

# Specklefotografische Deformations- und Spannungsanalyse torsionsbeanspruchter Längspreßverbindungen

Jürgen Vogel

## 1. Einleitung

Wie bekannt, sind Preßverbindungen fertigungs- und montagegünstige Wellen-Naben-Verbindungen. Sie werden zunehmend zur Übertragung hoher statischer bzw. dynamischer Kräfte und Momente eingesetzt und substituieren, wo es funktionell möglich ist, konventionelle Verbindungselemente, wie Paßfeder- und Klemmverbindungen. Parallel zur Weiterentwicklung der Preßverbindung selbst – wobei sich die Forschungsarbeiten in den zurückliegenden Jahren unter anderem auf die Schaffung von Berechnungsalgorithmen zur Dimensionierung von Preßverbindungen [1] bis [4], auf Untersuchungen zum Übertragungsverhalten bei äußerer statischer und dynamischer Belastung [5] bis [8] sowie auf die Entwicklung neuartiger Verbindungen mit beschichteten Paßflächen [9] konzentrierten – ist es erforderlich, ihr Übertragungsverhalten unter äußerer Belastung experimentell exakt zu erfassen.

Zur quantitativen statischen Verformungs- und Spannungsanalyse folgender Problemkreise

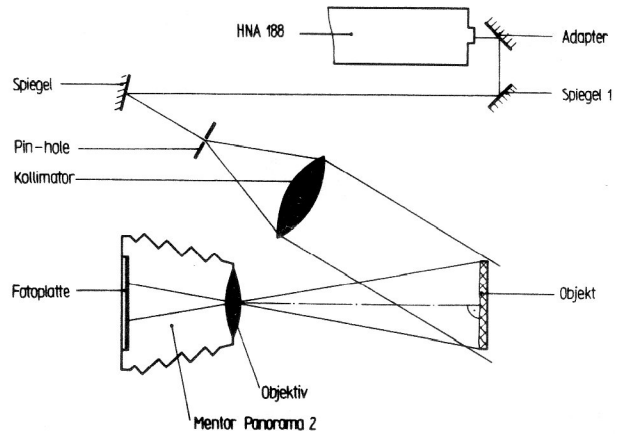
- Analyse des Verschiebungs- und Spannungsverlaufs in radialer Richtung,
- Bestimmung der Länge der Gleitzone in Abhängigkeit von der Last und
- Ermittlung des Übertragungsverhaltens längs der Paßfuge

erscheint die Specklefotografie als sensibles, hochgenaues kohärent-optisches Feldmeßverfahren geeignet. In grundsätzlichen Versuchen wird die Anwendbarkeit des Verfahrens für diese spezielle Klasse von Bauteilen getestet. Dazu wird das Verfahren methodisch weiterentwickelt und an den speziellen Untersuchungsgegenstand angepaßt. Als Versuchsobjekt wird eine Längspreßverbindung unter zusätzlicher äußerer Belastung gewählt.

## 2. Grundprinzip der Specklefotografie

Die Specklefotografie gestattet eine berührungslose Deformations- und Spannungsanalyse mechanisch bzw. thermisch beanspruchter Bauteile [10] bis [18], wobei der Speckleeffekt als Meßinformation genutzt wird. Bei Anwendung der Doppelbelichtungstechnik lassen sich unter der Voraussetzung einer fokussierten Abbildungsoptik die in-plane Komponenten des Verschiebungsvektors für ein definiertes Belastungsintervall ermitteln.

Die Specklefotografie basiert auf einer Einstrahlbeleuchtung von Reflexions- bzw. Transmissionsobjekten sowohl mit divergentem als auch mit parallelem Licht. Bild 1. Durch Wahl einer geeigneten Aperturblende für



**Bild 1**  
 Meßplatz zur Aufzeichnung von Specklegrammen

die abbildende Optik der Kamera läßt sich die Empfindlichkeit des Verfahrens der jeweiligen Meßaufgabe anpassen. In diesem ersten Schritt der Versuchstechnik, der Aufzeichnung der Meßinformation, wird das Objekt mit dem ihm überlagerten Specklemuster im unbelasteten und belasteten Zustand auf dem gleichen Detektor, z. B. einer hochauflösenden Fotoplatte, gespeichert.

Dieses sogenannte Specklegramm wird in einem zweiten Schritt mit einem unaufgeweiteten Laserstrahl in diskreten Punkten (Knoten) abgerastert, Bild 2. Durch Beugung des Strahls am gegen sich selbst verschobenen Specklemuster formiert sich auf einem dahinterliegenden Projektionsschirm ein mit geraden, äquidistanten YOUNG-schen Streifen moduliertes Beugungshalo. Diese Streifen verlaufen orthogonal zur Projektion des Verschiebungsvektors  $\vec{u}$  auf die Objektebene. Ihr Abstand ist umgekehrt proportional zum Betrag des Verschiebungsvektors  $|\vec{u}|$ . Durch Erfassen des Neigungswinkels  $\psi$  gegenüber einem raumfesten Koordinatensystem ergeben sich die Verschiebungskomponenten  $u_1$  und  $u_2$  aus

$$u_1 = (\lambda l N / \beta' b_N) \sin \psi \quad (1.1)$$

$$u_2 = (\lambda l N / \beta' b_N) \cos \psi \quad (1.2)$$

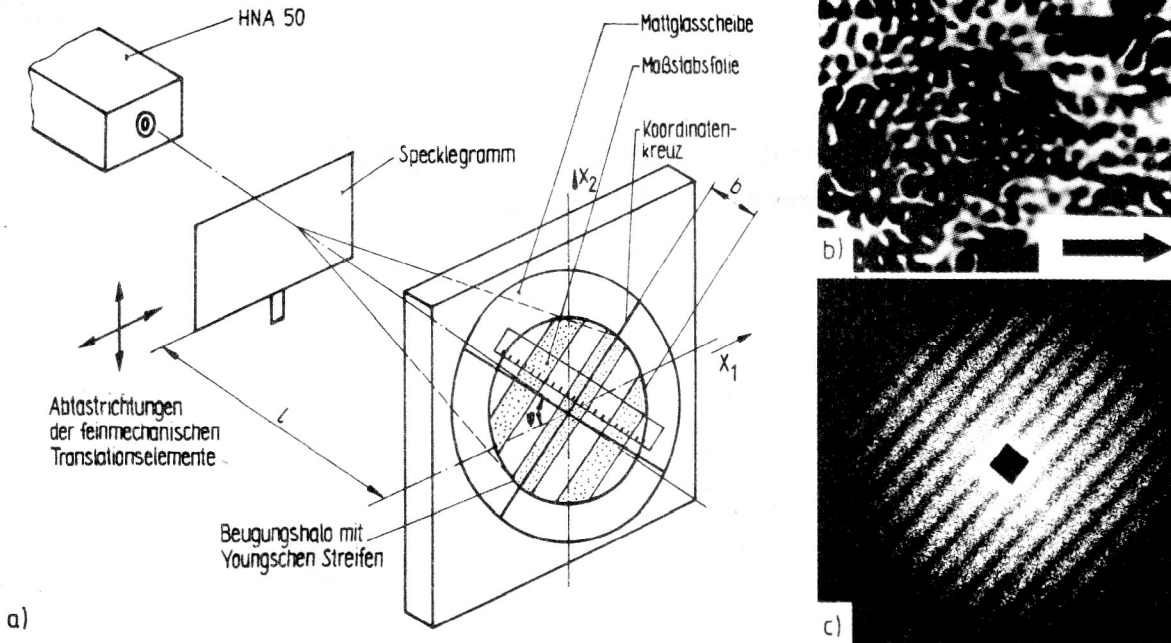
mit

$\lambda$  ... Wellenlänge

$l$  ... Abstand Specklegramm – Schirm

$\beta'$  ... Abbildungsmaßstab (Bild-/Objektgröße)

$b_N$  ... Abstand zwischen (N+1) Youngschen Streifen.



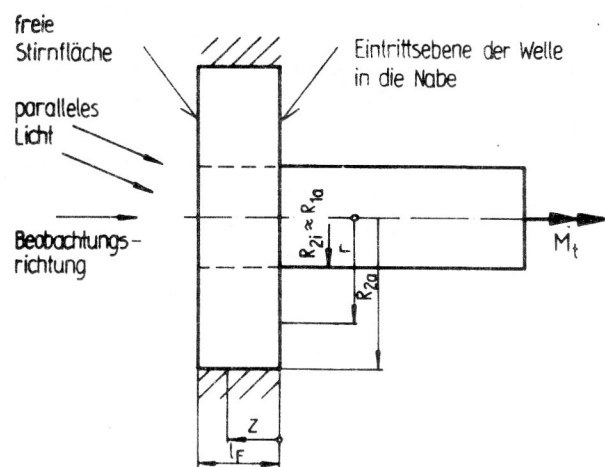
**Bild 2**

Auswertekonfiguration zum punktwisen Scannen von Specklegrammen (a); Mikroaufnahme eines doppelbelichteten Specklegramms bei horizontaler Objektverschiebung (b) und mit Youngschen Streifen moduliertes Beugungshalo (c)

Dabei liegt der Richtungssinn nicht a priori vor, sondern ist dem konkreten mechanischen Sachverhalt zu entnehmen. Möglichkeiten zur Erhöhung der Meßgenauigkeit werden in [18], [19] und einer rechnergestützten Bildauswertung in [20] bis [22] diskutiert.

### 3. Deformations- und Spannungsanalyse torsionsbeanspruchter Längspreßverbindungen

Für die quantitative Deformations- und Spannungsanalyse mittels Specklephotografie wird als Lastfall eine torsionsbeanspruchte Längspreßverbindung gewählt. Dabei gestattet es das Verfahren im Auflicht, die in-plane Verschiebungen an der freien Stirnfläche berührungslos zu ermitteln, Bild 3.



**Bild 3**

Lastfall und Geometrie der Probe  
 $l_F = 20 \text{ mm}$ ,  $R_{2i} \approx R_{1a} = 12,5 \text{ mm}$ ,  $R_{2a} = 37,5 \text{ mm}$

Einflüsse der Paßfuge werden durch den Vergleich einer unter praxisnahen Bedingungen gefügten Verbindung und einer monolithischen Probe gleicher Geometrie erfaßt. Der Einsatz von Piacryl als Probenwerkstoff ermöglicht weiterhin Verformungsmessungen sowohl an der freien Stirnfläche als auch an der Eintrittsebene für die Nabe, das heißt, Untersuchungen im Inneren von Modellen.

#### 3.1. Versuchstechnik

Plastmodelle von Preßverbindungen benötigen im Vergleich zum Original nur kleine Drehmomente. Dadurch kann die infolge der Nachgiebigkeit der Belastungsvorrichtung auftretende Starrkörperbewegung, die der wirklichen Verschiebung überlagert ist, klein gehalten werden. Das monolithische Modell und ein Modell der Preßverbindung, bei dem lediglich auf der freien Stirnfläche gemessen wird, sind aus heißhärtendem Epoxidharz Epilox EG1 ( $E = 3400 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,35$ ) gefertigt, das sich durch ausgeprägtes elastisches Materialverhalten auszeichnet. Demgegenüber ermöglichen Piacrylmodelle ( $E = 2850 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,38$ ) auf Grund ihres hohen Transmissionsgrades [18] sowohl Messungen an der freien Stirnfläche als auch an der Nabe für die Eintrittsebene. Eine wichtige Voraussetzung zur Dimensionierung der Verbindungen bildet die Kenntnis der Haftreibungskoeffizienten für den Modellversuch. Wie einschlägige Tests von Proben aus Epilox EG1 belegen, bewegen sich diese Koeffizienten bei variabler Normalkraft für trockene Reibflächen zwischen 0,15 und 0,25 sowie bei mit Paraffin benetzten Kontaktflächen zwischen 0,18 und 0,28. Analoge Werte ergeben sich für Piacryl. Neben diesen Abschätzungen sind bezüglich der Dimensionierung folgende Kriterien zu beachten:

- Das Verhältnis Länge der Paßfuge zum Radius der Welle liegt mit  $l_F/R_{1a} = 1,6$  innerhalb des häufig genutzten Bereichs von  $1 \leq l_F/R_{1a} \leq 3$ .
- Die dickwandige Nabe  $R_{2a}/R_{1a} = 3$  gewährleistet, daß sich Paßfuge und feste Einspannung am Nabenumfang gegenseitig nicht beeinflussen.
- Um die zu messende Verschiebung in der freien Stirnfläche der Empfindlichkeit des Meßverfahrens anzupassen, wird ein vergleichsweise großes Übermaß von  $U = 350 \mu\text{m}$  realisiert.

Das Fügen von Welle und Nabe als Längspressverbindung erfolgt auf einer 5 MP Zug-Druck-Prüfmaschine ZDM 5/51.

Das Einkleben der Nabe in einen Flanschring aus Stahl sichert ein gleichmäßiges Tragverhalten am Umfang. Weiterhin entsteht durch das Aufdampfen einer 200 nm dicken Aluminiumschicht auf die optisch rauhe Untersuchungsebene; mittlere Rauheit  $R_Z \approx 2 \mu\text{m}$ ; eine gut reflektierende Streuschicht.

Als Lichtquelle wird ein Helium-Neon-Laser HNA 188 genutzt, Bild 1. Dabei ermöglicht paralleles Licht eine homogene Objektbeleuchtung. Die Aufzeichnung der Specklegramme auf ORWO-Holografie-Platten LP2 erfolgt mit einer Plattenkamera Mentor Panorama 2 und dem Objektiv Sonnar 2,8/180, wodurch sich für die Blendenzahl  $k = 2,8$  als untere Meßbereichsgrenze rund  $3,5 \mu\text{m}$  ergeben. Für alle Versuche beträgt die Vorlast 4,4 Nm. Zwischen beiden Belichtungen wird dann in Abhängigkeit von der Probe eine definierte Last eingeleitet.

### 3.2. Auswertung

Zur Auswertung der Specklegramme nach Gl. (1) eignet sich die in Bild 4 dargestellte Konfiguration. Das Specklegramm wird durch Schichten entlang der Koordinatenachsen mit einer konstanten Schrittweite  $s_M$  der Abtastknoten diskretisiert. Wegen der Rotationssymmetrie ermöglicht das eine vollständige Deformationsanalyse. Durch eine variable Schrittweite  $s_K$  werden die Rotationssymmetrie und die Randbedingungen überprüft. Wie in [18], [23] erläutert, setzt sich die in jedem Knoten gemessene Verschiebung aus der Deformation des Bauteils und der Deformation der Belastungsvorrichtung zusammen. Zur Bestimmung der wirklichen Deformation wird zum gemessenen Verschiebungsfeld  $u_j^M(x_i)$  eine Starrkörpertranslation  $v_j = \text{konstant}$  addiert, so daß die Kurve  $u_j(x_i)$  entlang des Durchmessers  $2R_{2a}$  der Pressverbindung näherungsweise antimetrisch verläuft. Die Starrkörperrotation  $\omega_R$  ergibt sich aus der kinematischen Randbedingung der festen Einspannung

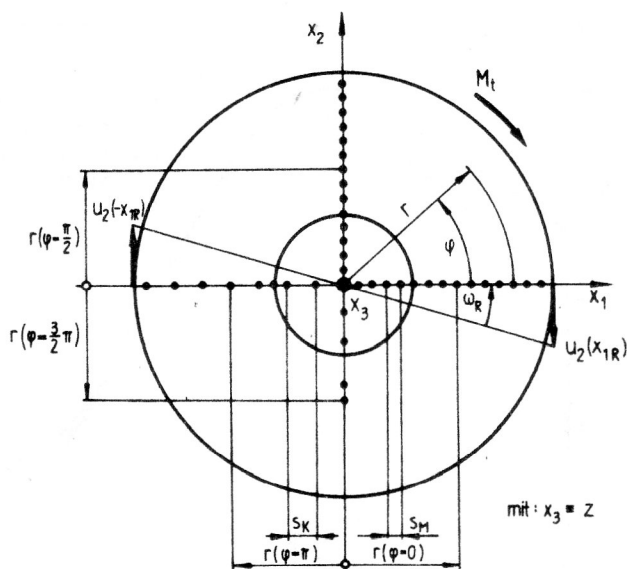
$$|u_j(-x_{iR})| = |u_j(x_{iR})| \approx 0, \quad (2)$$

wobei die erforderlichen  $u_j$  durch Extrapolation der Verschiebungskurven zum Rand bereitgestellt werden. Die korrigierte Kurve  $u_j(x_i)$  wird dann aus

$$u_j(x_i) = u_j^M(x_i) + v_j + x_i \omega_R \quad (3)$$

für  $i$  und  $j$  gleich 1 bzw. 2 ermittelt.

Um die Schubverzerrungen  $\gamma_{r\varphi}$  zu bestimmen, ist die Verschiebungskurve  $u_j(x_i)$  als  $u_\varphi(r)$  in einem Polarko-



**Bild 4**

Diskretisierung des Specklegramms durch zwei orthogonale Meßschichten mit konstanter Schrittweite  $s_M = 1 \text{ mm}$  und variabler Schrittweite  $s_K$  sowie dem Ansatz für die kinematische Randbedingung

ordinatensystem zu interpretieren. Der ebene Spannungszustand

$$\epsilon_r = u_{r,r} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_\varphi = u_r/r + u_{\varphi,\varphi}/r \quad (4.2)$$

$$\gamma_{r\varphi} = u_{r,\varphi}/r + u_{\varphi,r} - u_\varphi/r \quad (4.3)$$

reduziert sich für den Fall des torsionsbeanspruchten Rotationskörpers mit  $u_r \equiv 0$  und  $u_{\varphi,\varphi} = 0$  auf

$$\gamma_{r\varphi} = u_{\varphi,r} - u_\varphi/r. \quad (5)$$

Zur Differentiation wird die korrigierte Tangentialverschiebung  $u_\varphi(r)$  mittels einer kubischen Spline-Funktion [24] bis [26] genähert. Eine hinreichend glatte Kurve wird schon für vergleichsweise kleine Standardabweichungen  $S_{Opt} = 0,1 \mu\text{m}$  erhalten.

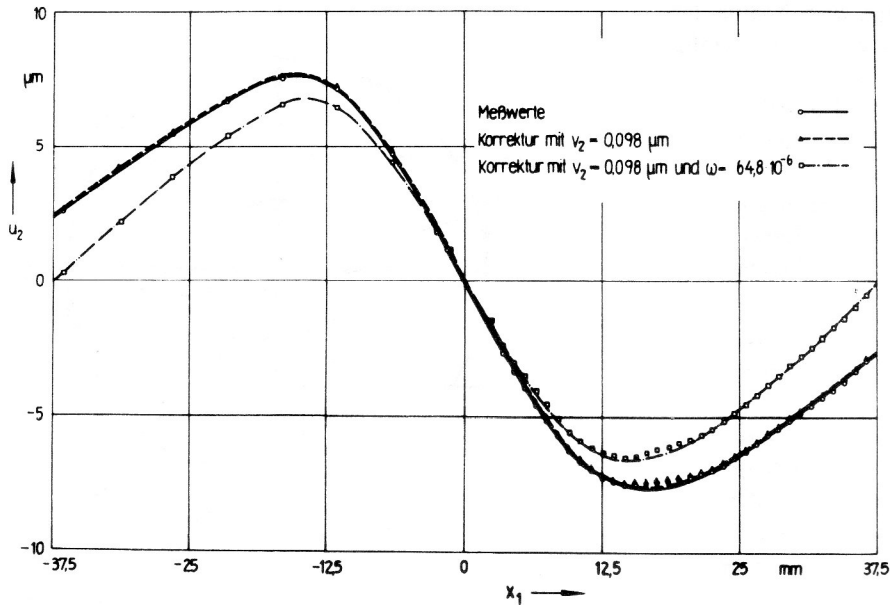
Unter Einbeziehung des Stoffgesetzes für elastisches Materialverhalten berechnet sich dann die Tangentialspannung aus

$$\tau_{r\varphi} = G(u_{\varphi,r} - u_\varphi/r). \quad (6)$$

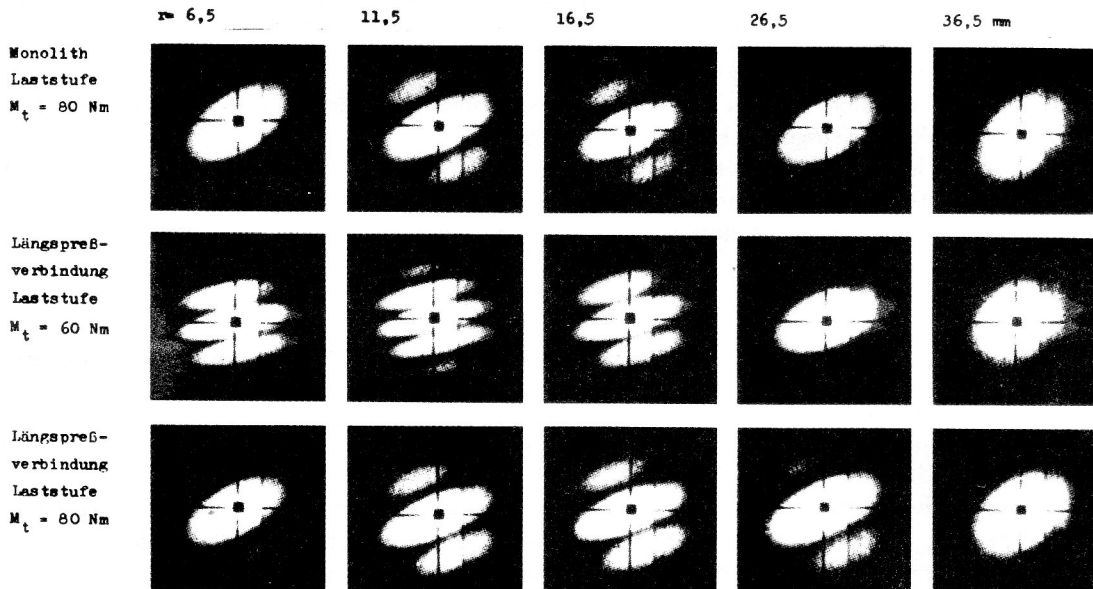
Die numerische Verarbeitung der Meßdaten erfolgt auf einem Büocomputer BC 5120/5130.

### 3.3. Messungen an der freien Stirnfläche

Bild 5 zeigt den Verschiebungsverlauf für die monolithische Probe an der freien Stirnfläche entlang der Schicht  $x_1 = \text{konstant}$ . Gemäß dem in Abschnitt 3.2. erläuterten Vorgehen werden ausgehend von der gemessenen Verschiebung zunächst die Antimetrie und anschließend die kinematische Randbedingung erfüllt. Das Verschiebungsmaximum liegt praktisch auf der Radiuskoordinate der Kerbe. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Messungen und zur Gewährleistung der Rotationssymmetrie sind in [18] beschrieben.



**Bild 5**  
 Verschiebungsverlauf  $u_2(x_1)$  an der freien Stirnfläche der monolithischen Probe bei einem Torsionsmoment  $M_t = 80 \text{ Nm}$

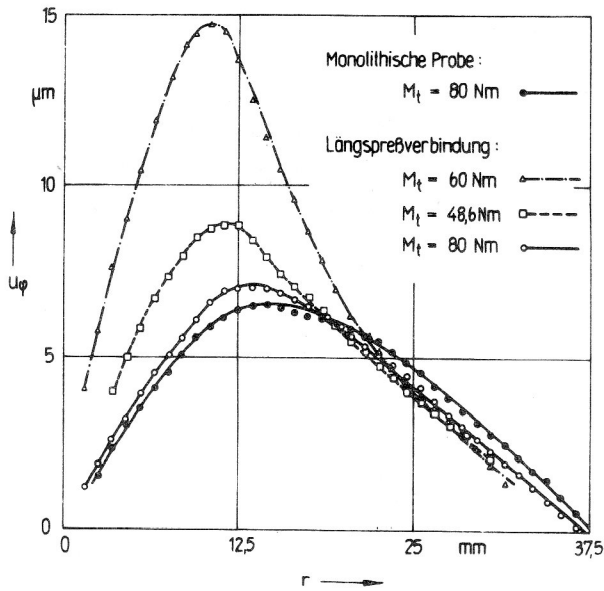


**Bild 6**  
 Mit Youngschen Streifen modulierte Beugungshalos der torsionsbeanspruchten Längspreßverbindung im Vergleich zur monolithischen Probe für ausgewählte Abtastknoten in der freien Stirnfläche

Bild 6 zeigt mit Youngschen Streifen modulierte Beugungshalos der Längspreßverbindung im Vergleich zur monolithischen Probe. Infolge partiellen Gleitens können Umlagerungen in der Drehmomentübertragung längs der Paßfuge auftreten. Charakteristisch für die im Bild 7 dargestellten radialen Verläufe der Tangentialverschiebung entlang der Koordinate  $r(\varphi = 0)$  ist, daß diese Umlagerungen specklephotografisch an der freien Stirnfläche nachweisbar sind. Sie äußern sich darin, daß die Verschiebung  $u_\varphi(r)$  stark nichtlinear vom Radius abhängt. Dabei ist zu beachten, daß die Versuche an einer erstbelasteten Verbindung durchgeführt werden, sich folglich noch kein stationärer Zustand in Form einer eingeschwungenen Hystereseschleife einstellen konnte [8]. Insbesondere die Laststufe  $M_t = 48,6 \text{ Nm}$  verdeutlicht diesen Sachverhalt.

Bei einem Torsionsmoment von  $80 \text{ Nm}$  weichen die Kurven für die monolithische Probe und die Längspreßverbindung nur geringfügig voneinander ab [27]. Der dabei in der Verbindung vorliegende Verspannungszustand – es tritt kein partielles Gleiten auf – bedingt ein dem Monolith sehr nahe kommendes Übertragungsverhalten. Auf Grund der wenigen grundsätzlichen Versuche sind jedoch keine Aussagen zur Länge der durch lokale Slip-Erscheinungen entstehenden Gleitzone als Funktion einer äußeren Last möglich.

Wie Bild 8 belegt, sind auch die Tangentialspannungen nichtlinear vom Radius abhängig. Je größer die Spannungsmaxima werden, um so weiter verschieben sie sich in Richtung der Paßfuge. Weiterhin fällt die Tangentialspannung bei allen untersuchten Laststufen in Richtung Nabenrand stark ab und ist unabhängig von der aktuellen



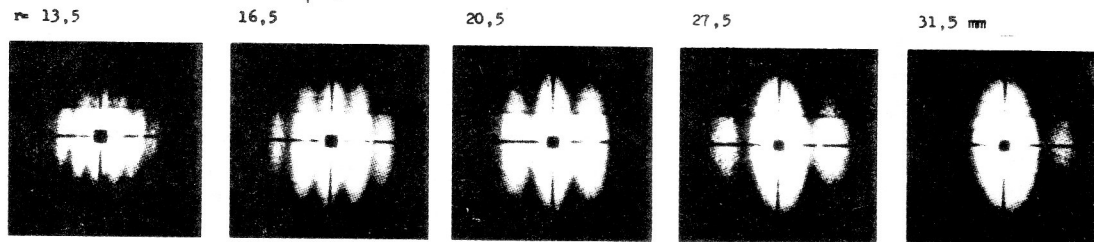
**Bild 7**  
Vergleich der Tangentialverschiebung  $u_{\varphi}(r)$  für  $\varphi = 0$  zwischen Längspreßverbindung und monolithischer Probe nach Elimination der Starrkörperbewegung

Belastung bei einem Nabenradius von rund 25 mm praktisch gleich groß. Daraus läßt sich schlußfolgern, daß für die Dimensionierung von torsionsbeanspruchten Längspreßverbindungen ein Radienverhältnis  $R_{2a}/R_{2i} \leq 2$ , keine anderen konstruktiven Forderungen vorausgesetzt, ausreichend ist.

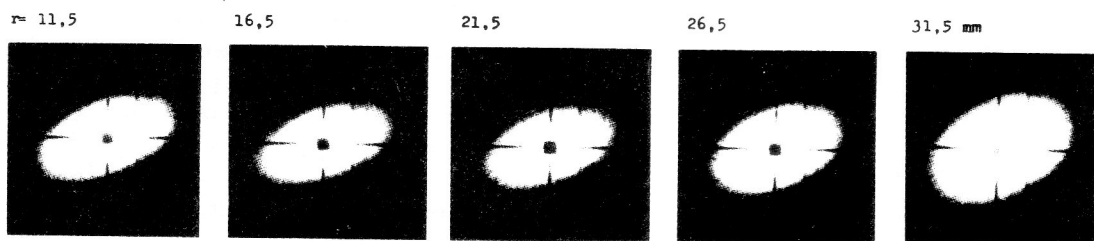
### 3.4. Messung an der Eintrittsebene Welle/Nabe

Die mit Youngschen Streifen modulierten Beugungshalos der Preßverbindung aus Piacryl für die freie Stirnfläche und die Eintrittsebene an der Nabe sind in Bild 9 sowie die zugehörigen Verschiebungsverläufe in Bild 10 dargestellt.

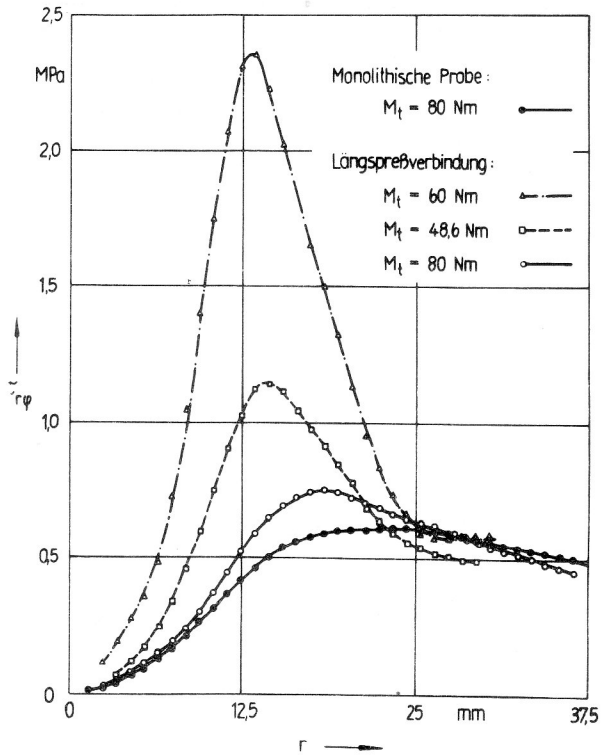
Eintrittsebene Welle/Nabe für  $\varphi = \pi/2$



Freie Stirnfläche für  $\varphi = 0$

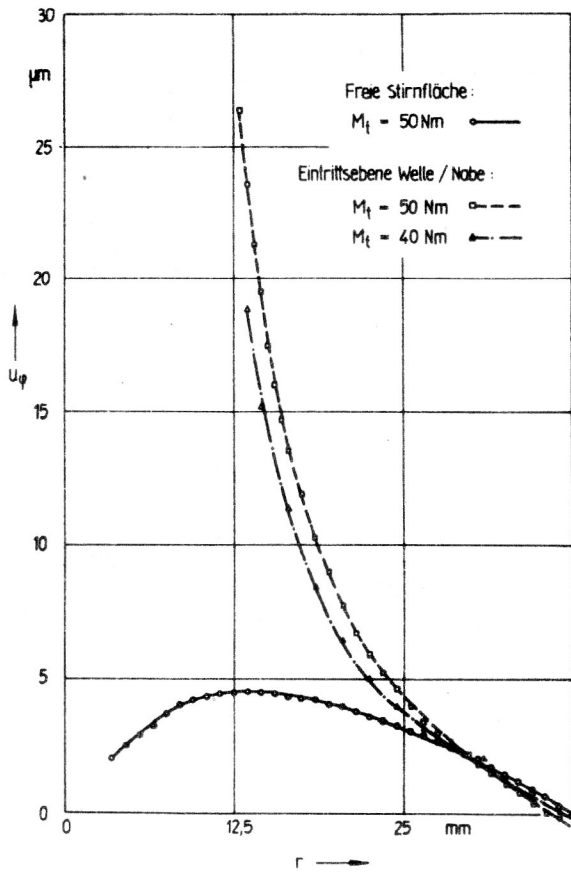


**Bild 9**  
Mit Youngschen Streifen modulierte Beugungshalos der torsionsbeanspruchten Längspreßverbindung aus Piacryl in der freien Stirnfläche und der Eintrittsebene Welle/Nabe für ausgewählte Abtastknoten

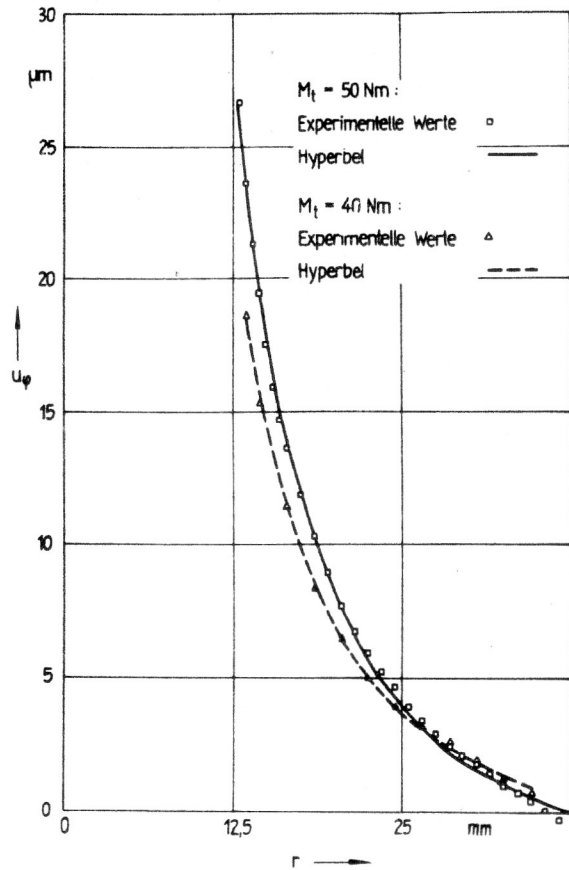


**Bild 8**  
Tangentialspannung  $\tau_{r\varphi}(r)$  für  $\varphi = 0$  und  $S_{Opt} = 0,075 \mu m$

stellt. Dabei führt der extrem hohen Deformationsgradient in unmittelbarer Umgebung der Paßfuge zur Zerstörung der Korrelation zwischen beiden Specklefeldern, so daß von dieser Zone keine Verschiebungswerte für die Eintrittsebene bereitgestellt werden können. Die Tangentialverschiebung  $u_{\varphi}(r)$  weist an der Nabe ausgehend vom Maximum in unmittelbarer Nähe der Paßfuge einen stei-



**Bild 10**  
Tangentialverschiebung  $u_\varphi(r)$  nach Abheben der Starrkörperbewegung

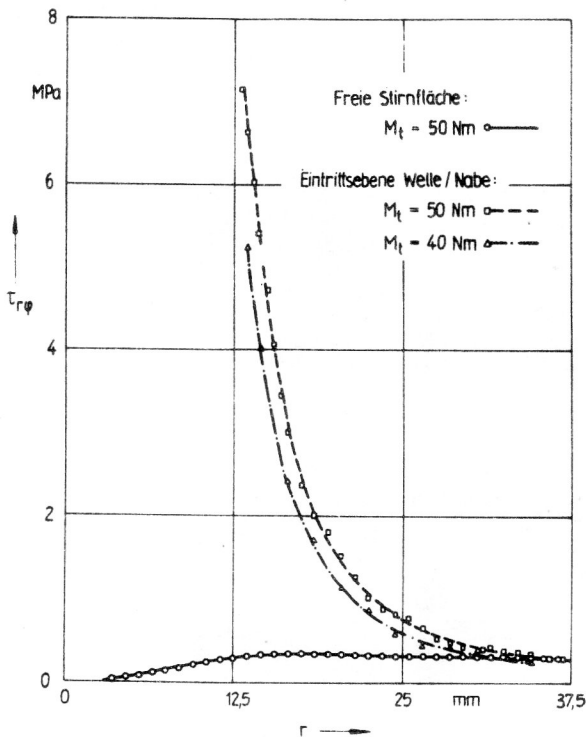


**Bild 12**  
Beschreibung der gemessenen Tangentialverschiebung  $u_\varphi(r)$  durch eine dreiparametrische Hyperbel

Parameter der Hyperbel:

$$\begin{aligned}
 M_t &= 50 \text{ Nm} \\
 a_0 &= 5,815 \cdot 10^3 \\
 a_1 &= -9,336 \cdot 10^1 \\
 a_2 &= -1,599
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_t &= 40 \text{ Nm} \\
 a_0 &= 4,209 \cdot 10^3 \\
 a_1 &= -4,887 \cdot 10^1 \\
 a_2 &= -1,078
 \end{aligned}$$

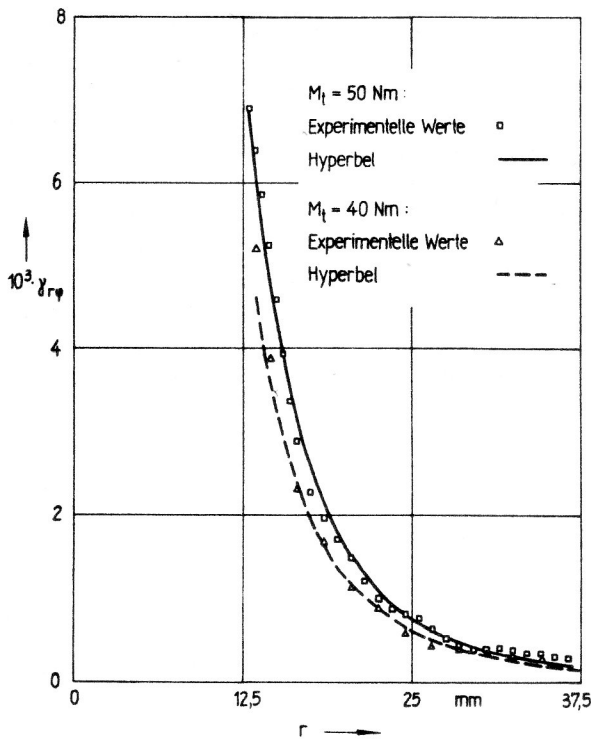


**Bild 11**  
Tangentialspannung  $\tau_{r\varphi}(r)$  für  $S_{Opt} = 0,1 \mu\text{m}$

len Gradienten in radialer Richtung auf. Für zwei unterschiedliche Laststufen ergibt sich folgerichtig eine ähnliche Tendenz. Weiterhin kann aus dem Vergleich der Kurven für Eintrittsebene und Stirnfläche auf ein rasches Abklingen der Verformung in axialer Richtung geschlossen werden.

Die in Bild 11 enthaltenen Tangentialspannungen lassen eine analoge Tendenz zu den Verschiebungsverläufen erkennen. Sie sind gleichfalls stark nichtlinear von der Radiuskoordinate abhängig. Insbesondere an der Nabe der Eintrittsebene fallen sie ausgehend von der Paßfuge radial steil ab, so daß ab  $r \approx 25 \text{ mm}$  die Spannungen für beide betrachteten Ebenen praktisch in der gleich Größenordnung liegen, siehe auch Abschnitt 3.3.. Der ausgeprägte Spannungsgradient in axialer Richtung belegt, daß entlang der Fuge gleichfalls keine konstante Spannungsverteilung, wie in [1] und [4] angenommen, vorliegt.

Abschließend wird noch eine Möglichkeit zur ingenieurmäßigen Aufbereitung der Meßergebnisse am Beispiel der Tangentialverschiebung an der Eintrittsebene diskutiert.



**Bild 13**  
Schubverzerrung  $\gamma_{r\varphi}(r)$  mittels kubischer Spline-Funktion ( $S_{Opt} = 0,1 \mu\text{m}$ ) und Hyperbel (Parameter: Bild 12) bestimmt

Zu diesem Zweck wird die Verschiebungskurve in Bild 10 durch eine analytische Funktion beschrieben. Ihr Verlauf läßt sich dabei gut durch eine Hyperbel mit drei Parametern

$$u_\varphi(r) = a_0/r^2 + a_1/r + a_2 \quad (7)$$

approximieren [28]. Dieser Ansatz sichert, daß an der Paßfuge keine Singularitäten auftreten. Die Schubverzerrung  $\gamma_{r\varphi}$  gemäß Gl. (5) ist dann mit Hilfe der Hyperbelparameter  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  aus

$$\gamma_{r\varphi} = -(3a_0/r^2 + 2a_1/r + a_2)/r \quad (8)$$

zu berechnen. Die in den Bildern 12 und 13 enthaltenen Verläufe für die Tangentialverschiebung und die Schubverzerrung belegen, daß die experimentellen Ergebnisse gut durch diese analytische Lösung erfasst werden.

### 3.5. Vergleich mit bekannten Berechnungen

In den Berechnungsmethoden [1], [4] wird im allgemeinen vorausgesetzt, daß entlang der Paßfuge eine konstante Tangentialspannung

$$\tau_{r\varphi}(R_{2i}) = M_t / 2\pi R_{2i}^2 l_F \quad (9)$$

vorliegt. Das heißt, jeder Querschnitt überträgt das gleiche Drehmoment und wird folglich durch die gleiche Schubspannung beansprucht. Für die elastische Verformung eines Nabenquerschnitts ergibt sich nach Müller [5] der Ansatz

$$\int_{\varphi_{2a}}^{\varphi} d\varphi = \int_{R_{2a}}^r (\tau_{r\varphi}(R_{2i}) R_{2i}^2 / Gr^3) dr, \quad (10)$$

wobei vom Außenrand der Nabe in Richtung Rotationsachse zu integrieren ist. Als Randbedingung für die feste Einspannung an Nabenumfang gilt

$$\varphi_{2a} = \varphi(r = R_{2a}) = 0 \text{ bzw. } u_\varphi(r = R_{2a}) = 0,$$

so daß sich der Verdrehwinkel  $\varphi(r)$  unter Einbeziehung von Gl. (9) aus

$$\varphi(r) = (M_t / 4\pi G l_F R_{2a}^2) [(R_{2a}/r)^2 - 1] \quad (11)$$

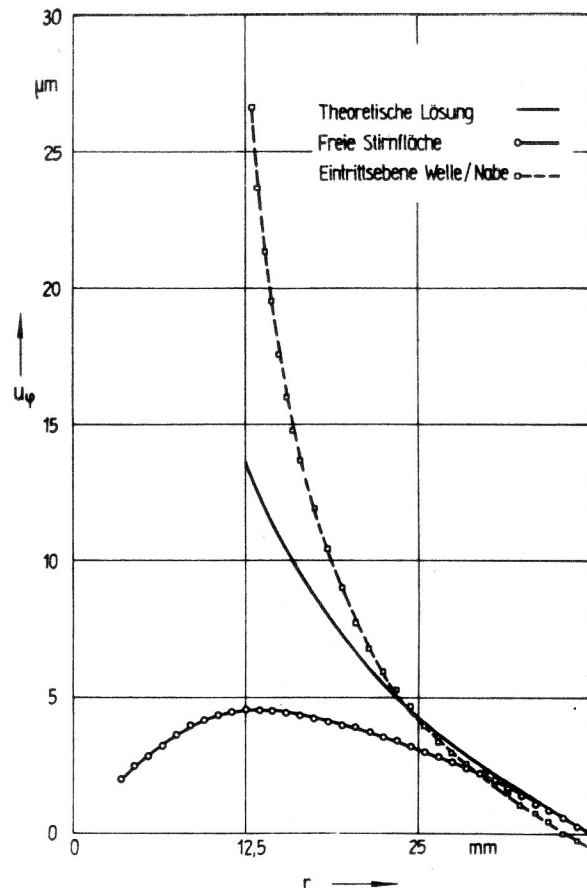
berechnet. Mit

$$\varphi(r) = u_\varphi(r) / r \quad (12)$$

kann die Tangentialverschiebung bezüglich des Nabenquerschnitts in Abhängigkeit von der Radiuskoordinate  $r$

$$u_\varphi(r) = (M_t r / 4\pi G l_F R_{2a}^2) [(R_{2a}/r)^2 - 1] \quad (13)$$

bestimmt werden. Wie der berechnete Verschiebungsverlauf  $u_\varphi(r)$  im Vergleich zum Experiment, Bild 14, zeigt, liegt diese Kurve folgerichtig zwischen den extrem hohen Werten an der Eintrittsebene und den vergleichsweise geringen Verformungen an der Stirnfläche. Ab Radius  $r \approx 25$  mm sind die Verschiebungen praktisch wieder gleich groß. Eine analoge Aussage ergibt sich in axialer Richtung [18].



**Bild 14**  
Vergleich der experimentell gewonnenen Tangentialverschiebung  $u_\varphi(r)$  mit der theoretischen Lösung nach Gl. (14) für das Piacrylmodell bei  $M_t = 50 \text{ Nm}$

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Wie die grundsätzlichen Modellversuche an torsionsbeanspruchten Längspressverbindungen belegen, hat sich die Specklefotografie zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens in ausgewählten Untersuchungsebenen dieser Verbindungselemente bewährt. Durch lokales Gleiten verursachte Nichtlinearitäten im radialen Verformungs- und Spannungsverlauf sind specklefotografisch an der freien Stirnfläche nachweisbar. Der Vergleich der Tangentialverschiebung und -spannung für die freie Stirnfläche und die Eintrittsebene der Welle in die Nabe weisen erwartungsgemäß signifikante qualitative Unterschiede auf, die gleichfalls quantitativ erfassbar sind.

Bezüglich des speziellen Untersuchungsgegenstands sollte sich eine umfassende Deformationsanalyse unter Berücksichtigung der möglichen Versuchsparameter auf folgende, vor allem methodische Schwerpunkte richten:

- 1) Um Messungen im Inneren von Modellen mit eingebetteten Streuschichten durchführen zu können, sind weitere Tests insbesondere zum mechanischen Werkstoffverhalten, z. B. an mit Kalloplast R geklebten Piacrylproben, erforderlich. Als wesentliche Kriterien müssen diese kombinierten Streu- und Klebschichten ein gutes Reflexionsvermögen und ein homogenes, weitgehend elastisches Materialverhalten besitzen sowie eine kontinuierliche Übertragung der äußeren Belastung gewährleisten.
- 2) Ausgehend vom erreichten Entwicklungsstand eröffnet die Specklefotografie neue Anwendungsmöglichkeiten der Deformationsanalyse an statisch bzw. thermisch belasteten Bauteilen aus der Festkörpermechanik und aus dem Maschinenbau. Im speziellen Fall der Pressverbindung wären folgende Problemkreise zu bearbeiten:
  - Quantitative Analyse des Übertragungsverhaltens einer Pressverbindung unter äußerer Belastung entlang der Paßfuge und des Verformungsverlaufs in radialer Richtung sowohl für Welle als auch Nabe sowie von Last- und Spannungsumlagerungen, die durch lokales Gleiten hervorgerufen werden.
  - Statische Parameteruntersuchungen an Pressverbindungen gleicher Geometrie mit dem Ziel der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Verdrehwinkel und eingeleitetem Moment, um Rückschlüsse auf die Länge der Gleitzone sowohl bei erstbelasteten als auch eingeschwungenen Verbindungen zu erhalten.
  - Optimierung des Außendurchmessers der Nabe durch Vergleich der Verformung von freier Stirnfläche und Eintrittsebene bei variabler Paßfugenlänge.
  - Untersuchungen an typischen Formen von profilierten Naben.
  - Quantitative Deformationsanalyse längs der Mantellinie der Welle vor deren Eintritt in die Nabe zur Bestimmung von Nichtlinearitäten im Verformungsverlauf und der Länge der Gleitzone sowie Überprüfung der Anwendbarkeit dieser Versuchstechnik für Messungen an Originalbauteilen.
- 3) Um einen theoretischen Zugang zum Problemkreis der durch äußere Kräfte und Momente belasteten

Pressverbindung zu erhalten, sind Berechnungen des axialsymmetrischen Problems mittels FEM für den elastischen Fall geeignet. Die im Kontaktgebiet von Welle und Nabe geltenden Randbedingungen wären zunächst von den in Punkt 2) konzipierten Experimenten zu übernehmen. Als Vergleichsobjekte sind monolithische Proben gleicher Geometrie zu berechnen.

Weiterhin sollte der Einfluß von plastischen Zonen, die sich an Originalverbindungen lokal begrenzt ausbilden können, auf das Verformungs- und Spannungsverhalten der Pressverbindung untersucht werden.

#### LITERATUR:

- [1] Schlottmann, D.: Maschinenelemente. Berlin 1973, 384 S.
- [2] Haase, K.: Beitrag zur Bemessung von Pressverbindungen. Diss. A, Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 1977, 157 S.
- [3] Weißpflog, H.: Methoden zur Berechnung von elastischen Pressverbindungen unter besonderer Berücksichtigung der Ermittlung der Reibungszahl. Diss. A, Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 1978, 95 S.
- [4] TGL 19361 Berechnung von Pressverbindungen, 1985, 36 S.
- [5] Müller, H.: Der Mechanismus der Drehmomentübertragung in Pressverbindungen. Diss. A, Techn. Hochsch. Darmstadt 1961. 100 S.
- [6] Fernlund, I.: Drehmomentübertragung in Pressverbindungen. Konstruktion, 18 (1966) H. 12, S. 495 – 501.
- [7] Gropp, H.: Die Übertragungsfähigkeit von Längspressverbindungen bei dynamischer Belastung durch wechselnde Drehmomente. Diss. A, Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 1975, 166 S.
- [8] Gropp, H.: Die Veränderung der Torsionsfedersteife durch dynamische Belastung. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt, 27 (1985) H. 6, S. 939 – 950.
- [9] WP 152972 DD. Wellen-Naben-Verbindung, insbesondere Pressverbindungen mit beschichteten Paßflächen. 5 S.
- [10] Erf, R. K.: Speckle metrology. Academic Press New York, San Francisco, London 1978, 331 S.
- [11] Jones, R., Wykes, C.: Holographic and speckle interferometry. University Press Cambridge, New York, London 1983, 342 S.
- [12] Dainty, J. C.: Laser, speckle and related phenomena. 2. Aufl. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1984, 342 S.
- [13] Martin, D. V. J.: Laser speckle photography measurements of movement and strain in steel structures at temperatures of 20 – 520 °C. Materials evaluations, 1978, S. 53 – 56.
- [14] Chiang, F. P.: A new family of 2d and 3d experimental stress analysis techniques using laser speckle. Solid Mechanics Archives, 3 (1978) H. 1, S. 1 – 32.
- [15] Groß, K.-P.: Verformungsanalyse an Stahlbetonbauteilen mit der Laser-Speckle-Photographie. VDI-Berichte 439 (1982), S. 133 – 144.
- [16] Kaufmann, G. H., Lopergolo, A. M., Idelsohn, S.: Evaluation of finite element calculations in a cracked cylinder under inertial pressure by speckle photography. Journal of Applied Mechanics, 50 (1983) H. 4, S. 896 – 897.
- [17] Vogel, J., Naumann, J.: Grundlagen und Anwendungen der Specklefotografie in der experimentellen Festkörpermechanik. Studentexte Experimentelle Spannungs- und Verformungsermittlung II. – Techn. Univ. Dresden, 1984, H. 3, S. 62 – 78.



- [18] Vogel, J.: Verformungsanalyse von Maschinenbauteilen mittels Specklephotografie. Diss. A, Techn. Univ. Karl-Marx-Stadt 1987, 115 S.
- [19] Vogel, J., Naumann, J., Ullmann, K.: Verbesserungen in der Auswertung specklephotografischer Bilder. Akademie der Wissenschaften, Institut für Mechanik, FMC-Series No. 26, Karl-Marx-Stadt 1988, S. 181 – 189.
- [20] Bruhn, H., Felske, A.: Automated analysis of specklegrams by means of a 2-d Fourier transform. Technical Sessions at the Electro-Optics/Laser-International Exhibition, Brighton (England) 1982, S. 285 – 296.
- [21] Erbeck, R.: Die Anwendung der Speckle-Photographie zur statistischen Analyse turbulenter Dichtefelder. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, H. 112, 1986, 142 S.
- [22] Navone, H. D., Kaufmann, G. H.: Two-dimensional digital processing of speckle photography fringes III. Accuracy in angular determination. Applied Optics, 26 (1987) 1, S. 154 – 156.
- [23] Vogel, J.: Meßempfindlichkeit und Meßgenauigkeit der Specklephotografie in der experimentellen Verformungs- und Spannungsanalyse. Technische Mechanik, 9 (1988) H. 3, S. 210 – 217.
- [24] Späth, H.: Algorithmen für elementare Ausgleichsmo-  
delle. München, Wien, 1973, 166 S.
- [25] Berghaus, D. G., Cannon, J. P.: Obtaining derivatives from experimental data using smoothed-spline functions. Experimental Mechanics, 13 (1973) H. 1, S. 38 – 42.
- [26] Naumann, J., Uhlig, K.: Erfassung und numerische Verarbeitung von Meßdaten. 2. Softwaremesse, Techn. Univ. Karl-Marx-Stadt 1987, 2 S.
- [27] Vogel, J., Heymann, J., Naumann, J., Ullmann, K.: Deformation analysis of a press fit by means of speckle photography. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 132 (1987) H. 7 – 8, S. 228 – 230.
- [28] Ullmann, K.: Approximation und Differentiation von Interferenzstreifen-Systemen durch optimale dreiparametrische Kurven. Wiss. Z. d. Techn. Univ. Karl-Marx-Stadt, 30 (1986) 1, S. 27 – 33.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. J. Vogel  
Akademie der Wissenschaften der DDR  
Institut für Mechanik  
PSF 408  
Karl-Marx-Stadt  
9010