

Experimentelle und theoretische Untersuchungen
des Spannungszustandes in achsensymmetrischen
Zylinderstutzen

Zbigniew Orłóś - WAT Warszawa
Manfred Szopa - OBRKiUE Tarnowskie Góry
Kazimierz Tomaszewski - WAT Warszawa

Experimentelle und theoretische Untersuchungen des Spannungszustandes in achsensymmetrischen Zylinderstützen

Zusammenfassung

Im Vortrag sind die experimentellen und theoretischen Spannungsanalysen in achsensymmetrischen Stützenverbindungen vorgestellt. Zur Auswertung der Versuchs- und Berechnungswerte wurden einige Festigkeitsfaktoren und Formfaktoren gewählt.

Die spannungsoptischen Untersuchungen wurden mittels des Einfrierverfahrens durchgeführt. Die theoretischen Spannungswerte wurden mit Finite-Elemente-Methode und Schalentheorie berechnet und miteinander verglichen.

1. Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wurden einige Probleme der experimentellen und theoretischen Untersuchungen über die Spannungsanalyse in achsensymmetrischen Stutzenverbindungen vorgestellt. Die besprochenen Untersuchungen wurden mit den Spannungsoptik-, Finite-Element- und Schalentheorie-Methoden durchgeführt. Die Versuchs- und Berechnungswerte der verwendeten Methoden wurden in dem Bericht miteinander verglichen und besprochen.

2. Festigkeits- und Formfaktoren

Zur Auswertung der Versuchs- und Berechnungswerte wurden folgende Festigkeitsfaktoren und Formfaktoren gewählt.

a/ Die Festigkeitsfaktoren :

$$\alpha_t = \frac{\sigma_t}{\sigma_n}, \quad \alpha_p = \frac{\sigma_p}{\sigma_n}, \quad \alpha_{red} = \frac{\sigma_{red}}{\sigma_{red n}} \quad (1)$$

Darin bedeuten

σ_t - Umfangsspannung ,

σ_p - Längsspannung ,

σ_n - Nennspannung ,

σ_{red} - Vergleichsspannung im Versuchspunkt , berechnet auf Grund der vereinbarten Festigkeitshypothese

wobei

$$\sigma_n = \frac{p \cdot R}{2S}, \quad (2)$$

und darin

p - Innendruck ,

R - mittlerer Schalenradius ,

S - Wandstärke der Kugelschale .

b/ Die Formfaktoren :

$$\begin{aligned} S/D_w & - \text{Grundschalenfaktor ,} \\ d_w/D_w & - \text{Durchmesserfaktor ,} \\ s/S & - \text{Wandstärkenfaktor ,} \\ \rho_1/S & - \text{Krümmungsradiusfaktor .} \end{aligned} \quad (3)$$

Darin bedeuten

D_w und d_w - innere Durchmesser für Böden und Stützen ,
 S und s - Wandstärken für Böden und Stützen ,
 ρ_1 - Krümmungsradius an der Anschlußstelle des
Stützens .

3. Untersuchte Stützenverbindungsfälle

Es wurden Stützensausführungen nach Bild 1 untersucht, wobei die geometrischen Grundfaktoren der Stützenverbindung folgende Werte für die vier Verbindungsvarianten A1, B1, C1 und D1 /Bild2/ hatten: $S/D_w=0,063$, $d_w/D_w=0,312$, $s/S=0,7$ (4)

Der Unterschied zwischen den Varianten liegt in dem Wert des äußeren Krümmungsradius ρ_1 im Anschlußbereich der Stützenverbindung und beträgt wie folgt :

- für A1 - $\rho_1 = 0$,
- u- B1 - $\rho_1 = 0,3 S$,
- C1 - $\rho_1 = 0,6 S$.

Die letzte Variante D1 betrifft die Verbindung mit $\rho_1 = 0,6 S$ und hat zusätzlich eine Änderung der Stützenkante.

4. Spannungsoptische Untersuchungen

Die spannungsoptischen Untersuchungen wurden mit dem Einfrierverfahren durchgeführt und in den Berichten [1] und [3] besprochen .

Das Stützenmodell wurde aus Gießharz "Epidian 5 " hergestellt und beim Einfrieren mit Luftdruck belastet . Aus dem Stützenmodell mit den erstarrten Vervormungen wurden Längsschnitte in

der Achsenfläche angefertigt. Einige der Längsschnitte dienten zur Vorbereitung von Teilschnitten in der Umfangsrichtung des Modells. Bild 3 zeigt eine Isochromatenverteilung in einem aus dem Modell angefertigten, 3 mm starken Längsschnitt. Das Isochromatenbild erhielt man bei dunkler Bildfläche. Dieses Bild wurde mittels einem Mikropolariskop 10 mal vergrößert. Auf dem Bild sieht man an der äußeren Anschlußstelle der Stützenverbindung eine dichte Isochromatenverteilung, die typisch für einen Kerb ist. Die erhaltenen Hauptspannungswerte aus den Längs- und Teilschnitten des Stützenmodells wurden im Bild 4 dargestellt. Das Bild zeigt einen Kurvenverlauf des Umfangs-
spannungsfaktors α_t und Längsspannungsfaktors α_p an der Außen- "z" und Innenseite "w" der Modellschale, wobei die Indexe der Spannungsfaktoren bedeuten: k - Stützen und D - Boden.

5. Theoretische Berechnungen

Paralell mit den experimentellen Untersuchungen wurden theoretische Berechnungen mit Anwendung der Finite-Element-Methode und Schalentheorie durchgeführt. Es wurden mittels der Finite-Element-Methode vier Konstruktionsvarianten (Bild 2) berechnet. Die Variante A1 wurde als Grundverbindung angesehen bei welcher der Krümmungsradius $\rho_1 = 0$ ist. Die auf elektronischer Rechenmaschine "ODRA 1304" ausgerechneten Werte der Verschiebungen und Spannungen wurden in Tafeln, wie auch in der Form von Spannungskartenbildern dargestellt. Bild 5 zeigt ein Beispiel einer Spannungskarte.

Auf Grund der durchgeführten Berechnungen wurden die Hauptspannungen σ_t und σ_p als bezogene Spannungsfaktoren α_t

und α_p auf Bild 6 gezeigt. Die in dem Bild zusammengestellten Spannungsfaktoren α_t und α_p haben die selbe Anordnung, wie die Spannungsfaktoren in Bild 4.

Es wurden für die Konstruktionsvariante A1 die Hauptspannungen σ_t und σ_p ebenfalls mit der Schalentheorie berechnet. Bild 7 zeigt die bezogenen Spannungsfaktoren α_t und α_p auf der Außen- und Innenseite der Stützenverbindung.

6. Spannungsanalyse

Aus dem Vergleich der Bilder 4, 6 und 7 geht hervor, daß die Faktorenkurven α_t und α_p ähnlich sind, jedoch die Faktorenwerte ziemlich voneinander abstehen. Die größten Unterschiede liegen in der Nähe der Anschlußstelle beider Schalen.

Die Differenzen der Spannungsfaktoren α_t und α_p hängen von dem Kerb an der Anschlußstelle der Stützenverbindung, sowie auch vom physikalischen und theoretischen Untersuchungsmodell ab. Einen Einfluß auf die Differenzwerte haben auch die verwendeten Berechnungsmethoden, wobei die Schalentheorie nur für dünnwandige Elemente geeignet ist.

Bild 8 zeigt die Spannungsverteilung in senkrechter Richtung zur Schalenmittelfläche. Auf dem Bild sind die Hauptspannungsfaktoren α_t (—) und α_p (-----) im senkrechten Querschnitt zur Boden- und Stützenwand sichtbar.

Aus der Spannungsanalyse geht hervor, daß bei Abständen die größer als 1,0 S von der Stützendurchgangslinie sind, die Spannungsverteilung senkrecht zur Bodenwandstärke mit guter Annäherung linear ist. Beim Stützen ist der lineare Verlauf der Spannungsverteilung senkrecht zur Wandstärke auch zu erwarten, wenn bei größeren Werten der Abstand von der Durchgangslinie zwischen Stützen und Boden größer als 0,8S ist.

In der Nähe der Verbindungsstelle sind die Faktorenwerte α_t und α_p für beide Berechnungsmethoden verschieden. Bei den

mittels der Finite- Element- Methode berechneten Werte der Spannungsfaktoren ist der Kerbeinfluß auf die Spannungskonzentration sichtbar.

7. Anstrengungsanalyse

Es wurde zur Analyse und Abschätzung des Spannungsverlaufes in achsensymmetrischen Stutzenverbindungen der lokale Anstrengungsfaktor angewendet

$$\alpha_{\text{red}} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{red}}}{\bar{\sigma}_{\text{red n}}} \quad (5)$$

wobei $\bar{\sigma}_{\text{red}}$ wurde nach der Formänderungsenergiehypothese berechnet.

Die vorher besprochenen Spannungsfaktoren α_t und α_p (Bilder 4, 6, 7) wurden ausgewertet und als Anstrengungsfaktoren α_{red}^w und α_{red}^z in Bild 9 dargestellt wobei "w" Innen- und "z" Außenseite bedeuten. Der Kurvenverlauf der Anstrengungsfaktoren für die drei angewendeten Untersuchungsmethoden wurde verglichen. Die Anstrengungsspitzen in den Außenfasern der Stutzenverbindung liegen im Bereich der Schalenduchgangslinie. Die Anstrengungsspitzen in den Innenfasern der Stutzenverbindung liegen nicht auf der inneren Stutzenkante, sondern sie sind etwas verschoben in der Richtung des

 Stutzens und erreichen ihr Maximum zwischen der Stutzenkante und Durchgangslinie der äußeren Bodenfläche. Die Differenzen zwischen den Anstrengungsspitzen weisen den Wert bis zur 10% auf. Beim Ablauf der Anstrengungskurven sind die Differenzen viel kleiner.

Der Einfluß des Krümmungsradius ρ_1 auf den lokalen Anstrengungsfaktor wurde mittels der vereinbarten Parameter β^w und β^z im Bild 10 dargestellt.

Die Parameter lauten

$$\beta^w = \frac{\alpha_{\text{red}}^w g_1}{\alpha_{\text{red}}^w g_{1=0}} \quad \beta^z = \frac{\alpha_{\text{red}}^z g_1}{\alpha_{\text{red}}^z g_{1=0}} \quad (6)$$

wobei

$\alpha_{\text{red}}^w g_1$ und $\alpha_{\text{red}}^z g_1$ - innere und äußere, maximale Anstrengungsfaktorenwerte beim Krümmungsradius g_1 ,

$\alpha_{\text{red}}^w g_{1=0}$ und $\alpha_{\text{red}}^z g_{1=0}$ - innere und äußere, maximale Anstrengungsfaktorenwerte beim Krümmungsradius $g_1=0$.

Auf Grund der Parameter β^w und β^z ist es möglich die Herabsetzung der lokalen Anstrengungsspitzen abzuschätzen.

$\alpha_{\text{red}}^w g_1$ wird kleiner um 3%, wenn $g_1 = 0,3S$ ist,
um 5%, wenn $g_1 = 0,6S$ ist,
um 7%, wenn $g_1 = 0,6S$ ist und außerdem eine geänderte Stützenkante hat.

$\alpha_{\text{red}}^z g_1$ wird kleiner um 28%, wenn $g_1 = 0,3S$ ist,
um 37%, wenn $g_1 = 0,6S$ ist,
um 36%, wenn $g_1 = 0,6S$ ist und außerdem eine geänderte Stützenkante hat.

8. Schlußfolgerungen

- Mittels der angewendeten spannungsoptischen Einfriermethode wurde die gute Anwendbarkeit der experimentellen Spannungsanalyse für das Abschätzen der Anstrengung in Stützenverbindungen bestätigt.
- Die Anwendung der Finite-Element-Methode bewährte sich praktisch bei der Berechnung von Hochdruckbehältern. Diese Methode ermöglicht die genauen Form- und Materialdaten der Stützen schweißnaht ins Rechenprogramm einzufassen.
- Für einen geschlossenen Bereich der Formfaktoren ist es möglich mittels der Schalentheorie einige Festigkeitsrichtwerte für die vorkommenden Sturzenformen zu berechnen.
- Die vorhandenen Untersuchungswerte geben eine komplexe Möglichkeit, die Festigkeit von Druckbehältern mittels der experimentellen Analyse von physikalischen Modellen, die geometrisch der Hauptausführung ähnlich sind, und auf Grund der theoretischen Berechnungen unter Anwendung von Rechenmaschinen abzuschätzen.

SCHRIFTTUM

- [1.] W.Kowalski, Zb. Orłoś , M. Szopa , K.Tomaszewski :Elasto-
optyczne badania modeli zbiorników ciśnieniowych.VI Sym-
pozjum Badań Doświadczalnych w Mechanice Ciała Stałego ,
Warszawa 1974 r .
- [2.] J. Szmelter, J. Antosik, S. Dobrociński : Teoretyczna
analiza naprężeń elementów kotłowych metodą elementów
skończonych. Osiowo - symetryczny stan naprężenia , WAT ,
Warszawa 1974 r .
- [3.] St. Ochelski, Zb. Orłoś, M. Szopa, K. Tomaszewski : Wy -
trzymałościowe badania modeli zbiorników ciśnieniowych .
Mechanika Teoretyczna i Stosowana , 3, 13, Warszawa 1975r.
- [4.] Zb. Orłoś, M. Szopa, K. Tomaszewski : Badanie stanu naprę-
żenia osiowo - symetrycznych połączeń króćcowych . VII
Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego,
Warszawa 1976 r .

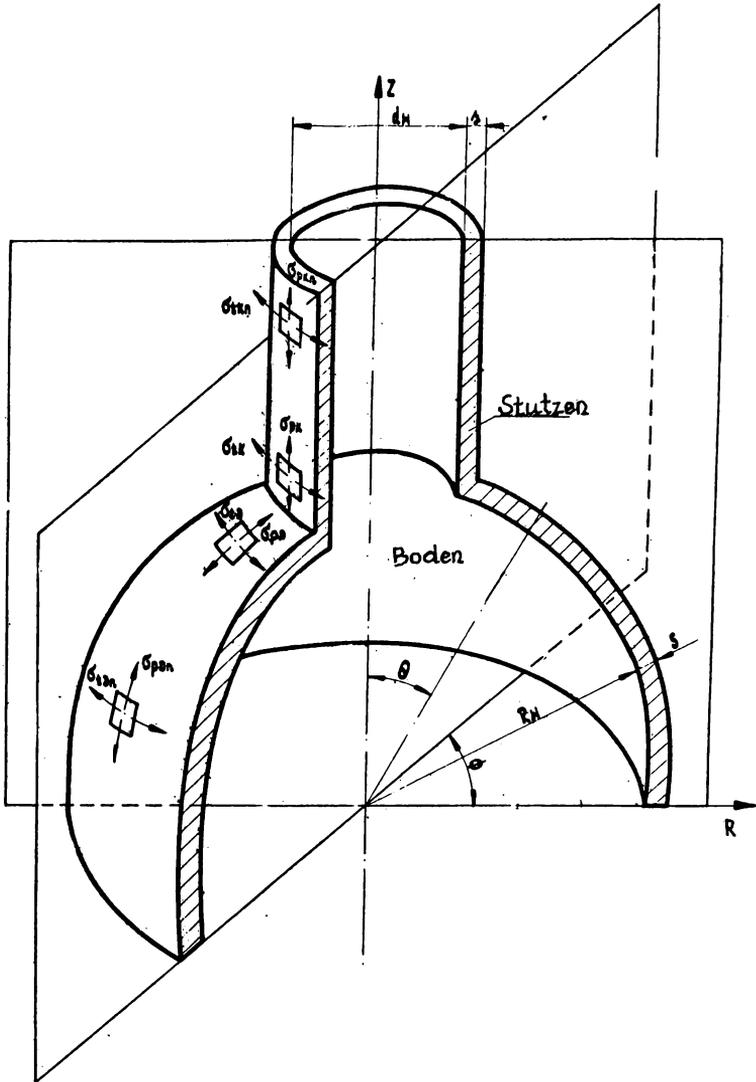


Bild 1.

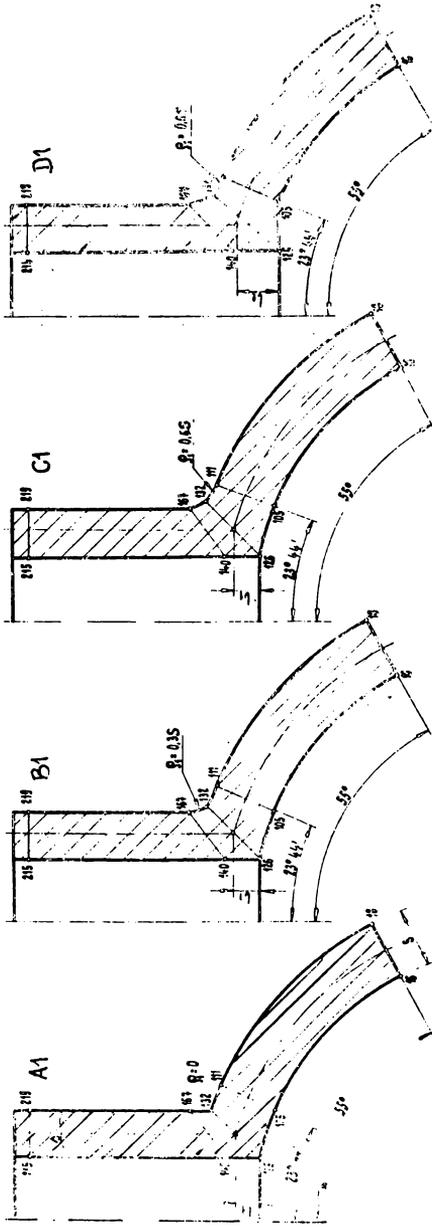
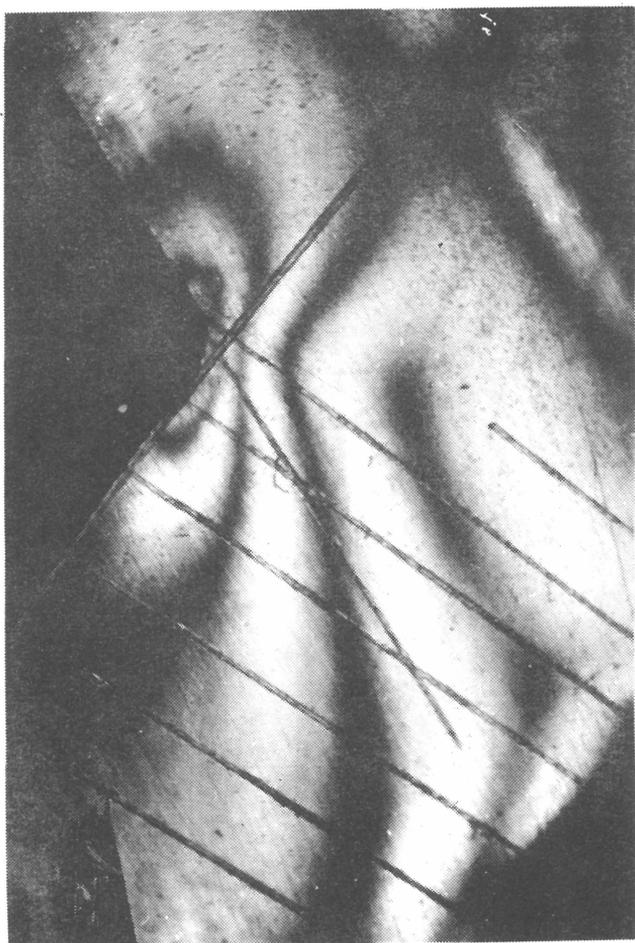


Bild 2.



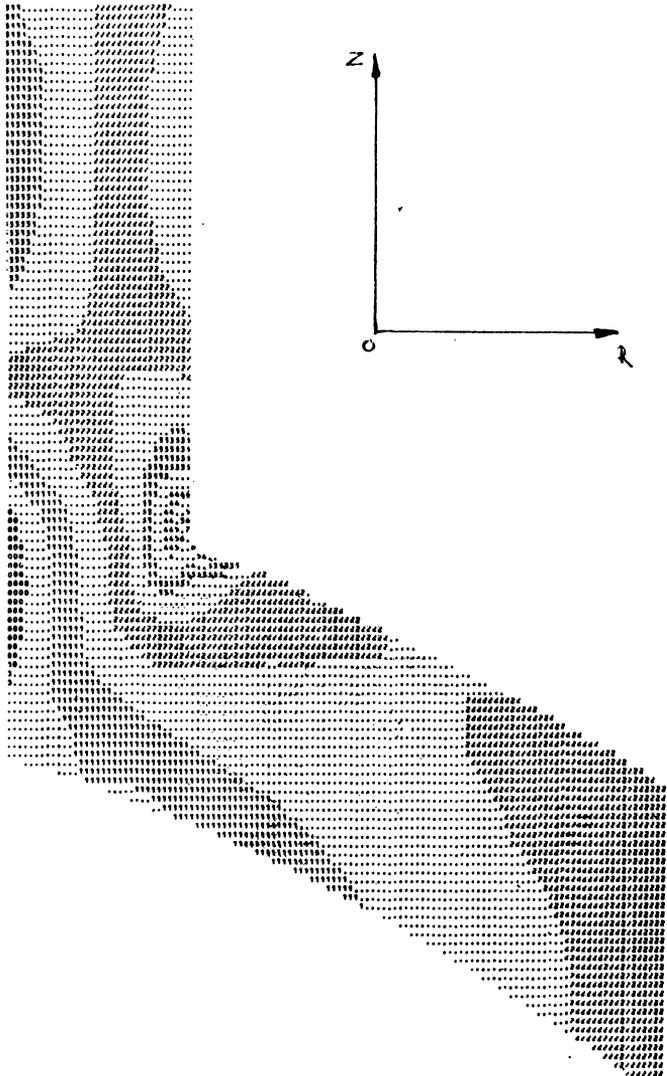


Bild 5.

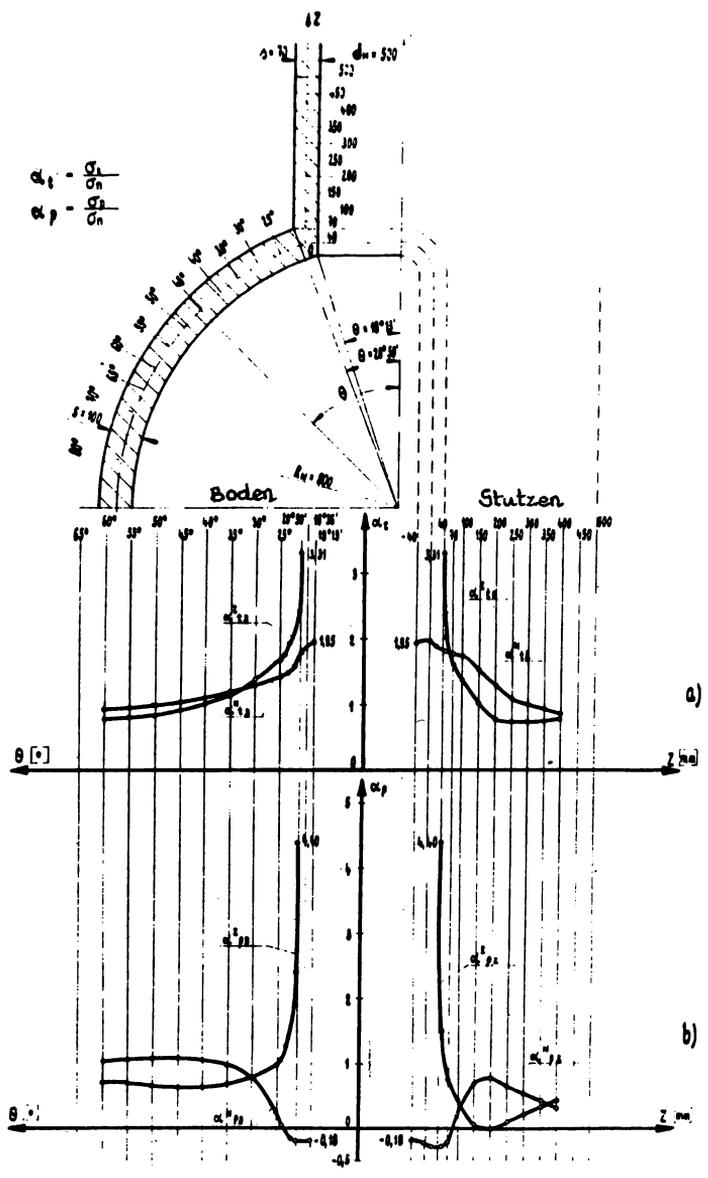


Bild 6

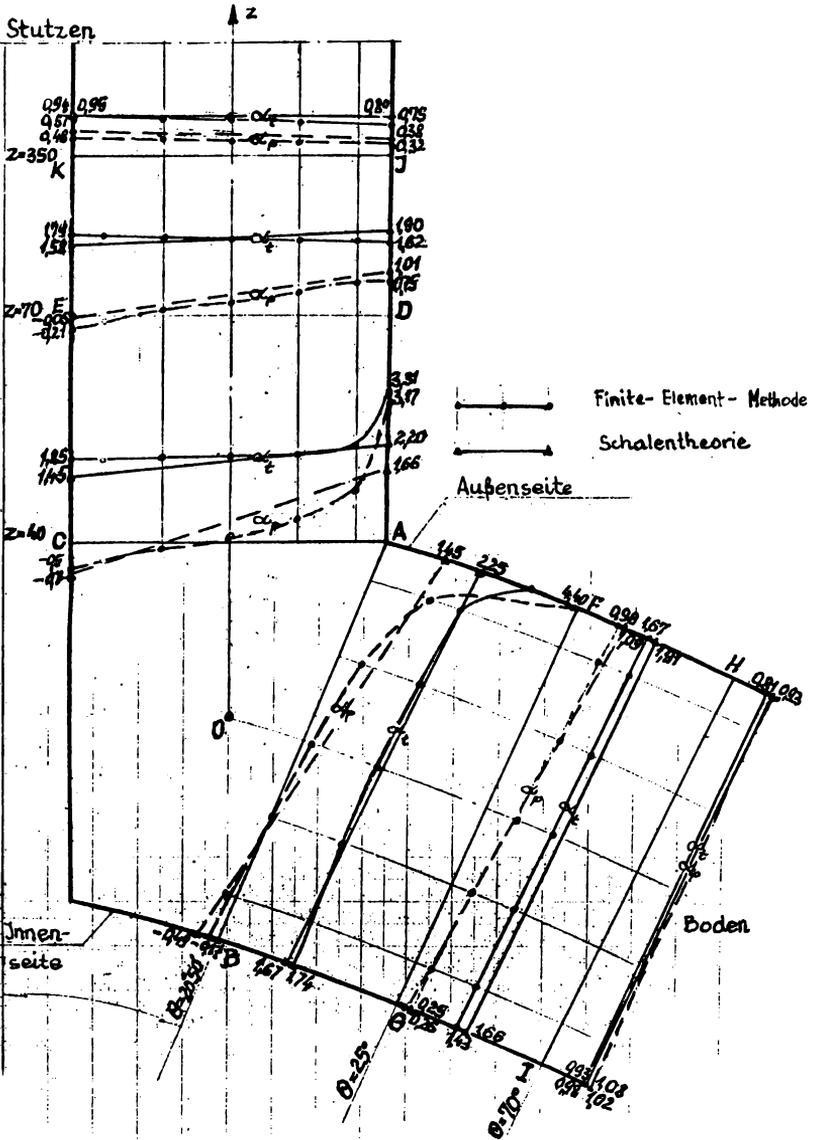


Bild 8.

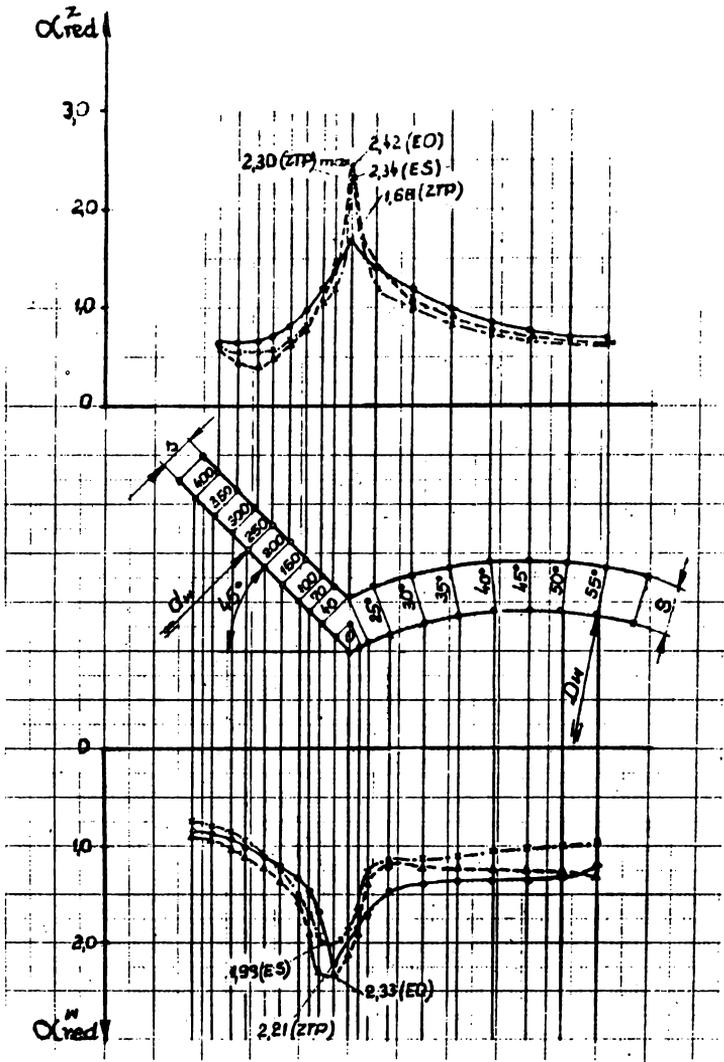


Bild 9.

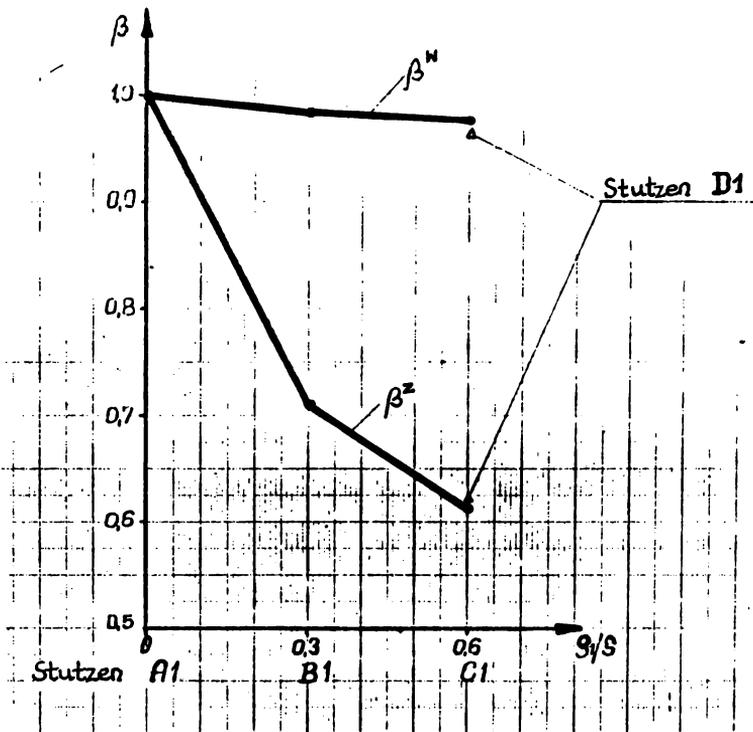


Bild 10.

10. Bildverzeichnis

- Bild 1. Achsensymmetrische Stutzenverbindung mit Spannungsbezeichnung
- Bild 2. Untersuchte Stutzenverbindungsfälle
- Bild 3. Isochromaten im Längsschnitt einer Stutzenverbindung 10 mal vergrößert. Monochromatisch, zirkular polarisiertes Licht auf dunkler Bildfläche
- Bild 4. Hauptspannungsverteilung in einer Stutzenverbindung nach dem spannungsoptischen Verfahren ,
a) α_t - Umfangsspannungsfaktor ,
b) α_p - Längsspannungsfaktor
- Bild 5. Kartenbild einer Spannungsverteilung in der Koordinatenrichtung "z" berechnet nach der Finite-Element-Methode
- Bild 6. Hauptspannungsverteilung in einer Stutzenverbindung berechnet nach der Finite-Element-Methode ,
a) α_t - Umfangsspannungsfaktor ,
b) α_p - Längsspannungsfaktor
- Bild 7. Hauptspannungsverteilung in einer Stutzenverbindung berechnet nach der Schalentheorie ,
a) α_t - Umfangsspannungsfaktor ,
b) α_p - Längsspannungsfaktor
- Bild 8. Vergleich der mit der Finite-Element-Methode und Schalentheorie berechneten Hauptspannungsfaktoren α_t und α_p in den senkrecht zur Schalenmittelfläche liegenden Schnittstellen
- Bild 9. Vergleich der Anstrengungsfaktoren α_{red}^z und α_{red}^w in einer Stutzenverbindung die unter Anwendung von drei Verfahrensmethoden berechnet wurden ,
a) ————— Schalentheorie (ZTP) ,
b) - - - - - Spannungsoptik (EO) ,
c) - . - . - . Finite-Element-Methode (ES)
- Bild 10. Einfluss des Krümmungsradius ρ_1 und der Innenkante auf die bezogenen Anstrengungswerte in der Stutzenverbindung