

ÜBER DIE VORAUSSETZUNGEN VON MESSUNGEN,
INSBESONDERE DEHNUNGSMESSUNGEN, AN DER
DICHTHAUT VON SPANNBETON-REAKTORDRUCK-BEHÄLTERN

(ON THE FEASIBILITY OF MEASUREMENTS ON CAVITIES ESPECIALLY
ON THE LINER OF PRESTRESSED CONCRETE
PRESSURE VESSELS OF NUCLEAR REACTORS)

G. MAGIERA, N. CZAİKA

*Fachgruppe G.1: Messwesen und Regeltechnik,
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), D-1 Berlin 45, Germany*

SUMMARY

For the assessment of Prestressed Concrete Pressure Vessels (PCPV) it is necessary to measure strains, deflections, temperatures, etc. on the liner of PCPVs. Because of considerable difficulties to measure on the internal side of the liner, the measurements must be performed in the boundary layer of the liner and the concrete. For this purpose we have to make cavities (behind the liner in the concrete) for the transducers.

These cavities could be a danger for the liner of the vessel, since during the prestressing of the vessel the liner is strained over the elastic limit into the plastic range. This prestressed liner could be pressed by the internal pressure of the vessel into these cavities. Thus it is possible

- that cracks could appear and endanger the vessel;
- that the values of strain and deflection measurements of the liner could be falsified by the cavities.

For our experiments we had to simulate three variables: σ_v prestress of the liner, p_i internal pressure, F_i the area of the cavities.

In the experiments we made a round formed model of the liner and put it on a steel support with cavities of different sizes. The steel support simulated the concrete body. We loaded the model by a pressure up to 700 bar [4900 psi]. For simulating the prestress of the liner we heat-shrunk a steel ring on our round formed liner and got different prestresses from $\sigma_v = 0$ to σ_v larger than the yield stress of the liner steel.

Our results show that the strain falsification is negligible (independent from the prestress σ_v) if

- the thickness of the liner is larger than 20 mm, and
- the internal pressure of the PCPV is smaller than 50 bar (350 psi), and
- the area of the cavity is smaller than a defined size (for instance: b smaller 20 mm, $l = \text{arbitrary}$).

However, if the internal pressure rises to about 500 bar (3500 psi) and the area of the cavity also increases there is a large dependence on the prestress of the liner.

In our paper we show the functionality of strains as a function of the area of the cavity, of internal pressure and of the prestress of the liner.

1. Einführung

Dieser Bericht beschäftigt sich mit der Möglichkeit, Dehnungen, Wege, Temperaturen usw. an der Stahlinnerauskleidung (Dichthaut oder Liner) eines Spannbeton-Druckbehälters für Kernreaktoren zu messen. Soll an der z.B. 20 mm dicken Dichthaut von Spannbeton-Druckbehältern gemessen werden, so sind hinter der Dichthaut im Beton Hohlräume für die Meßwertnehmer zu schaffen (s. Fig. 1). Von Messungen an der Innenseite der Dichthaut wird abgesehen, um vor allem jeden unnötigen Eingriff in den "heißen" Bereich des Kernreaktors zu vermeiden.

Solche Hohlräume im Beton können infolge der Belastung durch den Innendruck

— Risse in der Dichthaut verursachen und damit den Behälter gefährden,

— die Meßwerte bei Dehnungs- und Wegmessungen verfälschen.

Besonders kritisch und unübersichtlich sind die Verhältnisse dadurch, daß die Dichthaut beim Vorspannen des Behälters bis in den plastischen Bereich gestaucht wird.

Durch Modellversuche sollte geklärt werden, inwieweit eine Sicherheitsverminderung bzw. eine Meßwertverfälschung bei den erforderlichen Abmessungen der Hohlraum-Grundfläche zu erwarten ist. Eine mögliche Auswirkung der Kerbspannungen im Beton (im Bereich der Hohlräume) auf die Dehnungsverteilung in der Dichthaut wurde hier ausgeklammert.

2. Versuchseinrichtung

2.1 Allgemeines

Zur Simulierung des Reaktorinnendruckes stand ein Öl-Drucktopf mit einem zylindrischen Druckraum von 100 mm \varnothing und 200 mm Höhe zur Verfügung. Die Abmessungen dieses Raumes bestimmten insbesondere den größtmöglichen Modellmaßstab von 1 : 4. Die Dichthaut wurde durch eine Kreisscheibe aus dem Stahl C 15 (lt. DIN 17 210 mit $\sigma_s \approx 30 \text{ kp/mm}^2$) nachgebildet, der sich von dem für Kernkraftwerke vorgesehenen Dichthautstahl hinreichend wenig unterscheidet. Gemäß Fig. 2 wurde diese Scheibe 3 über den geeignet perforierten Festhaltetopf 4 von der Halteanordnung 5 gegen die Stahlunterlage 6 gedrückt, die den Beton ersetzte. In diese Stahlunterlage wurden innerhalb des von der Ringdichtung 1 gegen den Öldruck abgedichteten Bereiches Stahleinsätze 2 mit verschiedenen Hohlräumen eingelassen, deren Grundflächenabmessungen an Erfahrungswerten über die Abmessungen von Dehnungsaufnehmern orientiert wurden. Die Vorspannung in der die Dichthaut nachbildenden Scheibe 3b wurde ggf. durch Aufschrumpfen eines Kreisringes 3a aus hochfestem Stahl erzeugt. In einer Vorversuchsreihe, mit einem zylindrischen Geberhohlraum von 7,5 mm Radius ergaben sich folgende Resultate, die den Versuchsaufbau wesentlich mitbestimmten und den Modellmaßstab bestätigten:

- a) Die optimale Anpreßkraft P, mit der das Linermodell (Kreisscheibe) auf die Dichtung gepreßt werden mußte, betrug $P \approx 400 \text{ kp}$.
- b) Die Dichtung hielt bis 750 kp/cm^2 Öldruck.
- c) Die max. Dehnung im Mittelpunkt der Kreisscheibe betrug $\epsilon_m \triangleq 90 \cdot 10^{-6}/100 \text{ kp/cm}^2$.

d) Die Störungen im Liner klangen bis zu einem Radius von 15 mm auf $< 1/10$ der max. Dehnung ab.

Bei diesem Vorversuch brauchte die Vorspannung, die der Liner über die Betonvorspannung erhält, nicht beachtet zu werden, da hier nur eine grobe Abschätzung erfolgen sollte.

Zwei Auflagerbedingungen wichen von den tatsächlichen Bedingungen im Reaktor ab:

— Die Randeinspannung der Dichthaut war lediglich durch die Anpreßkraft P gegeben, die über den Festhaltetopf eingeleitet wurde, und zwar direkt über dem Umfang der Dichtung (s. Fig. 2a).

— Die - wenn auch geringe - Haftung zwischen Dichthaut und Beton (im Modell Stahl) war nicht vorhanden.

Beide Abweichungen bewirken einen größeren Einfluß des Geberhohlraumes auf die druckbelastete Dichthaut und verstärken das "Hineinziehen" der Dichthaut in den Geberhohlraum. Wir lagen damit auf der "sicheren Seite". Im einzelnen bestimmten drei Einflußgrößen die Versuchseinrichtung: Öldruck p_1 , Vorspannung σ_v und Geberhohlraumgrundfläche F_1 .

2.2 Öldruck

In Kernreaktoren entsteht ein Betriebsdruck bis zu 50 kp/cm^2 . Um klare Abhängigkeiten der Dehnung der Dichthaut als Funktion des Druckes zu bekommen, erhöhten wir den Druck bis 700 kp/cm^2 . Es zeigte sich nämlich, daß sich Unregelmäßigkeiten der Auflagerbedingungen bis zu einem Druck von $\approx 250 \text{ kp/cm}^2$ stark auswirkten und erst ab dieser Druckhöhe eine gleichmäßige Steigerung der Dehnung pro 50 kp/cm^2 Druckzunahme erreicht wurde. Je größer die Geberhohlraumgrundfläche wurde, um so weniger machten sich die Unregelmäßigkeiten bei steigendem Druck bemerkbar.

Der hohe Druck bis 700 kp/cm^2 zeigte jedoch einen sehr unangenehmen Effekt: Die verwendeten DMS-Ketten (vgl. Fig. 4), mit denen wir die Dehnungen aufnahmen¹⁾, waren sehr druckempfindlich. Bei den ersten Versuchen fielen von 10 DMS einer Kette bis zu 6 DMS aus, obwohl die Klebeanweisung genau befolgt wurde. Erst als wir den Anpreßdruck für den Aushärtvorgang um das 12fache auf 12 kp/cm^2 steigerten, ergaben sich Druckeffekte, deren Exemplarstreuung innerhalb $\pm 3 \cdot 10^{-6}/100 \text{ kp/cm}^2$ lagen. Nur diese ist bedeutsam, da bei der Messung der hydrostatische Druck auf DMS-Kette und Stahlscheibe (Dichthaut), wie auch die Temperatur, durch einen Kompensations-DMS kompensiert wurde.

2.3 Vorspannung

Die Vorspannung des Betons kann in der Dichthaut eine Spannung $|\sigma_v| > \sigma_s$, also im plastischen Bereich, erzeugen. Um eine klare Abhängigkeit der Dehnungen der Dichthaut von der Vorspannung σ_v zu bekommen, wählten wir für unsere Versuchsreihen drei Vorspannungen: $\sigma_v = 0, 0 < |\sigma_v| < \sigma_s, |\sigma_v| > \sigma_s$.

Das zur Erzeugung der Vorspannungen $\sigma_v \neq 0$ durch Aufschrumpfen des Kreisringes auf die Scheibe erforderliche Schumpfmaß wurde nach [1] berechnet. Zum Aufschrumpfen wurden Temperaturen bis 500° C angewendet. Um die Auflagerbedingungen zu verbessern, mußte die Unterseite von Ring und Scheibe plangeschliffen werden.

Die Vorspannung $|\sigma_v| > \sigma_s$ bereitete große Schwierigkeiten. Trotz eines genügend großen Schrumpfmaßes zwischen Ring und Scheibe stiegen die Dehnungen in der Scheibe nicht über 700 bis $800 \cdot 10^{-6}$ ($\epsilon_{soll} > 1430 \cdot 10^{-6}$). Es mußte angenommen werden, daß die Querdehnung in der unmittelbaren Randzone der Scheibe durch den auch in Dickenrichtung schrumpfenden Ring behindert wird. Damit ist die Spannung in der schmalen Randzone der Scheibe um den Faktor $1/1 - \nu$ größer als im übrigen Teil der Scheibe, und sie übersteigt dort σ_s . Dadurch fließt die Randzone so stark, daß der größte Teil der Schrumpfdéhnung in der Randzone erzeugt und nur ein kleiner Prozentsatz auf den übrigen Teil der Scheibe übertragen wird, Fig. 3. Durch eine spezielle Technik wurde diese Randzone gehärtet, so daß σ_s zur Randzone hin stark anstieg und ungefähr das 2fache von σ_s im Mittelbereich der Scheibe erreichte. Wir konnten so eine Déhnung in der Scheibe erzeugen, die weit über der Streckgrenzen-Déhnung $\epsilon_s = 1430 \cdot 10^{-6}$ lag: im Mittel bei $\epsilon = 2239 \cdot 10^{-6}$. Die Vorspannung nahm vom Rand zum Mittelpunkt der Scheibe hin geringfügig zu und erreichte hier ihren maximalen Wert.

2.4 Geberhohlraumgrundfläche

Die Geberhohlraumgrundflächen, die, wenn nicht anders bezeichnet, Rechteckform besitzen, teilten wir in zwei Kategorien ein. Einmal jene Größen, die eine geringe und vertretbare Verfälschung der Déhnung in der Dichthaut erwarten ließen (I) und zum anderen die Größen, die aufgrund ihrer großen Abmessungen für eine Anwendung kaum in Betracht kamen (II). Sie sollten lediglich die eindeutige Beziehung zwischen den Geberhohlraumabmessungen, der Vorspannung und dem Öldruck aufzeigen und einen Vergleich mit Berechnungen ermöglichen. Die Hohlräume wurden in zylinderförmige Stahlstücke mit der Höhe $H = 10$ mm und dem Radius $R = 12$ mm ("Geberhohlraumeinsätze") eingefräst und in die Versuchsanordnung eingesetzt (Fig. 2). Auch diese Einsätze trugen dazu bei, die Unregelmäßigkeiten der Auflagerbedingungen zu erhöhen. Nach einigen Versuchen ergab ein Übermaß von $\Delta H = 0,01$ mm über der Auflagerebene, insbesondere bei den Einsätzen der Kategorie I, die wenigsten Störungen. Die Geberhohlraumeinsätze R_1 bis R_6 hatten folgende Grundflächen:

Kategorie I

$$R_0: F = 0$$

$$R_1: F = 2,5 \cdot 24 \text{ mm}^2,$$

$$R_2: F = 3,5 \cdot 24 \text{ mm}^2,$$

$$R_3: F = 5 \cdot 5 \text{ mm}^2,$$

$$R_4: F = 5 \cdot 13,5 \text{ mm}^2,$$

Kategorie II

$$R_5: F = 12,5 \cdot 12,5 \text{ mm}^2,$$

$$R_6: F = \pi D^2/4, D = 24 \text{ mm}.$$

3. Versuchsdurchführung

Nachdem jeweils die Vorspannung σ_v durch das Aufschrumpfen des Ringes auf die Scheibe aufgebracht worden war, klebten wir die DMS-Kette in radialer Richtung auf. Die Zuleitungen der DMS-Kette wurden durch kleine Löcher im Festhaltetopf geführt, gelangten dann durch einen Deckel des Öldrucktopfes zu einer 100fach-Meßanlage, mit der die Meßstellen automatisch abgefragt und die Meßwerte mittels eines Druckers aufgezeichnet wurden. Belastet wurde mit einer Handpumpe in sieben gleichen Stufen bis 700 kp/cm^2 , wobei jede Stufe innerhalb eines Zeitintervalls von 1 min angesteuert wurde. Jeder Zyklus wurde mit einer Druck-

entlastung innerhalb 1 min auf $p_1 = 0$ abgeschlossen. Die Zeitintervalle wurden automatisch durch die Vielstellenmeßanlage vorgegeben. Die plötzliche Druckentlastung ergab gewisse Ausgleichsvorgänge, die jedoch nach 3 min abgeklungen waren. Jeder Zyklus wurde 1. allg. fünfmal durchgeführt.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Allgemeines zur Auswertung

Jede Versuchsreihe begann zur Überprüfung der DMS-Kette mit einer Messung des Druckeffektes, bei der das Dichthautmodell und der Kompensations-DMS dem Öldruck ausgesetzt wurden. Im 2. Schritt wurde der Geberhohlraumeinsatz R_0 mit $F = 0$ benutzt, um die Unregelmäßigkeiten der Auflagerbedingungen zu erfassen. Mit den Ergebnissen dieses Zyklus wurden die Meßwerte, die die Einsätze mit $F > 0$ ergaben, korrigiert.

Wir registrierten die Werte, die aus den Drücken 0, 100, 200, 300 ... 700 kp/cm^2 resultierten und werteten den Bereich von 300 bis 700 kp/cm^2 aus. Es wurde für jedes Druckintervall Δp (100 kp/cm^2) die Dehnungssteigerung ermittelt und korrigiert. Die Dehnungen wurden auf 50 kp/cm^2 bezogen, da so der Vergleich mit dem Betriebsdruck von Kernreaktoren leicht möglich ist.

4.2 Elastische Dehnung

Bei den Geberhohlräumen der Kategorie I (R_1 bis R_4) waren bei allen drei Versuchsreihen, d. h. für alle Vorspannungen, die Dehnungen vom ersten Belastungszyklus an elastisch. Auch beim Geberhohlraum R_5 verhält sich die Dichthaut entsprechend und weist keine Hysteresedehnung auf. Beim Geberhohlraum R_6 verhält sich die Dichthaut dagegen erst vom dritten Zyklus an elastisch.

Die örtliche Verteilung der elastischen Dehnung pro 50 kp/cm^2 Drucksteigerung für $\sigma_v = 0$ ist in Fig. 5 für die Geberhohlräume R_1 , R_3 , R_4 , R_5 dargestellt. Diese Dehnungen stimmen bei den gleichen Geberhohlräumen mit denen aus den Versuchsreihen $|\sigma_v| = \sigma_s$ (Fig. 6) und $|\sigma_v| > \sigma_s$ (Fig. 7) annähernd überein.

In Fig. 8 sind die elastischen Dehnungen für den Geberhohlraum R_6 aufgetragen. Die gemessene elastische Dehnung für diesen kreisförmigen Hohlraum R_6 wurde in Fig. 8 mit theoretischen Werten verglichen. Die theoretischen Werte, denen das statische System in Fig. 9 zugrunde liegt, wurden über die "Theorie der dünnen Kreisplatte mit kleiner Durchbiegung" (Theorie 1. Ordnung) [2] berechnet.

Die zunehmende Abweichung der theoretischen Ergebnisse von den gemessenen mit steigender Vorspannung hat speziell für die Vorspannung $|\sigma_v| > 0$ ihre Ursache auch darin, daß die vorgespannten Modelle aus Ring und Scheibe gefertigt sind, in der Theorie jedoch als völlig homogen angenommen werden. Dadurch bleibt die theoretische Dehnung hinter der gemessenen Dehnung zurück.

4.3 Plastische Dehnung

Das Besondere an den Versuchsergebnissen war, daß erst bei dem großen Geberhohlraum R_6 eine plastische Verformung des Dichthautmodells auftrat. Fig. 10a zeigt deutlich, daß

sich die Dichthaut über dem Hohlraum R_5 noch völlig elastisch und unabhängig von der Vorspannung verhält, während der Hohlraum R_6 in Fig. 10b eine deutliche Auffächerung der drei Kurven bei $\approx 100 \text{ kp/cm}^2$ bewirkt, d. h., die Dehnung der Dichthaut zeigt eine klare Abhängigkeit von der Vorspannung.

5. Schlußfolgerung

Grundsätzlich lassen sich die Ergebnisse den beiden Kategorien der Geberhohlraumeinsätze entsprechend einteilen:

Die Dehnungen infolge der Hohlräume der Kategorie I erreichen in einem Druckintervall von 50 kp/cm^2 nur geringe Werte, nämlich maximal $13 \cdot 10^{-6}$ und zeigen sich unabhängig von dem Grad der Vorspannung. Diese Dehnungen treten für eine 20 mm dicke Dichthaut bei einer Hohlraumgrundfläche von $20 \cdot 54 \text{ mm}^2$ auf. Ferner übersteigen die Dehnungen den Streubereich von $\pm 8 \cdot 10^{-6}$ dann nicht, wenn bei der 20 mm dicken Dichthaut die Breite des Hohlraumes $\leq 14 \text{ mm}$ ist, seine Länge jedoch einen beliebigen Wert besitzt.

Die Dehnungen infolge der Geberhohlräume der Kategorie II erreichen dagegen schon im elastischen Bereich für ein Druckintervall von 50 kp/cm^2 große Werte, nämlich mindestens $45 \cdot 10^{-6}$. Ferner zeigen die Dehnungen für den Geberhohlraum R_6 eine deutliche Abhängigkeit von der Vorspannung und eine plastische Verformung.

Die Geberhohlräume der Kategorie I führen also weder zu einer Sicherheitsverminderung des Behälters, noch zu einer wesentlichen Meßwertverfälschung. Ihre Abmessungen werden für die meisten Aufnehmersysteme ausreichend sein.

Literatur

- [1] Niemann, G.: Maschinenelemente. Bd. 1 Berlin/Wien/New York, : Springer-Verlag 1963
- [2] Betonkalender 1964 (Taschenbuch f. Beton- u. Stahlbetonbau) Berlin/München: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn.

¹⁾Typ KE 11 der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik; Kleber EPY 500

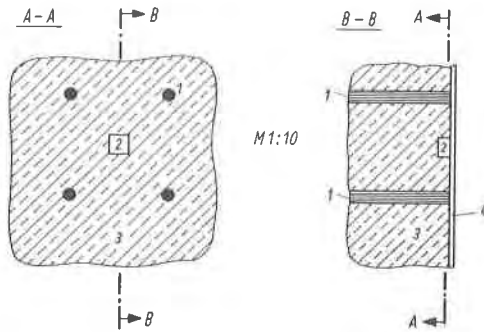


Fig. 1: Ausschnitt aus dem Spannbeton-Reaktordruckbehälter.

- 1. Dichthautanker
- 2. Geberhohlraum
- 3. Beton
- 4. Dichthaut

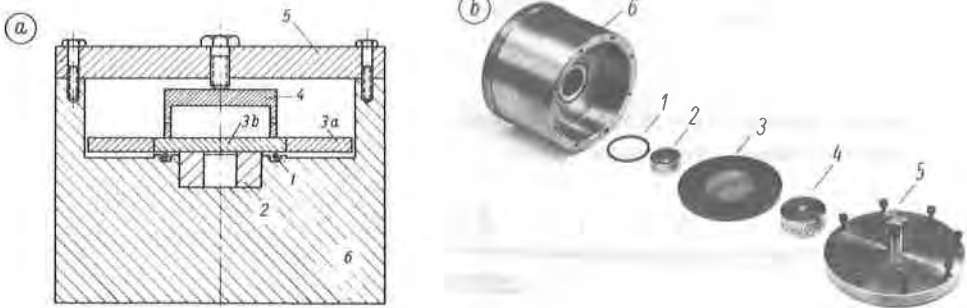


Fig. 2: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Rückwirkung eines Geberhohlraumes auf die Dichthaut.

1 ... 6 - Text

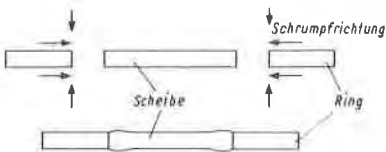


Fig. 3: Aufschrumpfen eines Ringes auf die Scheibe ohne Randhärtung (Schema).

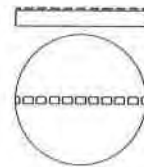


Fig. 4: Anordnung der DMS-Kette KE 11 auf der Scheibe.

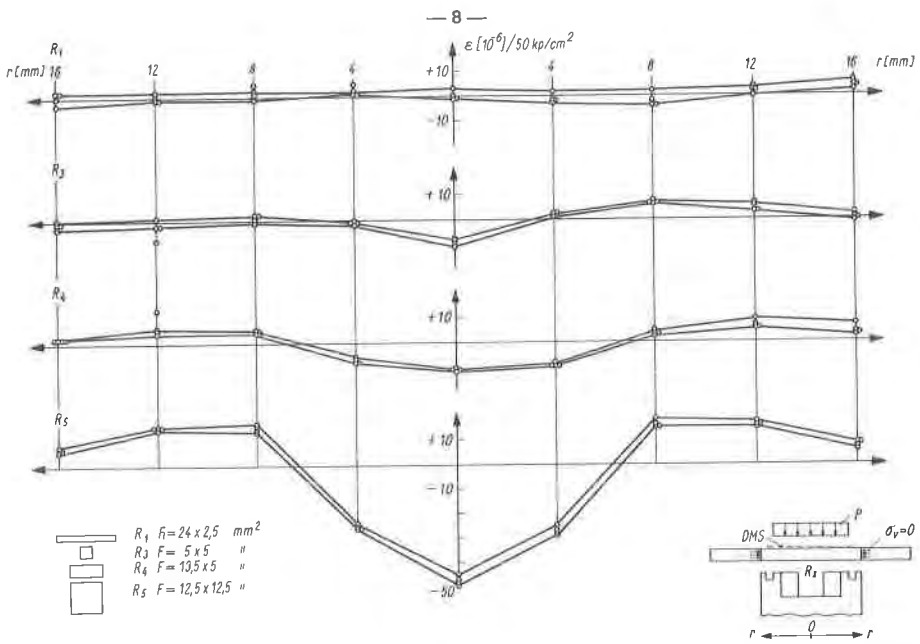


Fig. 5: Radiale Dehnung ϵ (pro 50 kp/cm^2) als Funktion des Dichthautradius r für verschiedene Geberhöhlräume R_1 Vorspannung $\sigma_v = 0$

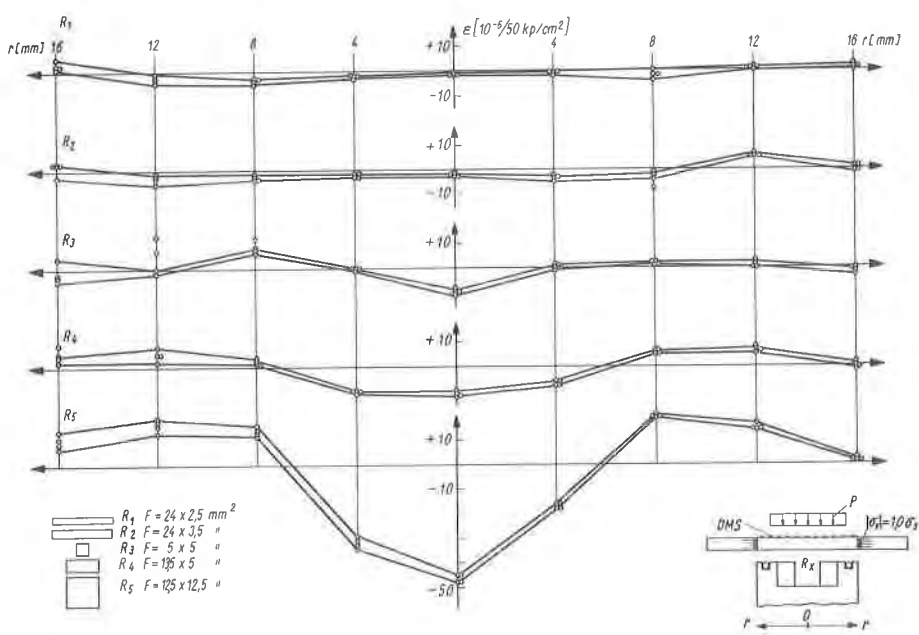


Fig. 6: Radiale Dehnung ϵ (pro 50 kp/cm^2) als Funktion des Dichthautradius r für verschiedene Geberhöhlräume R_1 Vorspannung $|\sigma_v| = \sigma_s$

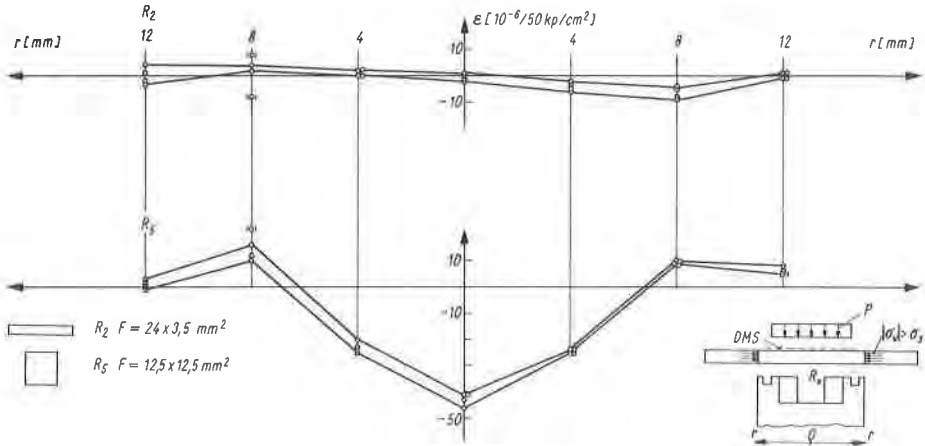


Fig. 7: Radiale Dehnung ϵ (pro 50 kp/cm^2) als Funktion des Dichthautradius r für verschiedene Geberhohlräume R_1 Vorspannung $|\sigma_v| > \sigma_s$

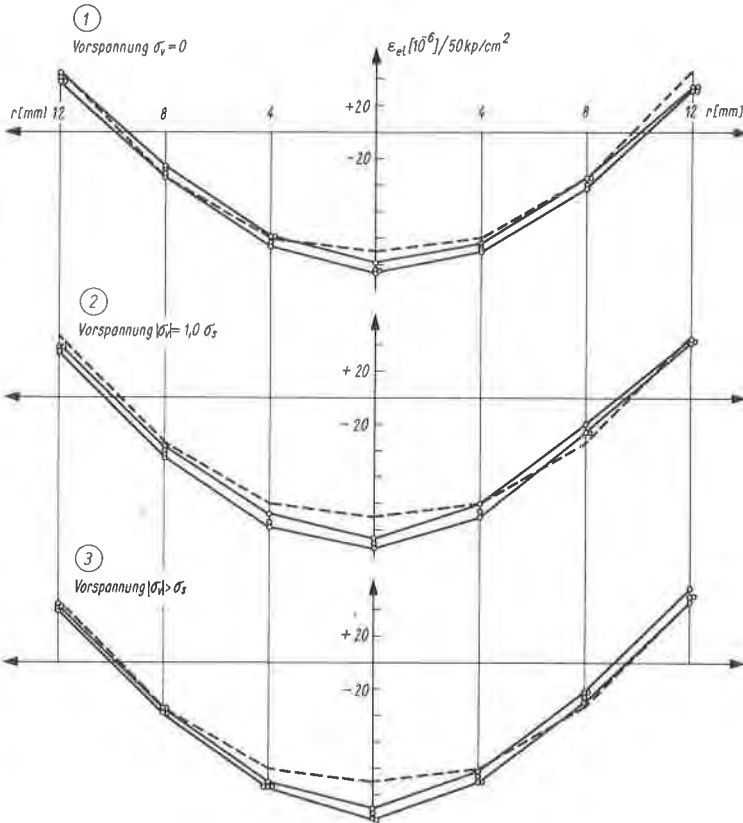


Fig. 8: ϵ_{el} (pro 50 kp/cm^2) aus den elastischen Zyklen 3, 4 und 5 für den Geberhohlraum R_6 --- theoretische Werte
Parameter: Vorspannung σ_v

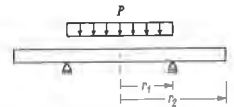


Fig. 9: Statisches System des Dichthautmodells

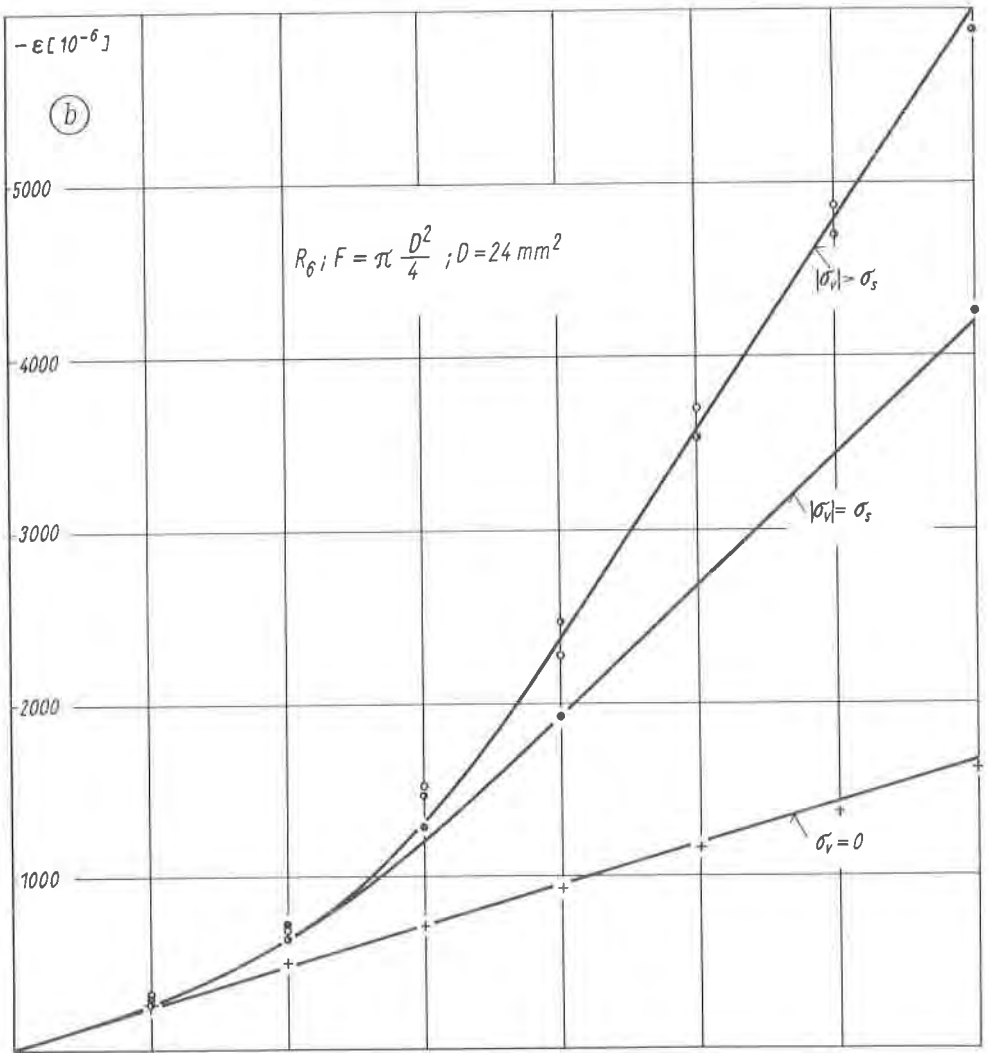
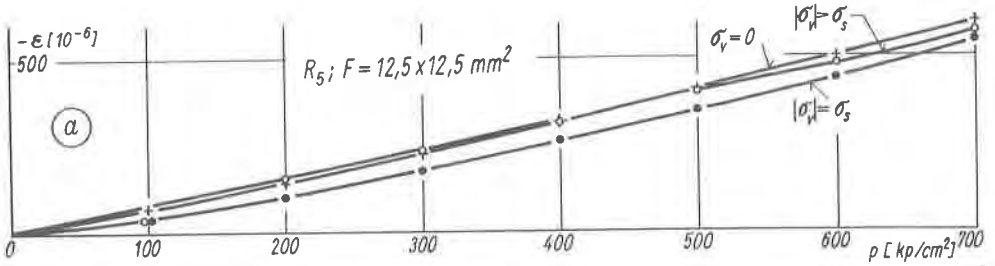


Fig. 10: Radiale Dehnung ϵ ($r = 0$) aus dem ersten Lastzyklus für die Geberhohlräume R_5 (a) bzw. R_6 (b) als Funktion der Last p
 Parameter: Vorspannung σ_v