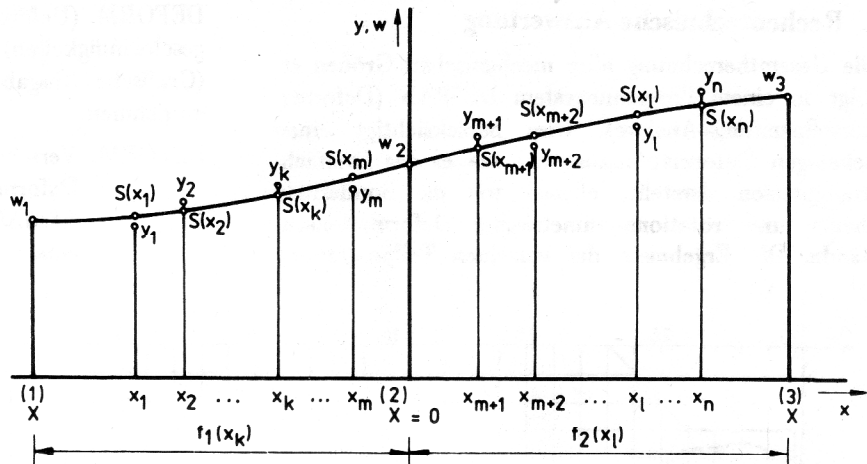
Ausgangspunkt für die weitere Berechnung der Deformationen, Deformationsgeschwindigkeiten und Spannungen an den Knoten des quadratischen Netzes ist die numerische Differentiation der Verschiebungskurven. In der Umgebung eines Knotens wird eine kubische Spline-Funktion [5] mit 2 Abschnitten aufgebaut, die beliebig viele Meßstellen nach beiden Seiten vom Knoten aus zur Rechnung zuläßt (Bild 3).

Am Knoten ergeben sich folgende Funktionen:

$$f_1(x_k) = A_1 \cdot (x_k - x)^{(1)}_3 + A_2 \cdot (x_k - x)^{(1)}_2 + A_3 \cdot (x_k - x)^{(1)}_1 + A_4$$

$$f_2(x_1) = B_1 \cdot x_1^3 + B_2 \cdot x_1^2 + B_3 \cdot x_1 + B_4$$

Die Konstanten werden mit entsprechenden Rand- und Übergangsbedingungen als Funktionen der Splinewerte  $w_1$ ,  $w_2$  und  $w_3$  berechnet. Die Differentiation der Verschiebungskurve am Knoten erfolgt mit



$$\frac{dw_2}{dx} = f_1'(x_k = x) = f_2'(x_1 = x)$$

zu

$$w_2'(w_1, w_2, w_3) = w_1 \cdot \frac{\binom{3}{x}}{\binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x-x}} - w_2 \cdot \frac{\binom{1}{x} \binom{3}{x+x}}{\binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x}} - w_3 \cdot \frac{\binom{1}{x}}{\binom{3}{x} \cdot \binom{3}{x-x}}$$

Für die Ermittlung der Splinewerte an den Stützstellen wird ein Ausgleich mit Hilfe des Fehlerquadratminimums verwendet:

$$\sum_{k=1}^m [f_1(x_k) - y_k]^2 + \sum_{l=m+1}^n [f_2(x_l) - y_l]^2 \Rightarrow \text{Min.}$$

wobei m die Anzahl der Meßstellen vor und (n-m) die Anzahl der Meßstellen nach dem betrachteten Knoten sind.

Die Werte der Spline-Funktionen an den Meßstellen ergeben sich zu:

$$S_1(x_k) = w_1 \cdot C_{11}(x_k) + w_2 \cdot C_{12}(x_k) + w_3 \cdot C_{13}(x_k)$$

$$S_2(x_1) = w_1 \cdot C_{21}(x_1) + w_2 \cdot C_{22}(x_1) + w_3 \cdot C_{23}(x_1)$$

mit

$$C_{11}(x_k) = \frac{x_k \cdot [x_k \cdot \binom{1}{x_k-x} + 2 \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x-x_k}]}{2 \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x-x}}$$

$$C_{12}(x_k) = - \frac{(x_k - x) \cdot [2 \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x-x_k} - x_k^2]}{2 \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x}}$$

$$C_{13}(x_k) = \frac{x_k \cdot (x_k - x) \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x-x_k}}{2 \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x} \cdot \binom{3}{x-x}}$$

**Bild 3**

Kubische Spline-Funktion mit 2 Abschnitten an einem Knoten

$x_k, x_1$  Meßstellen

$y_k, y_1$  Meßwerte (Ordnung · Teilung)

$\binom{1}{x} \dots \binom{3}{x}$  Stützstellen der kubischen Spline-Funktion

$w_1 \dots w_3$  Splinewerte an den Stützstellen

$S_1(x_k), S_2(x_1)$  Splinewerte an den Meßstellen

$$C_{21}(x_1) = \frac{x_1 \cdot \binom{3}{x-x_1} \cdot \binom{3}{2x-x_1}}{2 \cdot \binom{1}{x} \binom{3}{x} \cdot \binom{3}{x-x}}$$

$$C_{22}(x_1) = - \frac{(x-x_1) \cdot [2 \cdot \binom{3}{x} \cdot \binom{1}{x_1-x} - x_1^2]}{2 \cdot \binom{1}{x} \cdot \binom{3}{x}^2}$$

$$C_{23}(x_1) = \frac{x_1 \cdot [x_1 \cdot \binom{3}{x-x_1} + 2 \cdot \binom{3}{x} \cdot \binom{1}{x_1-x}]}{2 \cdot \binom{3}{x}^2 \cdot \binom{3}{x-x}}$$

Die weitere Rechnung führt auf ein lineares Gleichungssystem, das mit der bekannten Quadratwurzelmethode gelöst wird.

## 6. Spannungsberechnung

Zur Ermittlung des Spannungsdeviators wurde ein allgemeines Stoffgesetz der Form

$$S_{ij} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sigma \left( \sqrt{\frac{4}{3}} \cdot \dot{I}_2 \right) \cdot \frac{\dot{\epsilon}_{ij}}{\sqrt{\dot{I}_2}}$$

verwendet, wobei  $\sigma \left( \sqrt{\frac{4}{3}} \cdot \dot{I}_2 \right) = \sigma(\dot{\epsilon})$  den Zusammen-

hang zwischen der Spannung  $\sigma$  und der Deformationsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  aus durchgeführten Zylinderstauchversuchen darstellt [1].

## 7. Rechentechnische Auswertung

Die Gesamtberechnung aller mechanischen Größen erfolgt in einem Programmsystem DESPAN (Deformations-Spannungs-Analyse). Dies berücksichtigt einen beliebigen Deformationszustand, wie es das Dreifachstrangpressen darstellt, ebenso wie die Sonderfälle ebener und rotationsymmetrischer Deformationszustände. Die Ergebnisse der einzelnen Teilprogramme

DEFORM (Deformationen), DEFGES (Deformationsgeschwindigkeiten), SPANN (Spannungen) und GRAFIK (Grafische Ausgabe) sind aus folgender Übersicht zu entnehmen:

DEFORM: Verschiebungen  
 Deformationsgrößen  
 ALMANSISCHER Verzerrungstensor  
 einachsige Vergleichsdehnung

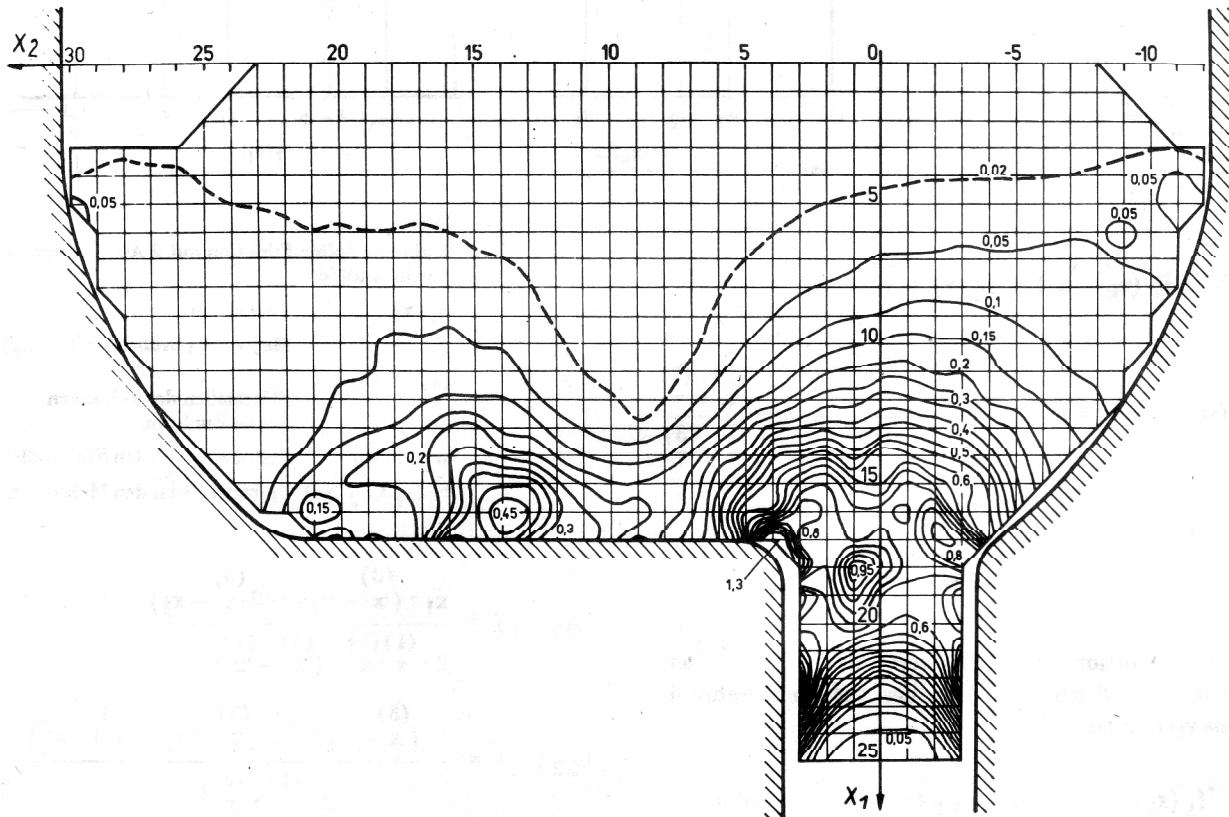


Bild 4  
 Feld der einachsigen Vergleichsdehnung  $\epsilon_v$

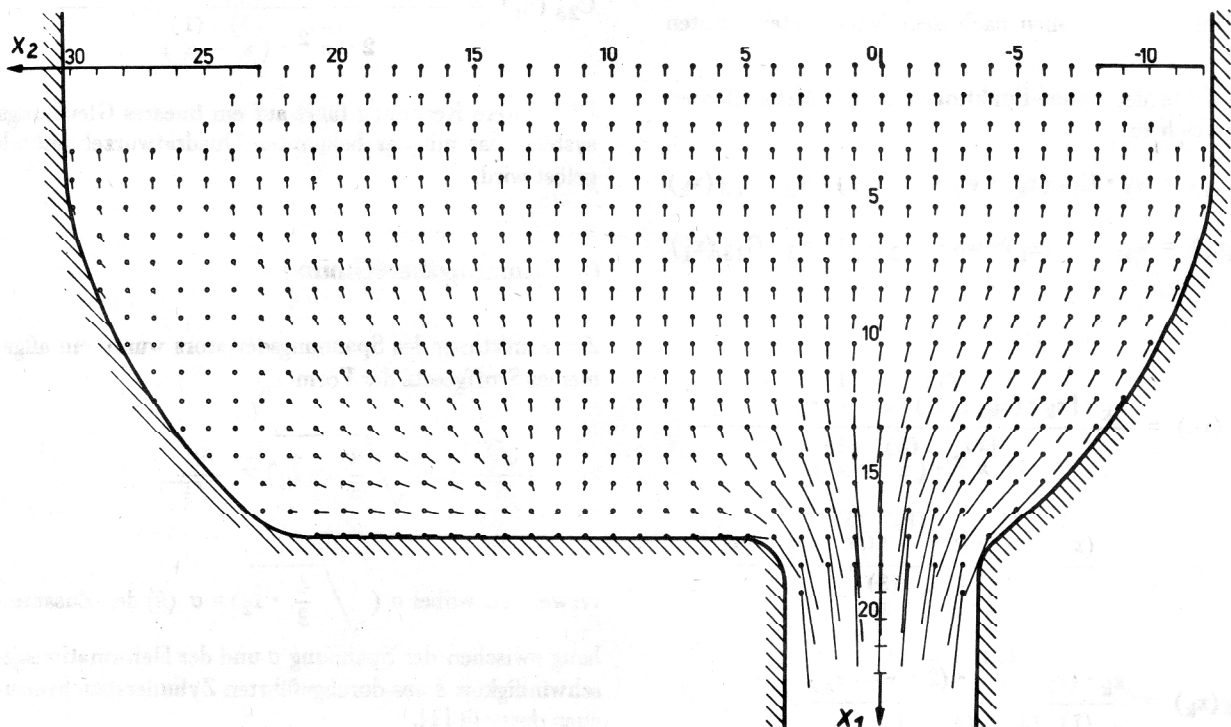


Bild 5  
 Feld des Geschwindigkeitsvektors  $v_i$

DEFGES: Geschwindigkeiten  
 Deformationsgeschwindigkeiten  
 Rotation  
 Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit  
 Richtungen der Hauptschubspannungen

SPANN: deviatorische Spannungen  
 mittlere Normalspannung (nur für ebenen  
 und rotationssymmetrischen Deformations-  
 zustand)

GRAFIK: Ausgabe jeder interessierenden Größe in  
 Form eines  
 a) Bilddruckes:  
 Die jeweilige Größe wird für jeden Kno-  
 ten ausgedrückt, die Anordnung ist ent-

sprechend dem quadratischen Netz darge-  
 stellt, und  
 b) Punktedruckes:  
 Parameter erlauben das Zeichnen von Hö-  
 henlinien.

## 8. Ergebnisse

An ausgewählten Feldern soll die Leistungsfähigkeit des  
 Programms und die Kompliziertheit des Verpressens  
 durch Dreifachmatrizen verdeutlicht werden. Bild 4 zeigt  
 die einachsige Vergleichsdehnung  $\epsilon_v$ , Bild 5 das Feld des  
 Geschwindigkeitsvektors  $v_i$ , Bild 6 die Vergleichsdefor-

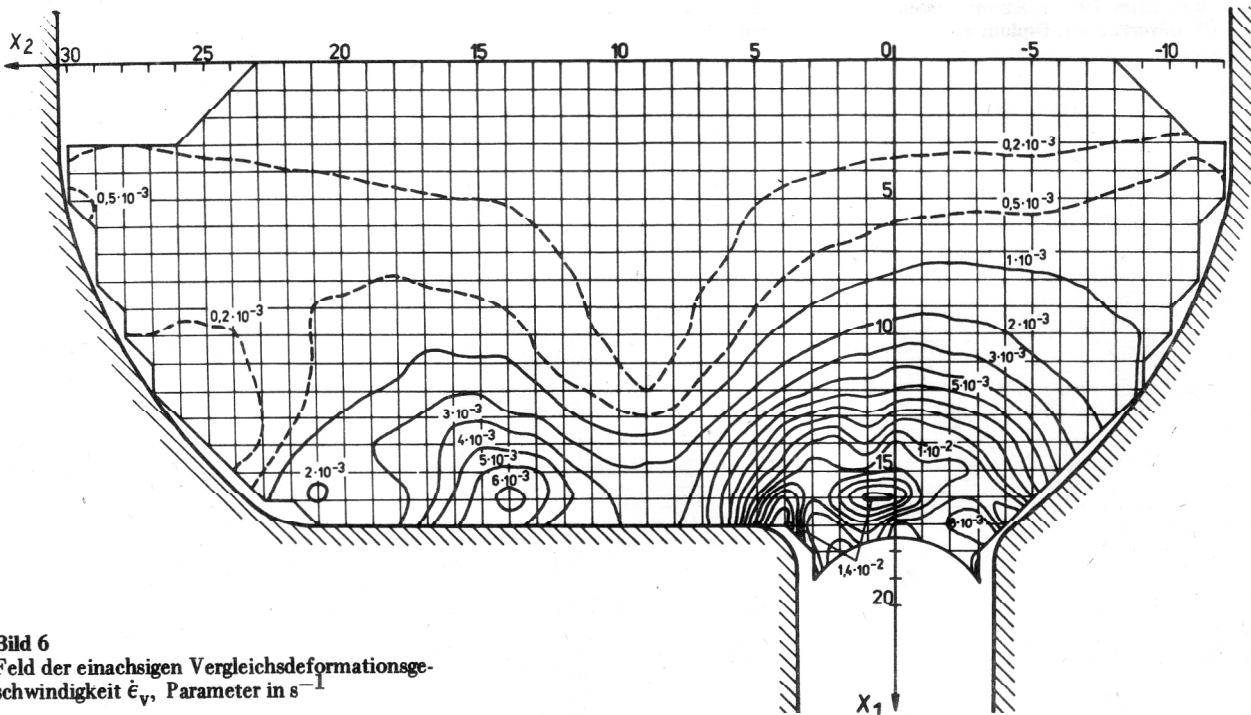


Bild 6  
 Feld der einachsigen Vergleichsdeformationsge-  
 schwindigkeit  $\dot{\epsilon}_v$ , Parameter in s

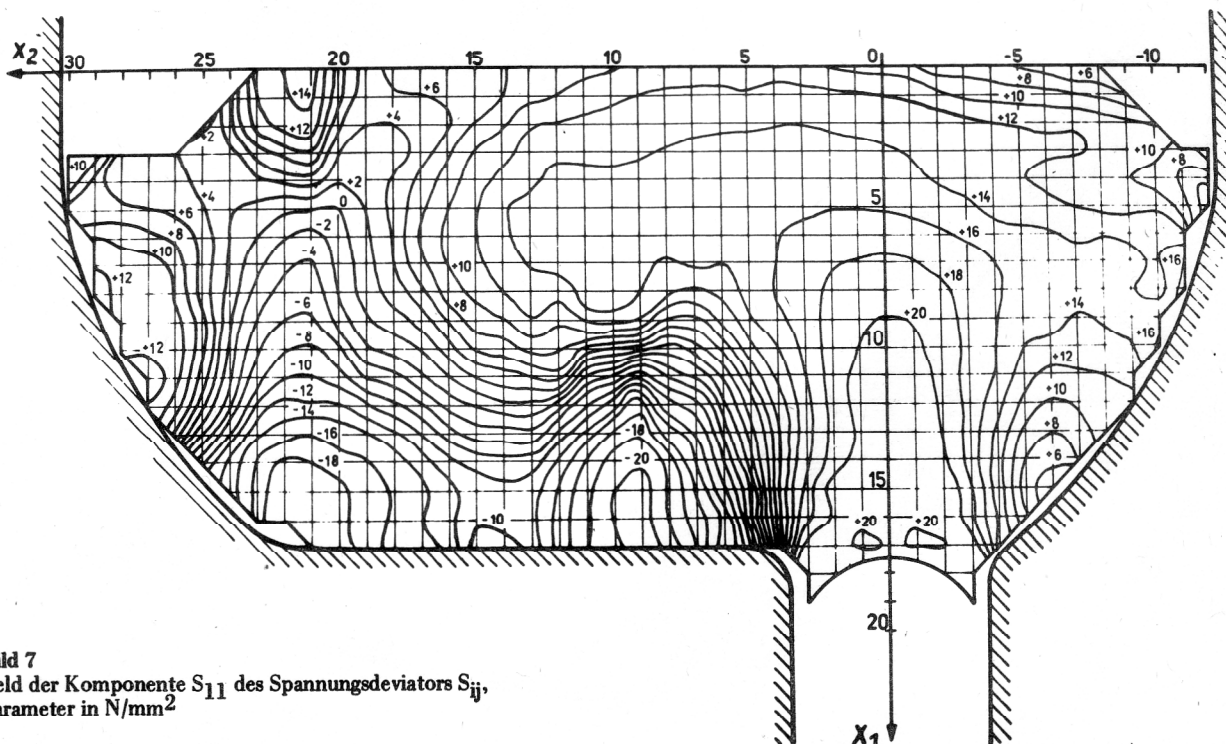


Bild 7  
 Feld der Komponente  $S_{11}$  des Spannungsdeviators  $S_{ij}$ ,  
 Parameter in  $N/mm^2$

mationsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_v$  und Bild 7 die deviatorische Spannung  $S_{11}$ .

Mit diesen Ergebnissen kann der Werkstofffluß genauer erfaßt werden. Es lassen sich zum Beispiel durch das Erkennen von Zugzonen im Strang einlauf Schlüsse ableiten, die die Fehler bei den Halbfabrikaten in Form von Rissen und anderen Oberflächenstrukturen vermeiden sollen.

#### LITERATUR

- [1] Naumann, J.: Anwendung des Moiréverfahrens zur experimentell-theoretischen Analyse von Umformvorgängen. In: Kreißig, R., Drey, K.-D., Naumann, J.: Methoden der Plastizität. Anwendung auf Umformprobleme. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1980.
- [2] Walter, G.: Experimentelle Ermittlung von Isothetenbildern beim Dreifachstrangpressen durch Anwendung des Moiréverfahrens. Diplomarbeit, TH Karl-Marx-Stadt 1976.

- [3] Naumann, J.: Beiträge zur experimentellen Untersuchung plastischer Fließvorgänge mit dem Moiréverfahren. Dissertation A, TH Karl-Marx-Stadt 1974.
- [4] Krause, R.: Untersuchung des Dreifachstrangpressens bei unterschiedlicher Matrizengeometrie mit Hilfe des Moiréverfahrens. Diplomarbeit, TH Karl-Marx-Stadt 1977.
- [5] Späth, H.: Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen, Verfahren der Datenverarbeitung. R. Oldenbourg Verlag München – Wien 1973.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Ralf Burckhardt  
Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt  
Sektion Maschinen-Bauelemente  
Wissenschaftsbereich Mechanik  
9010 Karl-Marx-Stadt  
PSF 964