

Experimentelle Spannungsanalyse hochbeanspruchter Maschinenbauteile

Joachim Heymann, Jochen Naumann und Klaus Ullmann

Es wird über die Anwendung der Methoden der experimentellen Festkörpermechanik bei der Spannungs- und Verformungsermittlung an tragenden Konstruktionsteilen berichtet. Dabei finden besonders die optischen Feldmeßverfahren (z. B. Spannungsoptik, Moiréverfahren) Berücksichtigung, die in der Phase der Konstruktion durch Modellversuche eine beanspruchungsgerechte Gestaltung und eine Erhöhung der Betriebssicherheit und Materialökonomie gestatten.

Anwendungsmöglichkeiten der experimentellen Festkörpermechanik werden an 3 Beispielen aufgezeigt. Unter Zugrundelegung elastischen Materialverhaltens werden der Flanschmitnehmer einer Gelenkwelle und der Kolben eines Dieselmotors untersucht. Ferner wird über die experimentelle Analyse des elastisch-plastischen bzw. plastischen Tragverhaltens der hochbelasteten Tannenbaum-Verbindung an einem Abgasturbolader berichtet. Zu allen Reispielen werden Details der Versuchstechnik sowie Ergebnisse mitgeteilt.

1. Einleitung

Die Verfahren der experimentellen Festkörpermechanik auf den Gebieten der Elastizität, Viskoelastizität und Plastizität haben vor allem die Spannungs- und Verformungsermittlung bei Konstruktionsteilen und die Bestimmung des Werkstoffflusses bei Umform- und Trennprozessen zum Ziel. Ihre Ergebnisse besitzen für den konstruktiven Entwicklungsprozeß bezüglich der Optimierung der Form der Konstruktionsteile bei gleichzeitiger Verbesserung der Materialökonomie und Erhöhung der Gebrauchswerteigenschaften eine große Bedeutung.

Darüber hinaus gewährleisten speziell die optischen Feldmeßverfahren durch ihre Anschaulichkeit, durch das visuelle Erkennen der Bereiche maximaler Beanspruchung sowie auch der Art der Beanspruchung unmittelbar einen optischen Überblick über das zu untersuchende Problem und fördern so wirkungsvoll das konstruktive Denken.

Langjährige Forschungsarbeiten sind dabei von den Mitarbeitern der Forschungsstelle zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der optischen Feldmeßverfahren Spannungsoptik und Moiréverfahren

geleistet worden [1], die bei der praktischen Anwendung oft mit weiteren experimentellen Verfahren, wie Reißlackverfahren und Messung mit Dehnungmeßverfahren, gekoppelt wurden.

Während die Verfahren der Spannungsoptik vorwiegend zur Untersuchung elastischer Probleme zum Einsatz gelangen, eignet sich das in den vergangenen 15 Jahren zu einer hohen Reife entwickelte Moiréverfahren [2] wegen seiner rein geometrischen Natur hervorragend zur Messung plastischer Deformationsfelder. Nachfolgend werden drei Anwendungen vorgestellt.

2. Untersuchung eines Gelenkwellenflanschmitnehmers

Flanschmitnehmer, Bild 1, sind komplizierte räumliche Bauteile. Die theoretische Berechnung fußt auf großen

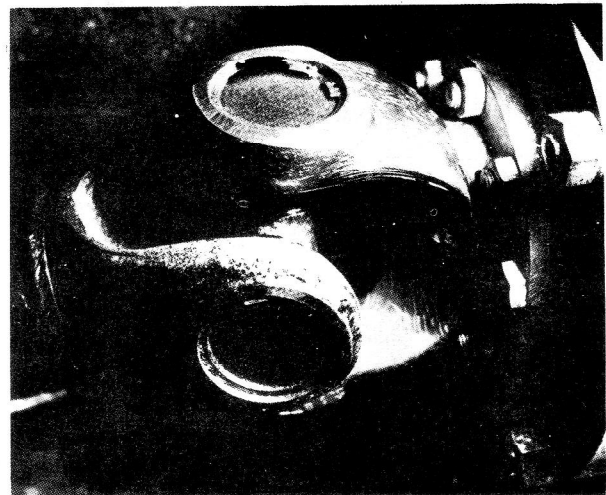


Bild 1
Flanschmitnehmer im Eingriff

Idealisierungen, so daß die berechneten Spannungen von den tatsächlich vorhandenen beträchtlich abweichen. Deshalb sollte bei der vorgesehenen Weiterentwicklung der Gelenkwelle der Spannungsverlauf im Mitnehmer einschließlich seiner Extremwerte nach Ort und Größe durch eine experimentelle Untersuchung ermittelt werden [3].

Dazu eignet sich sehr gut das Erstarrungsverfahren der räumlichen Spannungsoptik, das darüber hinaus auch einen Einblick in das Innere des zu untersuchenden Teiles gestattet. Das dazu erforderliche Modell ist im Maßstab 1:1 aus dem heißhärtenden Epoxidharz EG 1 nach einer modernen Technologie mit Silikonkautschuk als Formstoff gegossen worden [4], [5]. Im Erstarrungsversuch wird das Modell in einer speziellen Belastungsvorrichtung bei 130 °C belastet und unter Last langsam auf Raumtemperatur abgekühlt. Gleichzeitig ist auch der Doppelbrechungseffekt erstarrt. Wird das Modell nun in Schnitte von etwa 3 mm Dicke zerlegt, so können diese einzeln, ähnlich wie in der ebenen Spannungsoptik,

untersucht werden. Das Ergebnis ist um so genauer, je geringer die Abweichung der Schnittebene von der Hauptspannungsebene ist.

Deshalb wurde zur Vorbereitung der Schnittführung am Modell eine Reißlackuntersuchung des Originalbauteiles durchgeführt, die an den zugbelasteten Stellen des Mitnehmers die Linien gleicher Hauptspannungsrichtung lieferte. In Bild 1 sind diese Linien im Bereich der Klauenkontur gut erkennbar.

Im Ergebnis des Reißlackversuches konnten nun aus dem Modell 13 Schnitte gewonnen werden, die alle wesentlichen Bereiche des Mitnehmers erfassen.

Bild 2 zeigt das Isochromatenbild des Schnittes im Bereich der Lageraugenbohrung. Die Isochromaten stellen hier nach der Hauptgleichung der räumlichen Spannungsoptik

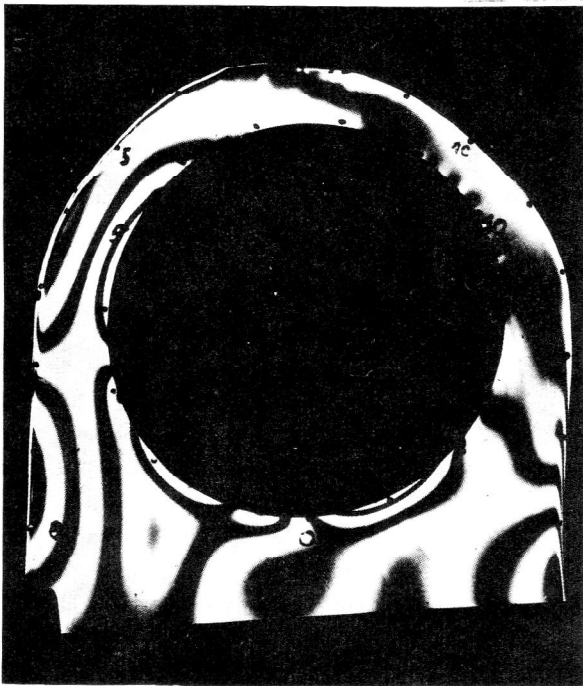


Bild 2
Isochromatenbild im Bereich der Lageraugenbohrung

$$\sigma'_1 - \sigma'_2 = n_o \frac{S}{d} \quad (1)$$

Linien gleicher Differenz der sekundären Hauptspannungen σ'_1 und σ'_2 dar. Die vollständige Auswertung der Schnitte erfolgt an den lastfreien Stellen des Außen- und Innenrandes mittels schiefer Durchstrahlung, wobei sich unter Berücksichtigung der gewählten Schwenkwinkel $\gamma = \pm 30^\circ$ und $\gamma_o = 0^\circ$ die Beziehungen

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{S}{d} \left[\sqrt{3} (n_\gamma + n_{-\gamma}) - 2 n_o \right], \quad (2)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{S}{d} \sqrt{(n_\gamma - n_{-\gamma})^2 + [4n_o - \sqrt{3} (n_\gamma + n_{-\gamma})]^2}, \quad (3)$$

$$\cos 2\alpha = \frac{(2 n_o \frac{S}{d}) - (\sigma_1 + \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_2} \quad (4)$$

ergeben.

Dabei bedeuten

- σ_1, σ_2 ... gesuchte Hauptspannungen
- α ... Winkel zwischen Hauptspannungs- und senkrechter Durchstrahlungsrichtung
- n_o ... vorzeichenbehaftete Isochromatenordnung bei senkrechter Durchstrahlung
- $n_\gamma, n_{-\gamma}$... vorzeichenbehaftete Isochromatenordnung bei schiefer Durchstrahlung
- S ... Spannungsoptische Konstante
- d ... Schnittdicke

Mit der auf der Ähnlichkeitstheorie beruhenden Beziehung

$$\sigma_H = \frac{M_H}{M_M} \sigma_M \quad (5)$$

die unter der Bedingung $l_v = l_M/l_H = 1$, d. h. des im Maßstab 1:1 zur Hauptausführung hergestellten Modells gilt, können die Modellversuchsergebnisse auf die Hauptausführung übertragen werden. Die eingeleiteten Momente, an der Hauptausführung M_H und am Modell M_M , sind bekannt; die Spannung σ_M im Modell wurde wie beschrieben ermittelt. Nach der Gestaltänderungshypothese wird schließlich noch die Vergleichsspannung

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6)$$

mit $\sigma_3 = 0$ berechnet.

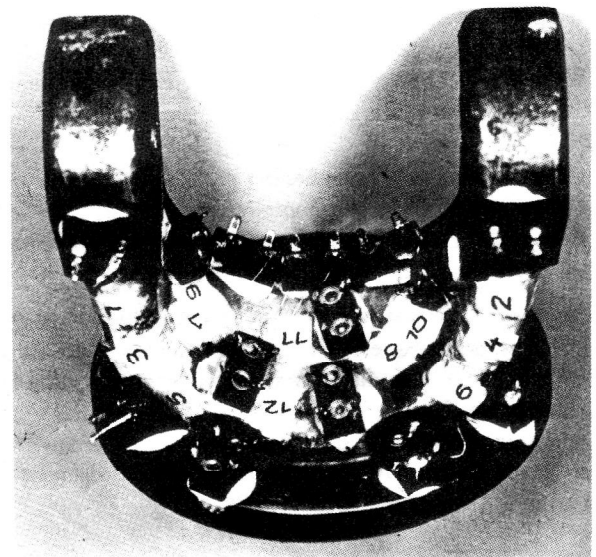


Bild 3
Original des Flanschmitnehmers mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen

Die Meßwertverarbeitung bis zur Vergleichsspannung geschieht mit einem Rechenprogramm. Eingegeben werden die experimentell ermittelten Isochromatenordnungen n_0, n_γ, n_γ sowie die Konstanten S und d .

Eine Vergleichsuntersuchung mit Dehnungsmeißstreifen am Originalbauteil des Flanschmitnehmers bot eine gute Gelegenheit zur Einschätzung bzw. Bestätigung der spannungsoptisch ermittelten Ergebnisse. Ausgehend von den ermittelten Reißlacklinien und in Übereinstimmung mit der Schnittführung am spannungsoptischen Modell wurden die Meßstellen festgelegt, Bild 3.

Grundsätzlich erfolgte die Dehnungsmessung immer in zwei zueinander senkrechten Richtungen.

Bild 4 zeigt den Spannungsverlauf am Außenrand der Lageraugenbohrung. Tabelle 1 enthält die Spannungswerte in den Punkten 1 und 15 des Isochromatenbildes. Die Ergebnisse beider Verfahren stimmen gut überein. Die größte bei der Auswertung aller Schnitte aufgetretene Abweichung betrug 16 %.

Insgesamt lieferte die kombinierte Versuchsdurchführung Reißlack-Dehnungsmessung-Spannungsoptik einen guten Überblick über die Spannungsverläufe längs der Bauteiloberfläche und an den Stellen höchster Beanspruchung. Die Ergebnisse bilden damit den Ausgangspunkt für konstruktive Veränderungen des Mitnehmers.

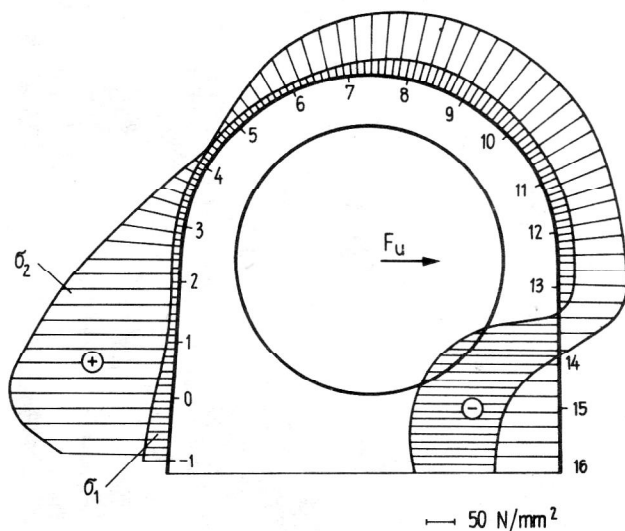


Bild 4
Spannungsverlauf am Außenrand der Lageraugenbohrung

Tabelle 1
Vergleichsspannung σ_v in den Punkten 1 und 15

	N/mm ²	N/mm ²
Spannungsoptik	158	223
DMS	129	225
	Punkt 1	Punkt 15

3. Spannungsoptische Analyse von Dieselmotorkolben

3.1. Problemstellung

Der Motorkolben gehört zwar zu den frühesten Anwendungsbeispielen des spannungsoptischen Erstarrungsverfahrens [6]. Dennoch sind erst im zurückliegenden Jahrzehnt die Festigkeitsprobleme des Kolbens umfassend modelltechnisch untersucht worden [7].

Solche mit der spezifischen Leistungssteigerung der Dieselmotoren verbundenen Probleme sind z. B. Naben-spaltbrüche, Bolzenschäden, Ringträgerverschleiß, Bodenrisse.

Der spannungsoptische Erstarrungsversuch ermöglicht im Gegensatz zu den anderen Verfahren auch Messungen an Kontaktflächen und sonstigen unzugänglichen Stellen. Darüber hinaus können Verschiebungen auf einfache Weise (keine Belastungsvorrichtung) und mit hoher Genauigkeit (aufgrund überhöhter Verformungen) bestimmt werden. Solche für den Konstrukteur wichtige Ergebnisse sind z. B. die Durchbiegung des Kolbenbodens, des Kolbenbolzens, der Ovalverformung von Bolzen und Kolbenmantel.

Die Verschiebungsmessung kann punktweise mittels Meßuhr, wobei die Modelle auf einer Richtplatte positioniert werden, oder mittels Meßmikroskop erfolgen. Für Feldmessungen eignet sich das Moiréverfahren [8], [9].

3.2. Modellwerkstoffe

Da der Motorkolben meist aus einer Aluminiumlegierung, der Bolzen dagegen aus Stahl besteht, sind für den Modellversuch Werkstoffe mit einem Verhältnis der Elastizitätsmoduln

$$\frac{E^B}{E^K} = \frac{2,1 \cdot 10^5}{7,4 \cdot 10^4} = 2,8 \quad E \text{ in N/mm}^2 \quad (7)$$

erforderlich.

Davon ausgehend, daß für die spannungsoptischen Versuche vornehmlich Epoxidharze benutzt werden, läßt sich das E-Modulverhältnis auf folgenden Wegen realisieren

- Verwendung von Füllstoffen
- Einsatz unterschiedlicher Härter
- Einsatz unterschiedlicher Harze.

Durch Füllstoffe läßt sich das E-Modulverhältnis zwar in einem großen Bereich variieren [10]. Ein prinzipieller Nachteil ist, daß das gefüllte Bauteil, in diesem Fall der Bolzen, nicht spannungsoptisch untersucht werden kann. Als unterschiedliche Härter kommen für heißhärtende Harze Malein- und Phthalsäureanhydrid (PSA) infrage. Černosek und Perla [11] führten entsprechende Untersuchungen mit dem tschechoslovakischen Epoxidharz EPOXY CHS 110 durch.

Der Einsatz unterschiedlicher Harze basiert auf deren unterschiedlichem Epoxidgruppengehalt. Haberland und Pidde [12] testeten die einheimischen Epoxidharze EPILOX EG 1 und EG 34, wobei sie ein Verhältnis

$$\frac{E_{EG\ 34}}{E_{EG\ 1}} = \frac{31}{19} = 1,6$$

gefunden. Dabei hat EG 34 den Polymerisationsgrad $n = 0$. Aufbauend auf dieser Arbeit ist es durch zielgerichtete Veränderung der Gieß- und Härtebedingungen [4] gelungen, ein dem Original nahekommendes Verhältnis

$$\frac{E_{EG\ 34}}{E_{EG\ 1}} = \frac{38,3}{14,3} = 2,7$$

zu erreichen. Der dabei verwendete Härter PSA garantiert optimale spannungsoptische Eigenschaften der Gießlinge.

Auf die Modellherstellung selbst wird hier nicht näher eingegangen, vgl. [4]. Es sei nur bemerkt, daß das Modell der nachfolgend dargelegten Kolbenuntersuchung vom Original mittels Silikonkautschuk abgeformt wurde.

3.3. Belastungsvorrichtung

Zur Simulierung des Verbrennungsdruckes auf den Kolben bietet sich naturgemäß eine hydraulische Belastungsvorrichtung an. In [10] ist eine entsprechende Vorrichtung beschrieben, bei der eine Gummimembran den Druck auf den Kolbenboden überträgt. Tatsächlich wirkt der Zünddruck in voller Höhe auch auf den Kolbenmantel und sinkt nach dem 1. Kolbenring auf etwa 10 % ab.

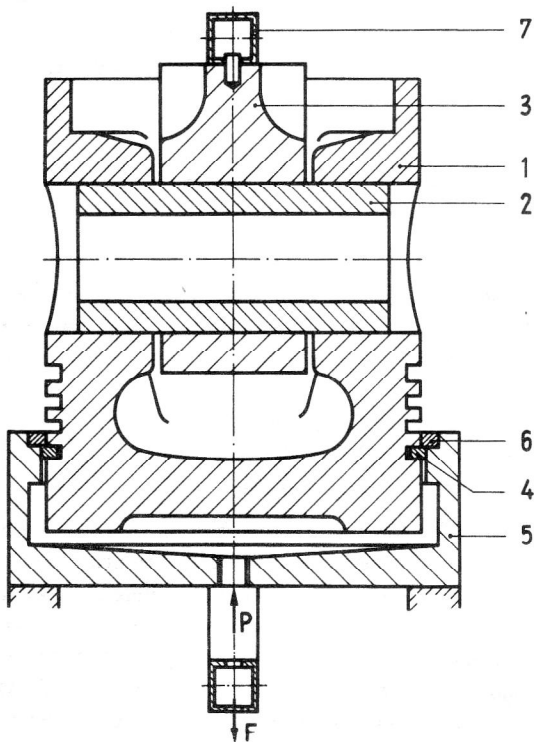


Bild 5
Hydraulische Belastungsvorrichtung für spannungsoptische Untersuchung von Motorkolben infolge Verbrennungsdruckbelastung
1 Kolbenmodell, 2 Bolzen, 3 Pleuelabschnitt, 4 Kolbenring, 5 Hydraulikgefäß, 6 Silikonkautschukdichtung, 7 Belastungsrahmen, F Kraft, p hydrostatischer Druck

Die in Bild 5 skizzierte Vorrichtung realisiert diese Belastung. Der 1. Kolbenring aus Epoxidharz ist mittels Silikonkautschuk abgedichtet und gewährleistet eine thermisch bedingte Modelldehnung in radialer Richtung. Diese Belastungsvorrichtung eignete sich auch, um die Beanspruchung des Kolbenrings zu untersuchen. Sogar das Verhalten eines teilweise im Verbund gelösten Ringträgers ist mit einer ähnlichen Vorrichtung [13] analysiert worden.

3.4. Versuchsergebnisse

Bild 6 zeigt als Beispiel das Isochromatenbild des in Bild 5 skizzierten Dieselmotorkolbens mit Durchmesser 150 mm. Die maximalen Kontaktspannungen treten infolge der großen Hinterschneidung der Nabe nicht in der Mittelebene, sondern um etwa 30° dazu geneigt auf. Eine Auswertung der Unterschnitte in den entsprechenden Orthogonalebene ermöglicht, die maximale Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (6) zu bestimmen und einen Dauerfestigkeitsnachweis für den Kolben zu führen.

Bild 7 zeigt die Isochromaten von 3 Bolzenschnitten im Gebiet der maximalen Beanspruchung. Die größte Spannung tritt im horizontalen Durchmesser am Innenrand

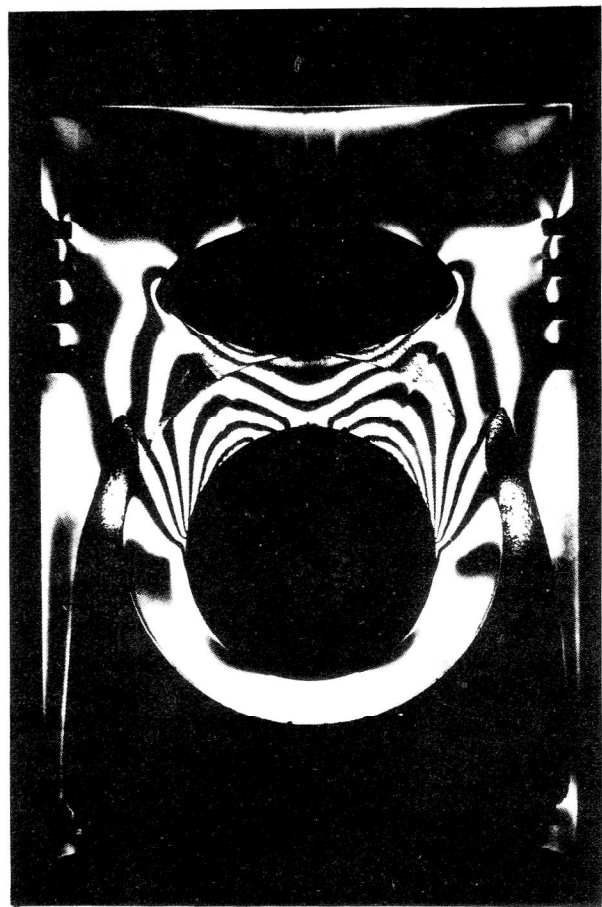


Bild 6
Isochromaten am Schnitt durch das Modell eines Dieselmotorkolbens. Material: EPILOX EG 1

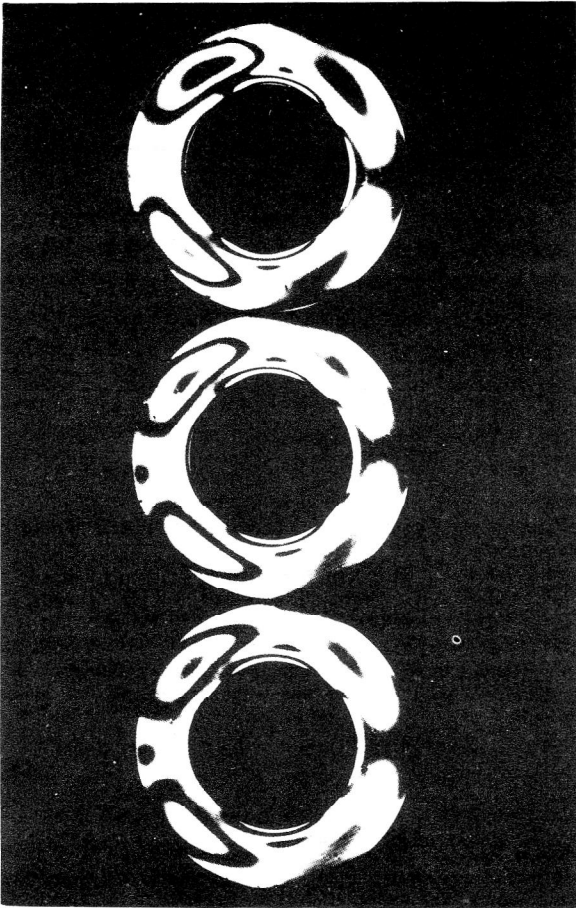


Bild 7
Isochromaten von 3 Querschnitten durch den Bolzen eines Dieselmotors. Modellmaterial EPILOX EG 34

auf. Die für die ursprüngliche Bolzenausführung aus den spannungsoptischen Ergebnissen ausgewertete relativ geringe Sicherheit gegen Dauerbruch konnte durch einen Bolzen mit größerem Innendurchmesser verbessert werden. Eine Messung der Durchbiegung und Ovalverformung des Kolbenbolzens ergab gute Übereinstimmung mit Berechnungsergebnissen nach einer theoretischen Näherungslösung [14].

4. Untersuchung des Tragverhaltens einer Tannenbaum-Verbindung mit Hilfe des Moiréverfahrens

Für rein elastisches Werkstoffverhalten weist die Literatur bereits eine Vielzahl von Arbeiten zur experimentellen Spannungsanalyse an hochbelasteten Tannenbaum-Verbindungen auf. Hierbei fanden vorwiegend die bewährten optischen Feldmeßverfahren wie die ebene Spannungsoptik [15], [16], das Reißlackverfahren [16] und die Dehngittermethode an Gummimodellen [17], [2] Anwendung.

Untersuchungen zum Traglastverhalten beschränken sich z. B. auf die Ermittlung der Bruchlast im Zugversuch [15].

Aus Gründen der beanspruchungsgerechten Gestaltung, der Betriebssicherheit und der Materialökonomie ist jedoch auch die Untersuchung des elastisch-plastischen bzw. plastischen Tragverhaltens einer Tannenbaum-Verbindung zweckmäßig. Hierfür bietet sich der Einsatz des Moiréverfahrens an.

4.1. Problemstellung

Die Schaufeln des Abgasturboladers eines Hochleistungs-Dieselmotors sind mit der Turbinenscheibe über ein Tannenbaumprofil, in das die Schaufeln axial eingeschoben werden, verbunden. Die Fliehkraftbelastung bei Drehzahlen bis 25000 min^{-1} und die Betriebstemperatur von $500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ stellen an die Festigkeit dieser Verbindung sehr hohe Anforderungen.

Um das Tragverhalten des Tannenbaumprofils der Turbinenscheibe auch jenseits der Elastizitätsgrenze einer experimentellen Analyse zugänglich zu machen, erfolgten zwei wesentliche Idealisierungen:

1. Die Fliehkraftbelastung der Turbinenscheibe wird durch eine statische Krafteinleitung über 4 benachbarte Schaufeln unter den Bedingungen eines ebenen Spannungszustandes nachgebildet. Dabei bleiben die in der Scheibe auftretenden Ringspannungen weitgehend unberücksichtigt. Diese Art der Belastung ist auch bei spannungsoptischen Untersuchungen üblich.
2. Die Verformung der Turbinenscheibe bei einer Betriebstemperatur von $500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ wird durch einen Modellversuch bei Raumtemperatur simuliert. Kriterium für die Wahl des Modellwerkstoffs ist, daß die Verformungen in Modell und Hauptausführung gleich groß sind.

Von den Meßprinzipien des Moiréverfahrens ist für die vorliegende Aufgabe das Isothetenverfahren besonders geeignet. Hierbei wird auf das Modell ein Raster (Objektraster) übertragen und mit diesem verformt. Bei Überlagerung des verzerrten Objektrasters mit einem Bezugsraster entsteht ein Interferenzstreifensystem, der Moiréeffekt.

Ist der Objektraster ein Kreuzraster, dessen Linienscharen parallel zu einem raumfesten, rechtwinkligen und kartesischen Koordinatensystem x_1, x_2 orientiert sind, so entsprechen die Moiréstreifen (Isotheten) Linien konstanter Verschiebungskomponenten u_1 bzw. u_2 . Es besteht der bekannte Zusammenhang

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2) &= n_1(x_1, x_2) \cdot p, \\ u_2(x_1, x_2) &= n_2(x_1, x_2) \cdot p, \end{aligned} \quad (8)$$

wobei n_1 und n_2 die Ordnungen bezüglich der beiden Isothetenfelder und p die Rasterteilung bedeuten. Durch numerische oder grafische Differentiation folgt aus Gl. (8) bei kleinen Verschiebungsgradienten der übliche Verzerrungstensor ϵ_{ij} zu

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= p \cdot \frac{\partial n_1}{\partial x_1}, & \epsilon_{12} &= \frac{1}{2} p \cdot \left(\frac{\partial n_1}{\partial x_2} + \frac{\partial n_2}{\partial x_1} \right) \\ \epsilon_{22} &= p \cdot \frac{\partial n_2}{\partial x_2}. \end{aligned} \quad (9)$$

4.2. Versuchstechnik

Das Modell wurde im Maßstab 1:1 hergestellt. Den Aufbau des Modellversuchs zeigt Bild 8.

Grundlage für die Wahl des Modellwerkstoffs ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Originalwerkstoffs bei erhöhter Temperatur. Ein weitgehend ähnliches Verhalten bei Raumtemperatur wurde bei der Aluminium-Legierung AlZnMg1F26 gefunden, wobei sich die Spannungen in der Hauptausführung mit Hilfe eines Maßstabes aus den Modellspannungen ermitteln lassen, Bild 9.

Charakteristisch für die Probenpräparation ist eine anwenderfreundliche Rasterübertragungstechnik, Bild 10, die nur geringe Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung stellt. Übertragbare Objektraster¹⁾ bis 100 Linien/mm ($p = 0.01 \text{ mm}$) können durch einen fotolithografischen Prozeß [18] erzeugt werden. Klebstoffe sind lösungsmittelfreie Mehrkomponentensysteme, wie z. B. Epoxidharze. Als Bezugsraster dienen Kontaktkopien auf feinkörnige fotografische Silber-Gelatine-Materialien [19].

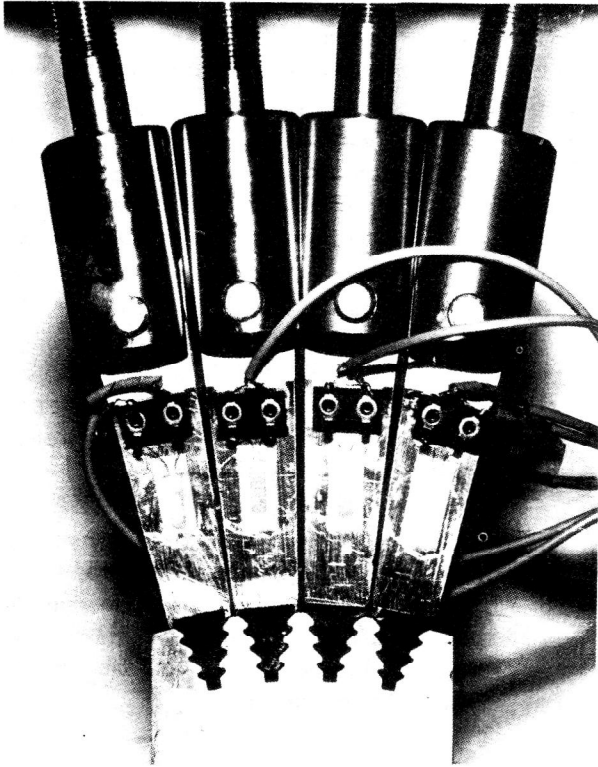


Bild 8

Aufbau des Modellversuchs

Die Kräfteinleitung erfolgt über 4 Schaufeln, wobei jede Schaufelkraft einzeln einstellbar war und mit Dehnungsmessstreifen gemessen wurde. Die relativ geringen Abmessungen des Modells gehen aus Bild 13 hervor

1) In beschränktem Umfang können derartige Raster interessierten Anwendern zur Verfügung gestellt werden.

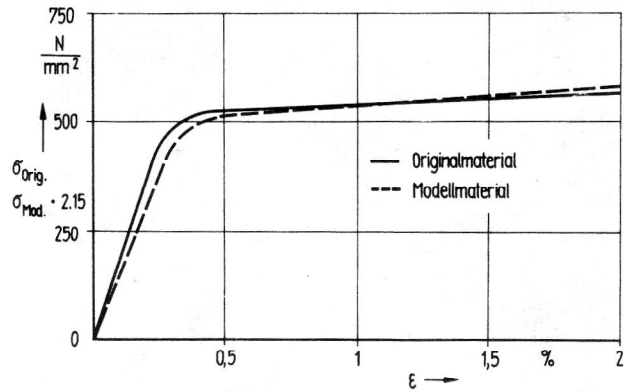


Bild 9

Fließkurven von Original- und Modellwerkstoff im einachsigen Zugversuch

Originalwerkstoff: hochwärmefeste Nickellegierung EI 437 B (GOST 5632-61), $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $T = 500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$, Probengröße: Durchmesser 6 mm, Meßlänge ca. 80 mm
Modellwerkstoff: AlZnMg 1 F 26, $\dot{\epsilon} = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, Probengröße: Durchmesser 6 mm, Meßlänge ca. 85 mm. Das Modellmaterial ist feinkörnig und zeigt eine stabile und glatte Fließkurve.

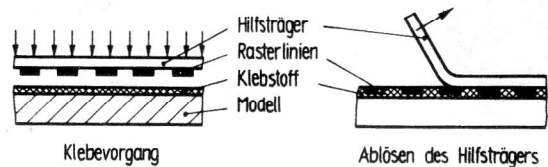


Bild 10

Rasterübertragungstechnik

4.3. Versuchsauswertung

Um die Ausbildung von plastischen Zonen beobachten zu können, ist eine schrittweise Laststeigerung mit der Belastungsvorrichtung von Bild 8 erforderlich. Zwischen den einzelnen Laststufen wurde die Verbindung zur Aufnahme der Isothetenfelder entlastet.

Die Bilder 11 und 12 zeigen für zwei charakteristische Laststufen die Isothetenfelder. Hierbei ist folgendes interessantes Ergebnis ablesbar. Als erstes erreichen die Zacken des Tannenbaumprofils den vollplastischen Zustand. Dies tritt für die vorliegende Geometrie bei der Laststufe von 1.23 kN/mm ein. Aus Bild 11 ist ferner zu entnehmen, daß trotz Herstellungstoleranzen und statisch unbestimmter Kräfteinleitung alle Zacken gleichmäßig tragen. Bild 12 zeigt das Verformungsfeld kurz vor dem Bruch der Turbinenscheibe. Die Zacken zeigen jetzt große Schubverformungen und auch der Querschnitt des Tannenbaumprofils ist in seinem unteren Teil vollplastisch, die Dehnungen sind dort jedoch wesentlich geringer. Die Traglast der vorliegenden Tannenbaum-Verbindung wird also durch das Abscheren der Zacken begrenzt. Die spezifischen Schaufellasten von Bild 11 und 12 zeigen, daß die Verbindung im plastischen Bereich noch erhebliche Tragfähigkeitsreserven besitzt.



Bild 11
 Isothermenfeld nach Entlastung der Tannenbaum-Verbindung.
 Objektraster: Kreuzraster, 100 Linien/mm, mit weichgemachtem Epoxidharz auf das Modell übertragen; Bezugsraster: Linienraster, 100 Linien/mm, ORWO-Fotoplatte LP 2
 Schaufellast/Modelldicke: 1.23 kN/mm

Eine quantitative Auswertung der Verschiebungsfelder entsprechend den Gln. (9) ist im Bild 13 dargestellt. Die eingetragenen Vergleichsdehnungen wurden nach der Beziehung

$$\epsilon_v = \sqrt{\frac{4}{3} (\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{11} \epsilon_{22} + \epsilon_{12}^2)} \quad (10)$$

ermittelt, wobei ϵ_v der Dehnung ϵ beim einachsigen Spannungszustand, z. B. Bild 9, entspricht. Bemerkenswert ist, daß die maximale Dehnung des Tannenbaumquerschnitts nicht in einem der drei „engsten“ Querschnitte auftritt.

Eine rechnerische Abschätzung der Bruchlast der Tannenbaum-Verbindung erbrachte mit 2.36 kN/mm eine gute Übereinstimmung zum gemessenen Wert von 2.33 kN/mm. Die Lage des Scherquerschnittes wurde dabei aus Bild 12 entnommen.

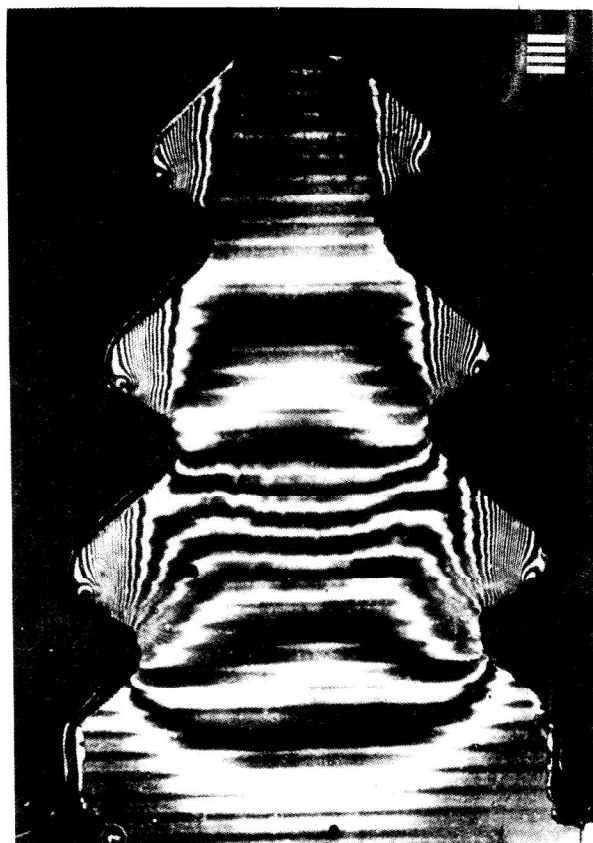


Bild 12
 Isothermenfeld des entlasteten Tannenbaumprofils kurz vor Erreichen der Traglast
 Schaufellast/Modelldicke: 1.96 kN/mm
 a) Verschiebung u_2 (in Beanspruchungsrichtung)
 b) Verschiebung u_1 (quer zur Beanspruchungsrichtung)

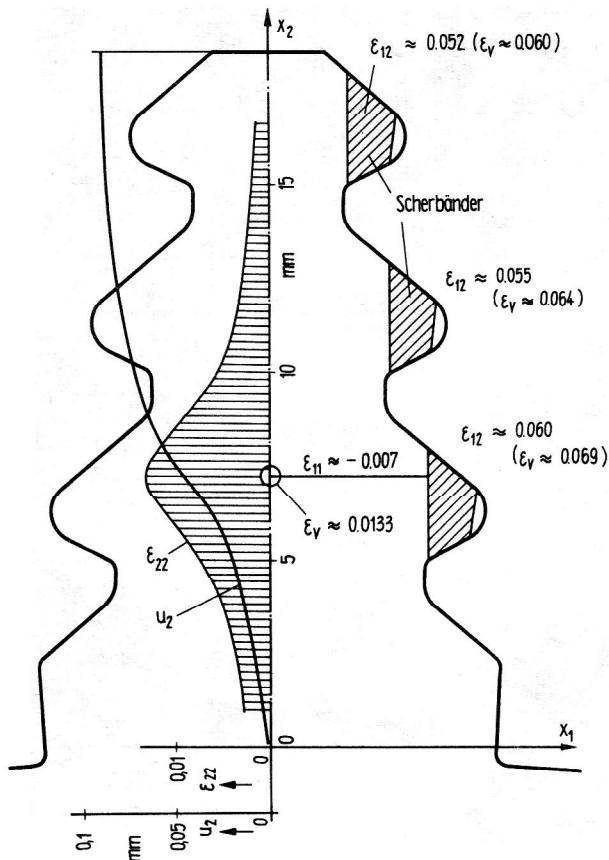


Bild 13
Verformung des Tannenbaumfußes der Turbinenscheibe
(Auswertung der Bilder 12)

LITERATUR

- [1] Heymann, J.: Stand und Entwicklung der experimentellen Festkörpermechanik an der Sektion Maschinen-Bauelemente. *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt* 20 (1978) 5, 641–650.
- [2] Vocke, W., Ullmann, K.: *Experimentelle Dehnungsanalyse*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1974, 196 S.
- [3] Topp, M.: *Spannungsoptische Untersuchung am Flanschmitnehmer NG 56*, Diplomarbeit TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Maschinen-Bauelemente, 1977.
- [4] Ullmann, K.: Herstellung und Untersuchung räumlich komplizierter Modelle mit dem Erstarrungsverfahren. *Problemseminar Experimentelle Spannungs- und Verformungsermittlung*, TU Dresden, H. 4/76, 37–51.
- [5] Heymann, J.: Technologische Probleme und weitere spezielle Verfahren. *Problemseminar Experimentelle Spannungs- und Verformungsermittlung*, TU Dresden, H. 4/76, 52–57.
- [6] Mickel, E., Sommer, P.: Festigkeitsfragen bei Leichtmetallkolben, *Motortechn. Z.* 5 (1943) 10, 295–304.
- [7] Blodig, G.: *Einflußgrößen zur Gestaltung hochbelastbarer Kolben*. Dissertation A TH Magdeburg, in Vorbereitung.
- [8] Ullmann, K.: Das Moiréverfahren zur Untersuchung komplizierter räumlicher Probleme. *Wiss. Z. Techn. Universität Dresden* 21 (1972) 1, 193–196.
- [9] Ullmann, K.: Deformationsmessungen an räumlich komplizierten Motorbauteilen nach dem Moiréverfahren. *Sbornik referatu mezinarodni konference o metodach experimentalni mechaniky*, Praha: Vydavatelstvi CVUT 1974, 388–394.
- [10] Föppl, L., Mönch, E.: *Praktische Spannungsoptik*, 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1972, 258–264.

- [11] Černosek, J., Perla, M.: *Composite model technique for three-dimensional photoelastic stress analysis*. *Experimental Stress Analysis 1970*, The Institution of Mechanical Engineers, London, 189–197.
- [12] Haberland, G., Pidde, C.: *Der dehnungsoptische Effekt der Epoxidharze beim spannungsoptischen Erstarrungsverfahren*. *Beiträge zur Spannungs- und Dehnungsanalyse II*. Berlin: Akademie-Verlag, 1966, 21–42.
- [13] Lange, W.: *Räumliche spannungsoptische Untersuchung des Ringträgerkolbens vom Motor VD 26/20A1–1 im Bereich der ersten und zweiten Ringnut*. Unveröffentlichter Bericht, VEB Schwermaschinenbau „Karl Liebknecht“ Magdeburg 1974.
- [14] Ullmann, K.: *Berechnungsverfahren für die Kolben-nabenpressung*. *Dieselmotoren-Nachrichten* (1972) 2, 3–7.
- [15] Dien, R., Ihlemann, H.: *Entwicklung axial eingeschobener Tannenbaumfüße für Laufschaufeln von Schiffsturbinen*. *Konstruktion* 16 (1964) 11, 452–460.
- [16] Durelli, A.J., Riley, W.F.: *Introduction to Photoelasticity*. Englewood Cliffs, New York: Prentice-Hall 1965.
- [17] Vocke, W.: *Spannungsermittlung an Kraftmaschinenteilen mit Hilfe der Gummimodellmethode*. *Maschinenbautechnik* 12 (1963) 2, 59–62.
- [18] Naumann, J.: *Herstellen und Kopieren von Rastern für die experimentelle Dehnungsanalyse mit dem Moiréverfahren*, *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt* 18 (1976) 3, 273–285.
- [19] Heymann, J., Meyer, R.: *Beitrag zur Herstellung von Phasenrastern für Dehnungsmessungen mit dem Moiréverfahren*, *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt* 14 (1972) 5, 647–658.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Heymann
Dr.-Ing. Jochen Naumann,
Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt,
Sektion Maschinen-Bauelemente
9010 Karl-Marx-Stadt, PSF 964.
Dr.-Ing. Klaus Ullmann, VEB Schwermaschi-
nenbau „Karl Liebknecht“
3011 Magdeburg, Alt-Salbke 6–10.