

# Zum Deformationsverhalten bleiabgeschirmter Behälter unter Stoßbelastung

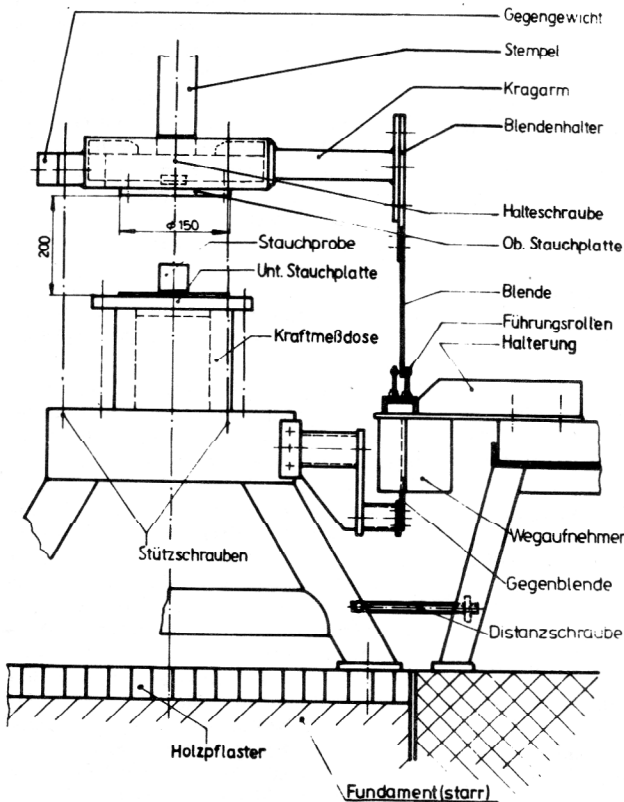
Rudolf Diersch

## 1. Einleitung

Transportverpackungen für radioaktive Stoffe müssen speziellen Anforderungen genügen, damit die Umwelt vor den Gefahren geschützt wird, die sich aus der ionisierenden Strahlung und der Radiotoxizität dieser Stoffe ergeben. Eine Gefährdung muß auch dann ausgeschlossen werden, wenn eine solche Verpackung in einen Transportunfall verwickelt ist. Die Verpackungsbeschädigungen, die bei einem Unfall auftreten, werden entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen zum Transport radioaktiver Stoffe [1] durch Prüfungen nachgebildet. Eine dieser Prüfungen ist der freie Fall der Verpackung aus 9 m Höhe auf eine starre, unnachgiebige Unterlage.

Voraussetzung für die Begutachtung der Verpackungssicherheit ist die Kenntnis der beim Aufschlag an der Verpackung auftretenden Stoßkräfte und der damit verbundenen plastischen Deformationen und Spannungen.

Ziel dieses Beitrages ist es, die unter den Bedingungen der 9-m-Fallprüfung an zylindrischen, blei- und stahl- abgeschirmten Transportverpackungen auftretenden



**Bild 1**  
 Versuchsanordnung für Schlag-Stauch-Versuche mit Kraft- und Wegmeßeinrichtung

Stoßkräfte und Deformationen auf rechnerischem Wege zu ermitteln.

## 2. Experimentelle Ermittlung des Deformationsverhaltens von Blei beim Schlagstauchen

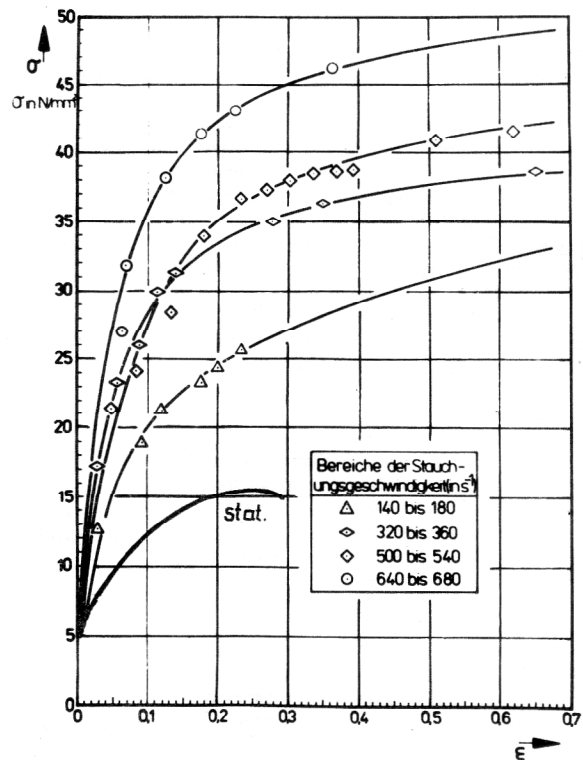
Das für die Berechnungen erforderliche Deformationsgesetz von Blei als Hauptbestandteil der betrachteten Transportbehälter war für die 9-m-Fall-Bedingungen nicht bekannt und wurde auf experimentellem Wege bestimmt.

Grundlage für die Formulierung des Deformationsgesetzes für einen Werkstoff sind die Fließkurven.

Von den zur Bestimmung von Fließkurven üblichen Verfahren wurde der Parallelstauchversuch herangezogen.



**Bild 2**  
 Gestauchte Bleiprüben



**Bild 3**  
 Fließkurven von Blei für unterschiedliche Formänderungsgeschwindigkeiten

Die speziellen Schlag-Stauchbedingungen der 9-m-Fallprüfung wurden auf einer mechanisch-pneumatischen Hochgeschwindigkeits-Umformmaschine nachgebildet. Bei den Versuchen wurden die Zeitverläufe der Stauchkraft und des Stauchweges gemessen. Bild 1 zeigt die Versuchs- und Meßtechnik im Einbauzustand.

Auf der genannten Versuchseinrichtung wurden zylindrische Proben aus Feinblei bei Raumtemperatur schlaggestaucht, wobei die Stempelaufschlaggeschwindigkeit im Bereich von 6 bis 20 m/s variiert wurde (vgl. Bild 2).

Die Versuchsergebnisse weisen aus, daß der Werkstoff Blei mit steigender Impulsbelastung gegenüber den unter quasistatischen Bedingungen ermittelten Werten eine deutliche Erhöhung der Formänderungsfestigkeit erfährt. Die Fließkurven werden mit wachsender Formänderungsgeschwindigkeit nach höheren Werten der Formänderungsfestigkeit verschoben (vgl. Bild 3). Die mathematische Formulierung des Deformationsgesetzes aus diesen Fließkurven erfolgt bei der Behandlung der Berechnungsverfahren.

### 3. Berechnung von Deformationen und Stoßkräften mit Hilfe eines Masse-Feder-Modells

Für die rechnerische Ermittlung der Behälterdeformation in Aufschlagrichtung und der dabei wirkenden Kraft wurde ein eindimensionales Masse-Feder-Modell herangezogen.

Bei der Anwendung dieses Modells wird die Verpackung durch fiktive Schnitte parallel zur Aufschlagfläche in Scheiben zerlegt. Diese scheibenförmigen Massen werden durch Federelemente miteinander gekoppelt. Letztere repräsentieren die Deformationscharakteristik des Verpackungswerkstoffes, die in Form der Fließkurven ermittelt worden war.

Am Massenelement mit der Masse  $m_i$  gilt für das Kräftegleichgewicht

$$m_i \ddot{x} + A_i \cdot \sigma_i - A_{i+1} \cdot \sigma_{i+1} = 0 \quad (1)$$

wobei die Rückstellkräfte der Federelemente durch das Produkt aus momentaner Stauchfläche  $A$  und der dazugehörigen Stauchspannung  $\sigma$  ersetzt worden sind. Für  $\sigma$  ist das Deformationsgesetz des Behälterwerkstoffes einzusetzen. Das Deformationsgesetz von Blei – aus den experimentell aufgenommenen Fließkurven gewonnen – lautet

$$\sigma_{i \text{ pb}} = \frac{962,5 \cdot \epsilon_i}{1 + 25,0 \cdot \epsilon_i} \cdot \left(1 + 0,073 \frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_{oi}}\right) \quad (2)$$

Der für das Blei verformungsbehindernde Einfluß des äußeren Stahlblechmantels wurde im Deformationsgesetz durch das additive Glied

$$-p = \frac{2s}{d} \sigma_{ist}(\epsilon) = \sigma_{r \text{ max}} \quad (3)$$

berücksichtigt. Damit wird der vom Stahlblechmantel aufnehmbare Innendruck näherungsweise erfaßt.

Das zu lösende Differentialgleichungssystem für  $n$  Massen hat die Form:

$$m_i \ddot{x}_i + \sigma_i \frac{A_{oi}}{1 - \epsilon_i} - \sigma_{i+1} \frac{A_{oi+1}}{1 + \epsilon_{i+1}} = 0 \quad (4)$$

$$m_n \ddot{x}_n + \sigma_n \frac{A_{on}}{1 - \epsilon_n} = 0$$

Anfangs- und Endbedingungen:

$$\left. \begin{aligned} t = 0 : \dot{x}_i &= \sqrt{2GH} = 13,3 \text{ m/s} \\ x_i &= 0 \\ t = t_i : \dot{x}_i &= 0 \\ x_i &= x_{i \text{ max}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Für die Integration des Gleichungssystems wurde wegen des geringen Rechenzeitbedarfes eine Modifikation des Predictor-Corrector-Verfahrens angewendet. Das hier nach aufgestellte Rechenprogramm berechnet für jedes Massenelement den zeitlichen Verlauf des Deformationsweges, der Geschwindigkeit und der Stoßkräfte.

Die Berechnungsergebnisse werden von Umfang und Art der Massenaufteilung beeinflusst, wobei einerseits im Hinblick auf die Genauigkeit der Ergebnisse eine weitgehende Annäherung an das Kontinuum anzustreben ist, andererseits der Rechenzeitaufwand in Grenzen gehalten werden muß. Ein Kompromiß zwischen beiden Forderungen wird erreicht, wenn die Anzahl der Massenelemente  $n = 10$  und die Höhe der untersten Ersatzmasse bezogen auf die Wanddicke  $\bar{h}_1 = 0,5$  betragen sowie die Massenaufteilung nach einer geometrischen Reihe erfolgt. Die maximalen Abweichungen des berechneten Deformationsweges betragen  $\Delta x/x + 10 \%$ , die der Stoßkraft  $\Delta F/F + 25 \%$ .

### 4. Berechnung der Deformationen und Spannungen mit einem Verfahren für Rotationsschalen

Für die Ermittlung des zweidimensionalen Deformations- und Spannungszustandes wurde versuchsweise ein Verfahren nach [2] angewendet, das der Berechnung dreh-symmetrisch belasteter, dünner Rotationsschalen dient.

Für die Anwendung dieses Verfahrens war es nötig, das im Programm NIVIPS in allgemeiner Form angegebene Deformationsgesetz für das experimentell ermittelte Verformungsverhalten von Blei zu konkretisieren. Als einfaches Ersatzmodell für die Nachbildung des Verhaltens von Blei bot sich die Reihenschaltung eines Feder- und eines Dämpfungselementes an. Dabei repräsentiert die Feder den elastischen und der Dämpfer den viskosen Verformungsanteil. Mit den für diese beiden Anteile in [2] geltenden Beziehungen nimmt das Deformationsgesetz die in (6.1) und (6.2) angegebene Form an:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} [g(\sigma_v) \cdot s_{ij}] + \frac{1}{2GT_0} h_v(\sigma_v) s_{ij} \quad (6.1)$$

$$\dot{\epsilon}^e = \frac{1}{3K} \dot{s} \quad (6.2)$$

Hierin gelten folgende Definitionen bzw. Zusammenhänge

$\epsilon_{ij}; s_{ij}$  Verzerrungs- bzw. Spannungsdeviator

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij}; s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} s \delta_{ij}$$

- $e$ ;  $s$       Summe der Normaldehnungen bzw. der  
Normalspannungen  
 $e = \sum \epsilon_{kk}$ ;  $s = \sum \sigma_{kk}$
- $\sigma_v$       Vergleichsspannung  
 $\sigma_v = \sqrt{\frac{2}{3} s_{kl} \cdot s_{kl}}$
- $K$ ;  $G$       Werkstoffkonstanten
- $T_0$       Bezugszeit
- $g(\sigma_v)$ ;  $h_v(\sigma_v)$  Dimensionslose Materialfunktionen

Ausgehend davon, daß bei den experimentellen Bleiuntersuchungen nur einaxiale Dehnungen gemessen worden sind, erhält man mit Hilfe weiterer Vereinfachungen aus den Gleichungen (6.1) und (6.2) das Deformationsgesetz in der vom Programm NIVIPS in [2] benötigten Form

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{1}{E} (1 + 0,0198 \sigma^2) \dot{\sigma} + 5,9578 \sigma \quad (7)$$

Die Beispielrechnung wurde an einem Modellbehälter vorgenommen, für den der experimentell ermittelte Kraft-Zeit-Verlauf beim Aufschlag mit der Bodenfläche vorlag.

Der Behälter wurde als drehsymmetrisch belastete Rotationsschale aufgefaßt, die aus einer unteren und einer oberen Platte sowie einem Hohlzylinder besteht. Entsprechend der Aufschlagstellung erfolgte die Abstützung dieser Schale auf ringförmigen Lagern, die konzentrisch über den gesamten Boden verteilt sind.

Die beim Aufschlag infolge der Stoßverzögerungen auftretenden Kräfte sind Massenkräfte, die zur Vereinfachung am Boden angreifend angesetzt wurden. Mit dieser Belastung wurden für die betrachtete Schale die Verformung der Geometrie sowie der Verlauf von Längs- und Umfangsspannungen berechnet.

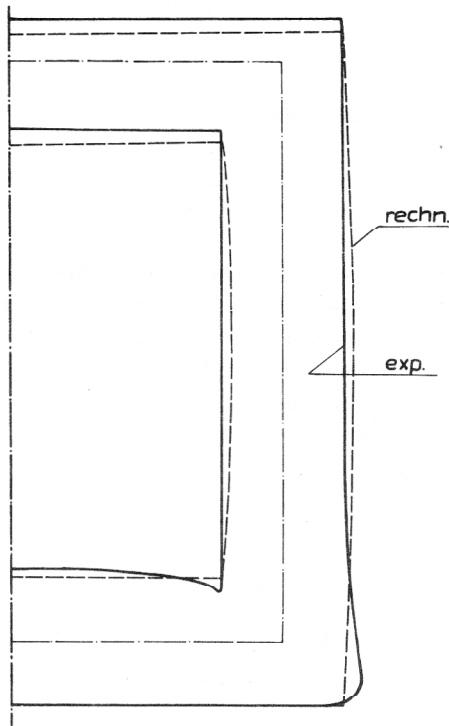


Bild 4

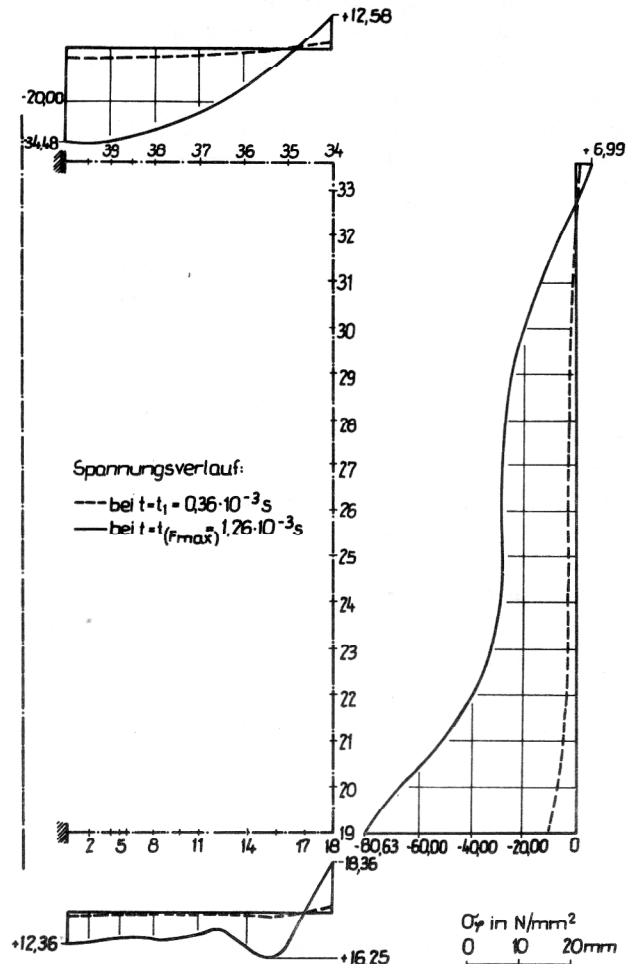


Bild 5

In Bild 4 wurde die aus der Rechnung hervorgegangene Schalenverformung der experimentell gewonnenen Schalenkontur gegenübergestellt. Es ist zu sehen, daß besonders im Zylinderteil die radialen Deformationen sowie die Veränderung der Wanddicke im Bodenbereich mit dem Berechnungsmodell nicht ausreichend genau erfasst werden.

Von den berechneten Behälterspannungen sollen hier exemplarisch der Verlauf der Längs- und Umfangsspannungen an der Behälteraußenwand vorgestellt werden.

In Bild 5 ist der Längsspannungsverlauf aufgetragen. Die maximalen Druckspannungen liegen erwartungsgemäß im unteren Bereich der Zylinderschale.

Bei den in Bild 6 dargestellten Umfangsspannungen an der Behälteraußenwand wird ebenso wie bei der berechneten Schalendeformation deutlich, daß mit dem angewendeten Verfahren die realen Verhältnisse nur unzureichend erfasst werden. Im unteren Bereich der Zylinderschale werden hier Druckspannungen ausgewiesen, obwohl dem tatsächlichen Verformungsbild nach Zugspannungen auftreten müssen.

Die Ursachen für die Abweichungen liegen darin, daß im vorliegenden Fall die Grundvoraussetzung geringer Wanddicke nicht erfüllt wird.

Wenn auch mit diesem hier versuchsweise angewendeten Schalenprogramm das Deformationsverhalten des untersuchten Behälters nur teilweise erfasst worden ist,

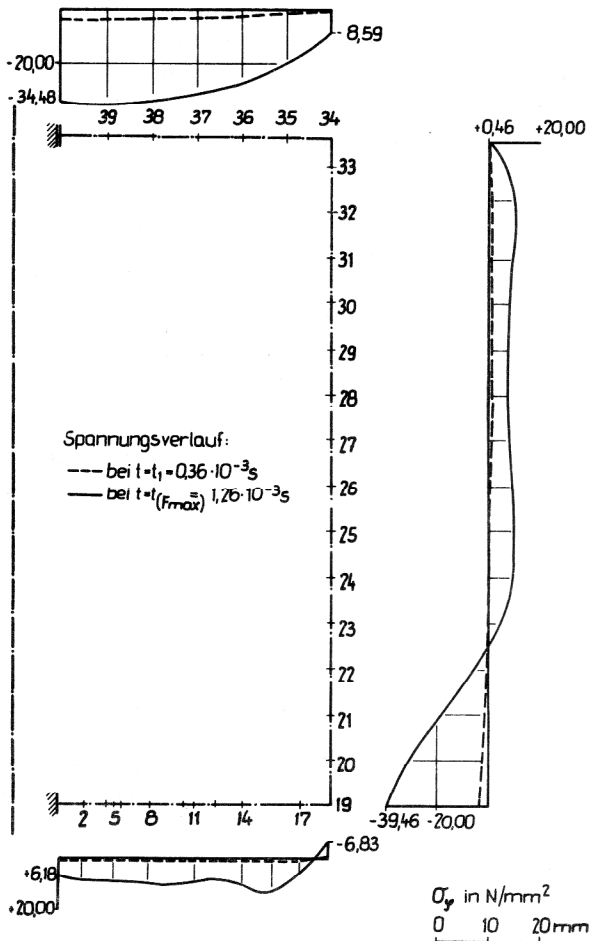


Bild 6

so konnten doch z. B. aus Art und Verteilung der berechneten Längsspannungen wichtige Hinweise für mögliche Schwachstellen an Transportbehältern gewonnen werden.

### 5. Experimentelle Stoßuntersuchungen an Modellbehältern mit Bleiabschirmung

Zur Beurteilung der Strahlenabschirmwirkung benötigt man die an der Aufschlagstelle verbleibende Restwanddicke. Da diese mit den hier behandelten Verfahren nicht berechnet werden kann, mußte auf experimentellem Wege eine Beziehung zwischen Deformationsweg und Restwanddicke aufgestellt werden.

Die experimentellen Untersuchungen hierzu wurden mit verkleinerten Modellbehältern auf einer Falltestanlage (vgl. Bild 7) vorgenommen.

Hauptbestandteile sind ein Stahlbetonfundament, auf dem der Behälter aufschlägt, und ein Hebezeug, das mit einer elektromagnetisch arbeitenden Ausklinkvorrichtung gekoppelt ist. Eine Führungseinrichtung sorgt dafür, daß die gewünschte Aufschlagstellung längs des Fallweges eingehalten wird.

An den Modellbehältern (vgl. Bild 8) wurden entsprechend den praktischen Erfordernissen die äußeren Abmessungen sowie die Dicken der Stahlmäntel und der Bleiabschirmung variiert (vgl. Tabelle 1).

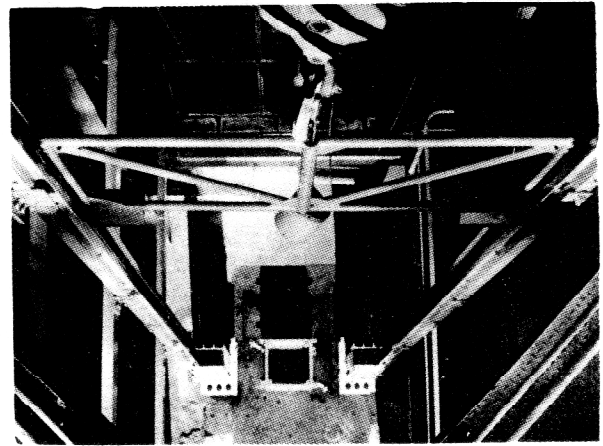


Bild 7  
Innenansicht der Falltestanlage mit Blick auf das Fundament

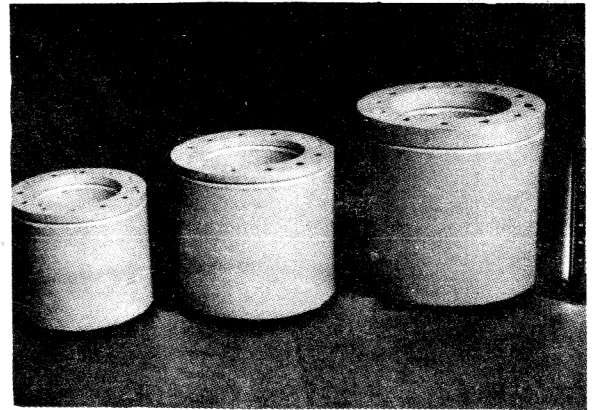


Bild 8  
Modellbehälter mit Bleiabschirmung in Stahlblechummantelung

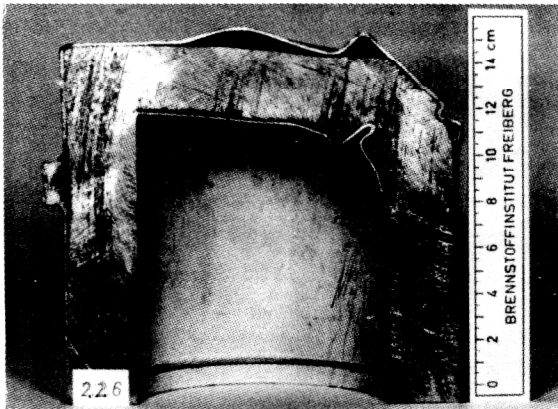
Tabelle 1  
Parametervariationen an Modellbehältern

Serie	$\beta_{sd} = \frac{\text{Gesamtwanddicke}}{\text{Behälterdurchmesser}}$	$\beta_{sa} = \frac{\text{Dicke Stahlblechmantel}}{\text{Dicke Bleimantel}}$
1.1	0,22	0,09
1.2	0,22	0,06
1.3	0,22	0,04
1.4	0,18	0,07
1.5	0,14	0,09

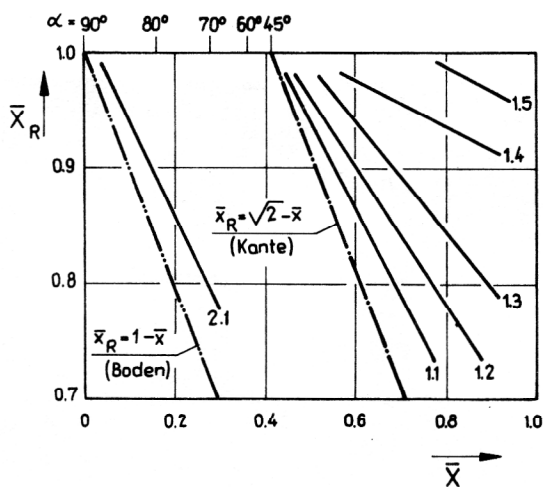
Um an den Behältern gleicher Abmessungen unterschiedlich große Deformationen zu erzielen, wurde die Fallenergie durch Zusatzmassen am Behälter schrittweise erhöht.

Bild 9 zeigt die Deformationen nach dem Kantenaufschlag an einem zersägten Behälter.

Die Ergebnisse sind in Bild 10 für die einzelnen Versuchsserien in Form der Ausgleichsgeraden grafisch dargestellt. Der Aufschlagwinkel zwischen Fundament und Behältermantel wird mit  $\alpha$  gekennzeichnet.



**Bild 9**  
Schnittbild eines deformierten Behälters nach dem Kantenaufschlag



**Bild 10**  
Restwanddicke  $\bar{x}_R$  in Abhängigkeit vom Deformationsweg  $\bar{x}$   
(Bezugsgröße für  $x_R$  und  $\bar{x}$  ist die Gesamtwanddicke)

Durch die unterbrochene Linie wird die theoretische Restwanddicke markiert, bei der der Deformationsweg von der unverformten Behälterkante subtrahiert wird. Man sieht, daß die experimentell ermittelten Restwanddicken über diesen Werten liegen. Die Ursache hierfür ist, daß bei der Deformation nicht nur der Behälterwerkstoff unmittelbar an der Aufschlagstelle seitlich verdrängt wird, sondern der gesamte Kantenbereich nach innen verschoben wird.

Für den Kantenaufschlag wird die Geradenschar in Bild 10 durch folgende mathematische Beziehung erfaßt:

$$\bar{x}_R = 2,1 (\beta_{sd} \cdot \beta_{sa})^{0,12} - 222,8 (\beta_{sd} + \beta_{sa})^{4,75} \cdot \bar{x} \quad (8)$$

Der relative Fehler der berechneten Restwanddicke  $\Delta \bar{x}_R / \bar{x}_R$  liegt für die getesteten Behälter im Bereich von - 10 % bis + 4 %.

#### LITERATUR

- [ 1 ] Anordnung über den Transport radioaktiver Stoffe (ATRS) vom 12. 04. 1978; Gesetzblatt der DDR, Sonderdruck Nr. 953.
- [ 2 ] Röhle, H., Ulbricht, V.: Berechnung von Rotationsschalen bei nichtlinearem Deformationsverhalten. Diss. TU Dresden 1975.

Anschrift des Verfassers:  
Dr.-Ing. Rudolf Diersch  
Brennstoffinstitut Freiberg  
9200 Freiberg  
Halsbrücker Straße 34