

Spannungsermittlung an einem Ventilkörper mittels räumlicher Spannungsoptik

Jaroslav Truhlár

1. Einleitung

Bei der Konstruktion und Dimensionierung komplizierter Maschinenbauteile ist es oftmals günstig, eine experimentelle Spannungsanalyse durchzuführen. Je nach Art der zu lösenden Aufgabe und den vorhandenen Möglichkeiten kann man die Untersuchungen an der Hauptausführung oder am Modell durchführen.

Armaturen von Druckkreisen in Kernkraftwerken sind kompliziert geformte Bauteile, von denen eine sehr hohe Betriebssicherheit verlangt wird. Für ihre Dimensionierung sind die Spannungen an der inneren Oberfläche maßgebend. Diese Spannungen können durch einen Modellversuch mit dem spannungsoptischen Erstarrungsverfahren bestimmt werden. In diesem Bericht wird die Spannungsbestimmung in der Symmetrieebene eines durch inneren Druck beanspruchten Ventils [1] beschrieben.

2. Theorie der Versuchsauswertung

Die spannungsoptischen Messungen erfolgten an einem Symmetrieschnitt des Modells, das während des Erstarrungsversuches durch den Innendruck $p_M = \sigma_3$ belastet wurde. Am Innen- und Außenrand des Modells wurden die Spannungen σ_1 (senkrecht zur Schnittebene) und σ_2 (in der Schnittebene) bestimmt.

Die Hauptspannungsdifferenz kann in der Schnittebene 2 – 3 (Bild 1) bei senkrechter Durchstrahlung direkt nach der Hauptgleichung der Spannungsoptik [2] bestimmt werden.

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{K_Z \cdot N_{23}}{t_1} \quad (1)$$

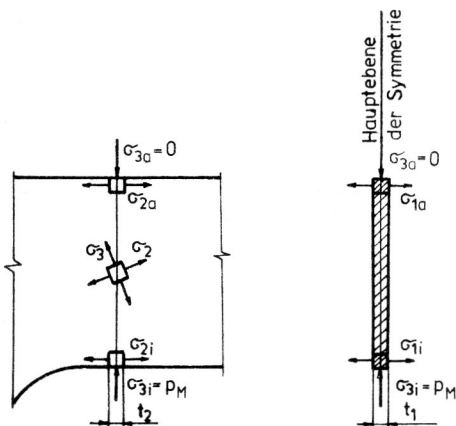


Bild 1
Spannungen in den Schnitten

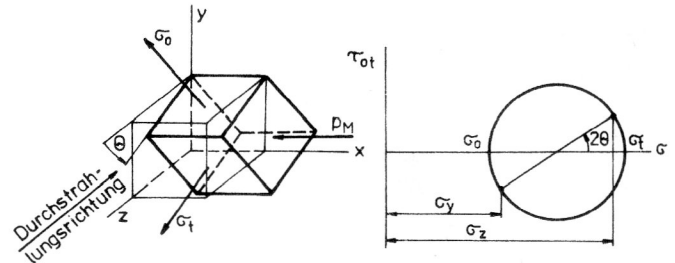


Bild 2
Spannungen bei schiefer Durchstrahlung

Darin ist K_Z die spannungsoptische Konstante, N_{23} die Isochromatenordnung und t_1 die Schnittstärke.

An der inneren Oberfläche ist $\sigma_3 = p_M$, so daß

$$\sigma_{2i} = \frac{K_Z \cdot N_{23}}{t_1} + \sigma_3 \quad (2)$$

ist. An der äußeren Oberfläche verschwindet σ_3 . Hier gilt:

$$\sigma_{2a} = \frac{K_Z \cdot N_{23}}{t_1} \quad (3)$$

Die Spannung σ_1 wurde durch schiefe Durchstrahlung [3] bestimmt. Unter Beachtung der Lage der gemessenen Stellen genügt eine nachträgliche Durchstrahlung bei Drehung des Schnittes um die Normale zum Umfang um den Winkel Θ , Bild 2. Da im allgemeinen bei Gefäßen mit innerem Überdruck

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (4)$$

gilt, erhält die Gleichung (1) bei der Durchstrahlung des gedrehten Ausschnittes die Gestalt

$$\sigma_y - \sigma_3 = \frac{K_Z \cdot N'_{23} \cos \Theta}{t_1} \quad (5)$$

Die sekundäre Hauptspannung σ_y hat nach [3] den Wert

$$\sigma_y = \sigma_1 \cdot \sin^2 \Theta + \sigma_2 \cdot \cos^2 \Theta \quad (6)$$

N'_{23} ist die Isochromatenordnung bei der schiefer Durchstrahlung des Modells. Aus den angeführten Gleichungen kann man die zur Schnittebene auf der inneren Körperoberfläche normale Spannung ausdrücken als

$$\sigma_{1i} = \frac{1}{\sin^2 \Theta} \left[\frac{K_Z \cdot N'_{23} \cos \Theta}{t_1} - \left(\frac{K_Z \cdot N_{23}}{t_1} + \sigma_3 \right) \cos^2 \Theta - \sigma_3 \right] \quad (7)$$

und auf dem äußeren Umfang

$$\sigma_{1a} = \frac{K_Z \cdot \cos \Theta}{t_1 \cdot \sin^2 \Theta} (N'_{23} - N_{23} \cos \Theta) \quad (8)$$

Bei dieser Methode ist es sehr wichtig, daß die Schnitte keinen Randeffect aufweisen.

Die zweite Möglichkeit, die Spannung σ_1 zu gewinnen, ist die Auswertung von senkrechten Unterschnitten [2]. Dabei werden aus dem Hauptschnitt der Dicke t_1 senkrecht zum Umfang Unterschnitte der Dicke t_2 entnommen (Bild 1), welche dann in der Richtung der Spannung σ_2 durchstrahlt werden. In diesen Unterschnitten hat die Hauptgleichung der Spannungsoptik die Form

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{K_Z \cdot N_{13}}{t_2} \quad (9)$$

Auf der inneren bzw. äußeren Oberfläche des Ventilkörpers gelten die folgenden Gleichungen

$$\sigma_{1i} = \frac{K_Z \cdot N_{13}}{t_2} + \sigma_3 \quad (10)$$

$$\sigma_{1a} = \frac{K_Z \cdot N_{13}}{t_2} \quad (11)$$

Die nach der Schubspannungshypothese ermittelte Vergleichsspannung σ_v ist in jedem der gemessenen Punkte durch die Differenz zwischen der größten und der kleinsten Spannung gegeben.

Die wirkliche Spannung σ_H an der Hauptausführung berechnet man nach dem Ähnlichkeitsgesetz

$$\sigma_H = \lambda_\sigma \cdot \sigma_M \quad (12)$$

wobei der Ähnlichkeitsmaßstab λ_σ bei einem Längenmaßstab $\lambda_l = 1$ aus dem Verhältnis der inneren Drücke an der Hauptausführung und dem Modell bestimmt wird.

$$\lambda_\sigma = \lambda_P = \frac{p_H}{p_M} \quad (13)$$

3. Technik des Experimentes

Das Ventilmodell wurde im Maßstab $\lambda_l = 1$ hergestellt. Da es sich um ein relativ kompliziert geformtes Bauteil handelt, wurde das Modell in einer Sandwichform mit innerem Kern gegossen (Bild 3). Die Form besteht aus einer inneren dünnwandigen Schicht aus Silikonkautschuk, welche die Modelloberfläche gut abformt, und dem äußeren Gipsteil. Die äußere Oberfläche des Modells stimmt mit der Form des Ventilkörpers überein. Die

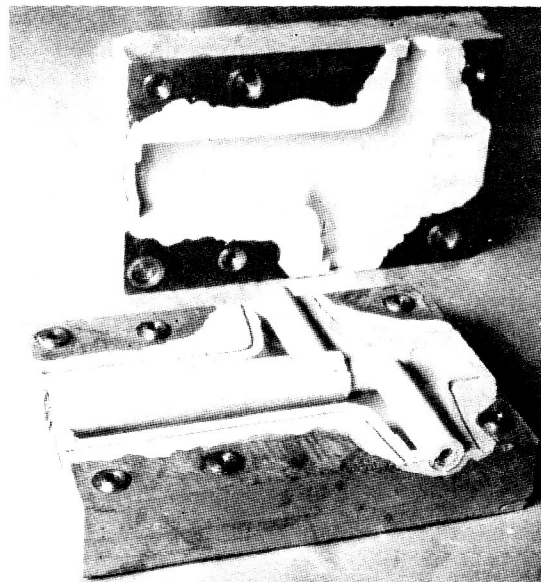


Bild 3
Gießform vor dem Zusammenbau

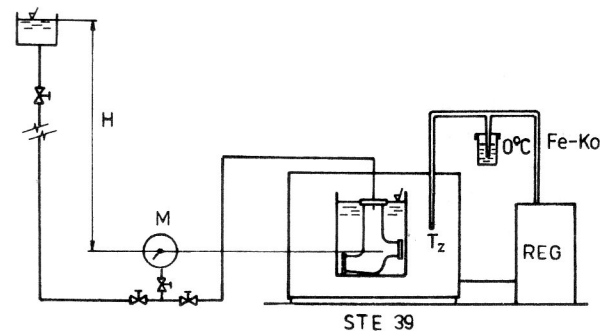


Bild 4
Schema der Modellbelastung

innere, kompliziertere Oberfläche wurde nach Abnahme des vereinfachten Silikonkernes maschinell nachgearbeitet.

Das Modell wurde aus Epoxidharz ChS Epoxy 100, gehärtet durch eine Mischung von Malein- und Phthalsäureanhydrid, gegossen. Die Temperaturbedingungen der Polymerisation entsprachen [4]. Im Sterilisator (Chirana STE 39) mit programm geregelter Temperatur wurde der Erstarrungsversuch durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Erwärmung des mit Silikonöl gefüllten und mit einem Epoxidharzstopfen fest verschlossenen Modells auf die Temperatur $T_Z = 135^\circ \text{C}$. Nach vollkommener Erwärmung wurde es durch hydrostatischen Druck p_m der Ölsäule unter Manometerkontrolle (Bild 4) belastet. Die Abkühlgeschwindigkeit betrug 3 K pro Stunde.

Die Auswertung der Schnitte erfolgte im Transmissionspolariscope. Dabei wurden die Interferenzbilder fotografiert und die Bruchteile der Isochromatenordnungen durch Tardy-Kompensation bestimmt. Zur Präzisierung der Messung wurde ein Telemikroskop der Firma Vishay eingesetzt.

Die schiefe Durchstrahlung der Schnitte erfolgte in einem Rahmen, der eine kontinuierliche Rotation in einer Ebene und eine stufenweise Drehung um zwei zueinander senkrechte Achsen erlaubt. Dieses Gerät befand sich während der Messung in einer Küvette mit Immersionsflüssigkeit, das heißt einer Flüssigkeit, die den gleichen Brechungsindex wie das Modellmaterial besitzt.

Die Unterschnitte wurden mit Hilfe einer Vorrichtung hergestellt, die auf einfache Art und Weise die Erzeugung von parallelen Stirnflächen mit einem Abstand t_2 durch Schleifen garantiert. Die dabei erzielte Oberflächenqualität war ausreichend, da auch hier die Messung im Immersionstrog erfolgte.

4. Ergebnisse

Aus den Messungen folgten die Spannungen σ_1 , σ_2 und die Vergleichsspannung σ_v . Bild 5 zeigt die auf die Hauptausführung umgerechneten Verläufe der Vergleichsspannung σ_v auf der äußeren und inneren Oberfläche des Ventilhauptschnittes. Daraus kann jeweils der Extremwert σ_{vmax} bestimmt werden. Da stets

$$\sigma_{vmax} < \sigma_{zul} \quad (14)$$

ist, bestätigt sich die Richtigkeit der Dimensionierung des Ventilkörpers. Zur Kontrolle wurden die experimentellen Werte in den zylindrischen Ventiltteilen mit theoretischen Werten verglichen, die für dickwandige Gefäße

unter Innendruck gelten. Der festgestellte Unterschied von $\pm 10\%$ stellt zugleich die erreichte Genauigkeit der spannungsoptischen Messung dar.

LITERATUR

- [1] Truhlár, J.: Stanovení napjatosti telesa uzavíracího ventilu Js 32. Výzkumná zpráva SVUŠS 84-02021, Praha Bestimmung der Spannung im Schlußventil Js 32 SVUŠS Forschungsbericht Nr. 84-02021, Praha.
- [2] Wolf, H.: Spannungsoptik. Springer-Verlag, Berlin 1961.
- [3] Allison, I. M.: Analysis of Photoelastic Data for Three-dimensional Stress Separation. Strain. 1970.
- [4] Poláček, J.: Tenkostenné modely pro fotoelasticimetrii. Čerpadla, potrubí, armatury. Sigma, 1970. Dünnwandige Modelle in der Spannungsoptik – Pumpen, Rohrleitungen, Armaturen. Sigma, 1970

Anschrift des Verfassers:

Ing. Jaroslav Truhlár
Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů
(Staatl. Forschungsinstitut für Maschinenbau)
190 11 Bechovice – Praha 9
Tschechoslowakei

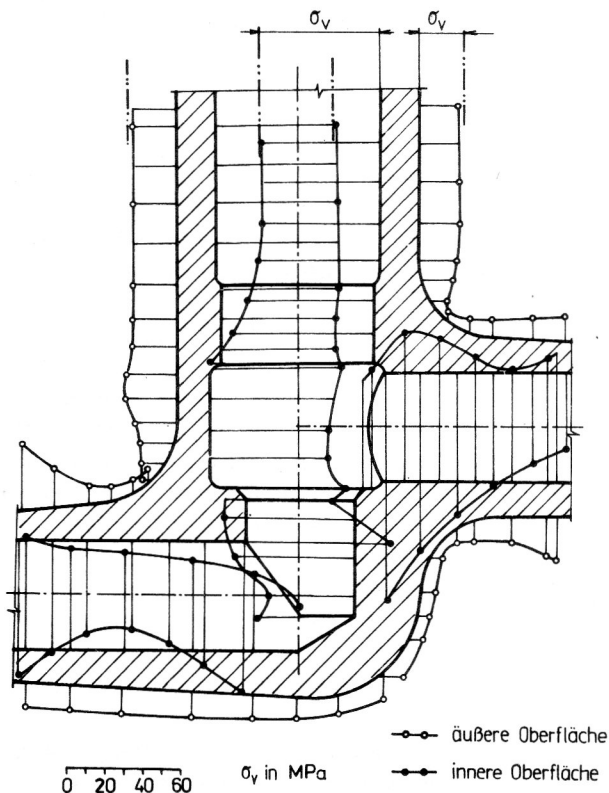


Bild 5

Verlauf der Vergleichsspannung σ_v in der Symmetrieebene des Ventilkörpers bezogen auf die Hauptausführung