

T 2947

Schlußbericht

(Kurzfassung)

Zum Forschungsauftrag Nr. IV 1-5-813/96

des Deutschen Instituts für Bautechnik:

**Spannungs- und Stabilitätsverhalten von punktförmig gestützten
Schalentragwerken**

91,2 %

1. Allgemeines

Zu der hier anstehenden Problematik der Stabilität von axial durch Blocklasten beanspruchten Zylinderschalen sind in der letzten Zeit die Arbeiten von W. Guggenberger, J. Rathé-R. Greiner; G. Rotter-J. Teng und W. Guggenberger- R. Greiner entstanden. Rathé und Greiner berichten über in Gent durchgeführte experimentelle Untersuchungen an 4-punktgestützten stählernen Zylinderschalen unterschiedlicher Wanddicke und Stahlqualität. In parallel durchgeführten, auf der Arbeit von Guggenberger aufbauenden numerischen Untersuchungen schaffen sie die Voraussetzungen für die Erstellung eines die verschiedenen Parameterbereiche umfassenden Formelausdruckes, den sie für die Aufnahme in die ECCS Recommendations empfehlen. Rotter und Teng führen ähnliche numerische Studien durch und kommen zu etwa den gleichen Empfehlungen wie Rathé und Greiner.

Einige wesentliche Aspekte ließen es zweckmäßig erscheinen, sich erneut mit der Problematik punktgestützter Zylinderschalen auseinanderzusetzen. Zum einen ist bei den Arbeiten von Rathé und Greiner der Empfehlung der DAST-Richtlinie 017, numerische Parameterstudien erst nach experimenteller Verifikation durchzuführen, nicht gefolgt worden. Der bei den einzelnen Versuchen vorgelegene Imperfektionsgrad wurde nicht umfassend bestimmt und daher auch nicht bei der numerischen Berechnung zugrunde gelegt. Zum anderen ist bei den Versuchen eine 4-Punktlagerung gewählt worden, bei der nicht ohne weiteres auf die Belastbarkeit

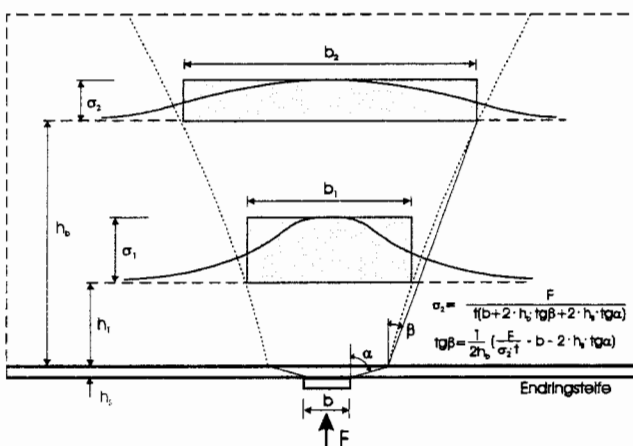
eines Lagerungspunktes geschlossen werden darf. Es ist durchaus möglich, daß infolge vorliegender Imperfektionen, ein Auflagerungspunkt nicht voll an der Lastableitung beteiligt ist und daß daher die Quotientenbildung unzulässig ist. Es ist zudem fraglich, ob die gegenseitige Beeinflussung von starrer Randlagerung und Punktstützung vernachlässigt werden darf. Als ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Berücksichtigung der in der Praxis zumeist vorhandenen Endringsteife zu nennen. Eine derartige Steife bewirkt stets eine mehr oder weniger starke Lastverteilung und beeinflusst daher ganz wesentlich die Höhe der Beullast und den Ort der einfallenden Beule.

Aus den aufgezeigten Gründen sind im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrags in Karlsruhe Beulversuche mit einer geänderten Versuchstechnik durchgeführt worden. Die jetzt 3-punktgelagerten Versuchszylinder wiesen dabei stets Endringsteifen und eine flexible Randlagerung auf.

Ein weiterer Grund für die neuen Versuche war die angestrebte Verifikation des von P. Knödel-Th. Ummenhofer vorgeschlagenen Lastausbreitungswinkel-Verfahrens. Es galt dabei, Aussagen über den Ort der jeweils einfallenden Beule und den sich einstellenden von der Endringsteifigkeit und der Lasteinleitungsbreite abhängigen fiktiven Lastausbreitungswinkel zu machen.

2. Konzept des Lastausbreitungswinkel-Verfahrens

Ausgehend von der Erkenntnis, daß bei Punktstützungen das Instabilwerden der Schale stets durch das Einfallen von Einzelbeulen eingeleitet wird, haben P. Knödel und Th. Ummenhofer das Konzept des Lastausbreitungswinkel-Verfahrens vorgeschlagen. Nach diesem Konzept fällt die Beule dann ein, wenn im maßgebenden Abstand von der Randlast die kritische Beulspannung überschritten wird.



Um den Ort der einfallenden Beule und damit den Ort für den zu führenden Stabilitätsnachweis bestimmen zu können, wird zunächst ein fiktiver Lastausbreitungswinkel definiert. Er stellt die Neigung der Verbindungslinie an die rechteckigen Spannungsblöcke dar, die sich nach einem Flächenausgleich der realen Spannungsverteilungen in den ver-

schiedenen Schalenhorizonten ergeben (Bild 1). Der Winkel wird nicht konstant sein, sondern von der Lasteinleitungsbreite, der Eckringsteifigkeit und der Entfernung von der Lasteinleitungsstelle abhängig sein. Neben dem fiktiven Lastausbreitungswinkel benötigt man nach diesem Konzept noch eine Aussage über den Horizont, in dem die einfallende Einzelbeule auftritt.

3. Experimentelle Untersuchungen

Für die Beulversuche wurden stählerne Zylinderschalen mit dem Nenndurchmesser $D_n = 825$ mm, der Nennhöhe $L_n = 600$ mm und den Nennblechdicken $t_n = 0,6$ und $1,0$ mm verwendet. Sie waren jeweils aus Stahlblech der Güte St 37 (Nennstreckgrenze $R_{eH} = 350$ N/mm²) mittels Laserstrahlschweißung erstellt worden. Das Schweißverfahren, bei dem kein Zusatzwerkstoff eingesetzt wird, wurde gewählt, um die Schweißeigenstressungen und die Gefügeveränderungen auf ein Minimum zu beschränken.

Als Endringsteifen wurden ein leichtes L-Profil (20 x 20 x 2 mm) und ein steiferes -Profil (20 x 20 mm) gewählt. Die Dimensionierung dieser Steifen erfolgte in Anlehnung an ausgeführte Silokonstruktionen. Hierzu ist der dimensionslose Steifigkeitsparameter $\Delta = J / (R^3 \cdot t)$ gewählt worden. Er lag bei den vorliegenden Versuchskörpern mit $\Delta = 0,88 \cdot 10^{-4} - 4,0 \cdot 10^{-4}$ in der gleichen Größenordnung wie bei ausgeführten Silokonstruktionen ($\Delta = 1,3 \cdot 10^{-4} - 18 \cdot 10^{-4}$) – die Praxisrelevanz bezüglich der Endringsteifen war demnach gegeben. Für die Verbindung der Steife mit dem Zylinder ist zur Vermeidung von Schweißeigenstressungen und Schweißverzügen die Klebtechnik gewählt worden.

Nach Fertigstellung der Versuchszylinder sind diese in einer Koordinatenmeßmaschine an diskreten Punkten vermessen worden. Es zeigte sich, daß die Versuchszylinder einen praxisrelevanten Imperfektionsgrad aufwiesen und daß die maximalen Formabweichungen mit $w_v/t = 1,5 - 2,0$ in etwa in dem in DIN 18 800 Teil 4 fixierten Rahmen lagen. Die Versuchsergebnisse müssen demnach nicht unter dem Vorbehalt einer zu perfekten Schalengeometrie betrachtet werden.

Um die Einzellasten definiert in den Zylinder eintragen zu können, wurde eine Dreipunktstützung realisiert. Bei einem Lasteintrag durch drei über dem Zylinderumfang äquidistant angeordnete Blocklasten mit unterschiedlichen Lasteinleitungsbreiten ist infolge der statischen Bestimmtheit des Systems gewährleistet, daß die eingetragene Kraft in jedem Drittelspunkt vom selben Betrag ist.

Bei den Versuchen wurde die Belastung jeweils schrittweise bis zum stets schlagartigen Einfallen der ersten Beule gesteigert.

Da sich stets lokal begrenzte Beulen ergaben und die Versuchsschale sonst stets unbeschädigt blieb, ist der Versuchskörper jeweils um 60° gedreht worden, um einen weiteren Versuch durchführen zu können. Diese Vorgehensweise schien gerechtfertigt zu sein, da kein signifikanter Unterschied zum Erstversuch festzustellen war. Die gleiche Vorgehensweise ist auch im Hinblick auf den zweiten Schalenrand gewählt worden. Für die einzelnen Versuche wurden die jeweils ermittelten Kernblechdicken, Stahlstreckgrenzen, Beulasten, Beulenlängen und Beulenhorizonte festgehalten.

4. Bewertung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf das Lastausbreitungswinkel-Verfahren

Ein wesentlicher Grund für die Durchführung der Beulversuche war die Verifikation des Lastausbreitungswinkel-Verfahrens. Hierbei galt es Aussagen über den fiktiven Lastausbreitungswinkel, den Horizont der einfallenden Beule und die bezogene Beulspannung jeweils in Abhängigkeit von der Schalenschlankheit, der Lasteinleitungsbreite und der Endringsteifigkeit zu machen. Bei Kenntnis dieser Größen wäre dann der Stabilitätsnachweis in Anlehnung an DIN 18 800 Teil 4 möglich.

4.1 Lastausbreitungswinkel

Betrachtet man bei Vorhandensein einer Endringsteife die numerisch ermittelten Spannungsverteilungen in der Schale bzw. in der Steife, so zeigt sich, daß in der Steife eine ausgeprägtere Lastverteilung auftritt, als in der Schale. Es ist demnach nicht gerechtfertigt, einen einheitlichen Lastausbreitungswinkel für Steife und Schale zu definieren. Die Auswertung der sich numerisch ergebenden Spannungsverteilungen zeigt, daß bei den hier untersuchten praxisrelevanten Steifen ein Lastausbreitungswinkel in den Steifen von $\alpha = 40 - 80^\circ$ vorliegt. Legt man den sich jeweils ergebenden Lastausbreitungswinkel α und damit eine vergrößerte Lasteinleitungsbreite zugrunde, so ergibt sich auf Grund der numerischen Ergebnisse, daß der Lastausbreitungswinkel β nicht konstant ist, sondern eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Schalenhorizont aufweist – dies insbesondere für die hier interessierenden Schalenhorizonte $h_b = 50 - 120$ mm und die praxisrelevante starre Lagerung.

Zieht man die im Beulhorizont jeweils minimal sich ergebenden Lastausbreitungswinkel heran und trägt sie über der Lasteinleitungsbreite auf, so ergeben sich die beim vorliegenden Bemessungskonzept benötigten Lastausbreitungswinkel zu

$$\beta = 32 - 37^\circ \text{ (schlaffe Lagerung)}$$

$$\beta = 9 + 0,12 \cdot b \text{ (starre Lagerung)}$$

4.2 Horizont der einfallenden Beulen

Trägt man die bei den Versuchen gefundenen Abstände des Scheitels der jeweils eingefallenen lokalen Beule von der Endringsteife (h_b) auf, so zeigt sich, daß eine Abhängigkeit vom R/t -Verhältnis existiert und daß bei größeren Endringsteifigkeiten die Streuung der gefundenen Beulenabstände zunimmt.

Die gefundenen Streuungen resultieren aus den im Lasteinleitungsbereich vorliegenden Mantelimperfectionen. Die Beule wird immer dort einfallen, wo die ungünstigste Kombination aus Schalenbeanspruchung und Mantelimperfection vorliegt. Da diese natürlich bei größeren Endringsteifigkeiten wegen der dort vorliegenden nicht mehr so ausgeprägten Spannungskonzentrationen über einen größeren Bereich gegeben sein kann, streuen die Beulenabstände dort zwangsläufig stärker.

Da über die Lage und Größe der Mantelimperfectionen nichts gesagt werden kann, bleibt nur die Differenzierung im Hinblick auf das R/t -Verhältnis. Vergleicht man die experimentell gefundenen Beulenabstände, so kommt man zu dem Ergebnis, daß der übliche Ansatz für die Halbwellenlänge $h_b = 3,46 \sqrt{R \cdot t}$ nicht die Realität wiedergibt. Es muß ein multiplikativer Korrekturfaktor $k = h_{b,ex}/h_{b,th}$ eingeführt werden. Für die hier vorliegenden Endringsteifigkeiten ergibt die Auswertung, daß im Mittel der Faktor $k = 0,0035 \cdot R/t - 0,53$ verwendbar ist. Als Horizont für die einfallenden Beulen ergibt sich dann $h_{b,e} = k \cdot 3,46 \cdot \sqrt{R \cdot t}$

Dieser Ausdruck gilt natürlich nur für den hier untersuchten Schlankheitsbereich ($R/t = 450 - 750$). Bei Schalen mit $R/t < 250$ werden bei Vorliegen der üblichen Stahlqualitäten plastische bzw. teilplastische Versagensformen auftreten. Für diese Fälle sollte man die Biegestörhalbwelle zugrunde legen. Es ergibt sich dann bei Verwendung des gleichen Korrekturfaktors der Ausdruck $h_{b,p} = k \cdot 2,4 \cdot \sqrt{R \cdot t}$

Der plastisch-elastische Übergangsbereich könnte dabei zwischen $R/t = 200$ und 300 mit einer linearen Interpolation zwischen $h_{b,e}$ und $h_{b,p}$ definiert werden.

Bei Schalen mit $R/t > 800$ empfiehlt es sich, bis zum Vorliegen weiterer Versuchsergebnisse, auf eine Extrapolation des Korrekturfaktors über dem Wert $k = 2,3$ hinaus zu verzichten.

4.3 Stabilitätsnachweis

Die experimentell bestimmten Beullasten zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit vom R/t -Verhältnis, der Endringsteifigkeit und der Lasteinleitungsbreite. Will man das Nachweiskonzept der DIN 18 800 Teil 4 beibehalten, so bietet es sich an, die reale DIN-Beulspannung ($\sigma_{xs, r, k}$) mit einem Korrekturfaktor zu belegen. Trotz gewisser Einflüsse aus Schalenschlankheit und

Endringsteifigkeit scheint es doch gerechtfertigt zu sein, alle Versuchsergebnisse zu einer Population zusammenzufassen und statistisch auszuwerten. Bei Zugrundelegung des 5 %-Fraktilwerts ergibt sich für den Stabilitätsnachweis als Beulspannung der Wert $\sigma_{xs,r,k}^p = 1,83 \sigma_{xs,r,k}$

Aus den bei den Beulversuchen mitgeschriebenen Last-Stauchungsdiagrammen wird deutlich, daß bei den vorliegenden punktgestützten Zylinderschalen nach dem Einfallen der Beulen nicht der beim gleichmäßig axial gedrückten Zylinder übliche starke Lastabfall auftritt. Die gutartige Versagenscharakteristik wird auch aus den Versuchen deutlich, bei denen nach dem Beulversuch eine Wiederbelastung vorgenommen wurde.

Es ist offensichtlich so, daß die bisher nicht geschädigten Schalenbereiche noch eine erhebliche Tragkapazität aufweisen. Die statistische Auswertung dieser Versuche zeigt, daß selbst bei relativ großen affinen Vorbeulen ($w_v/t = 3 - 10$) noch bezogene Beulspannungen von

$$\sigma_{\max}/\sigma_{xs, r, k} = 2,01 \text{ (Mittelwert)}$$

$$\sigma_{\max}/\sigma_{xs, r, k} = 1,28 \text{ (5 %-Fraktilwert)}$$

vorliegen.

Da also ein ähnliches Tragverhalten wie bei der radial beanspruchten Zylinderschale vorliegt, könnte man möglicherweise auch $\sigma_{\phi s, r, k}$ mit dem Abminderungsfaktor α_1 (nach DIN 18 800 Teil 4) für den Stabilitätsnachweis zugrunde legen.