

Der Schalenstab ist die optimale Tragstruktur zur Weiterleitung einer Druckkraft. Diese „Optimierungsaufgabe“ wurde übrigens bereits von der Natur gelöst – Getreidehalme sind bekanntlich weder massiv noch rechteckig-hohl, sondern rohrförmig. Diese Form, kombiniert mit dem festen Baustoff Stahl, liefert sehr leistungsfähige Tragstrukturen. Die Festigkeit des Stahls bewirkt jedoch gleichzeitig, dass die Konstruktionen schlank und dünnwandig werden und deshalb stabilitätsanfällig sind.

Schalenbeulen im Stahlbau

Ein spannendes Bemessungsproblem

Von Herbert Schmidt

Schalen sind optimal stabile Tragstrukturen

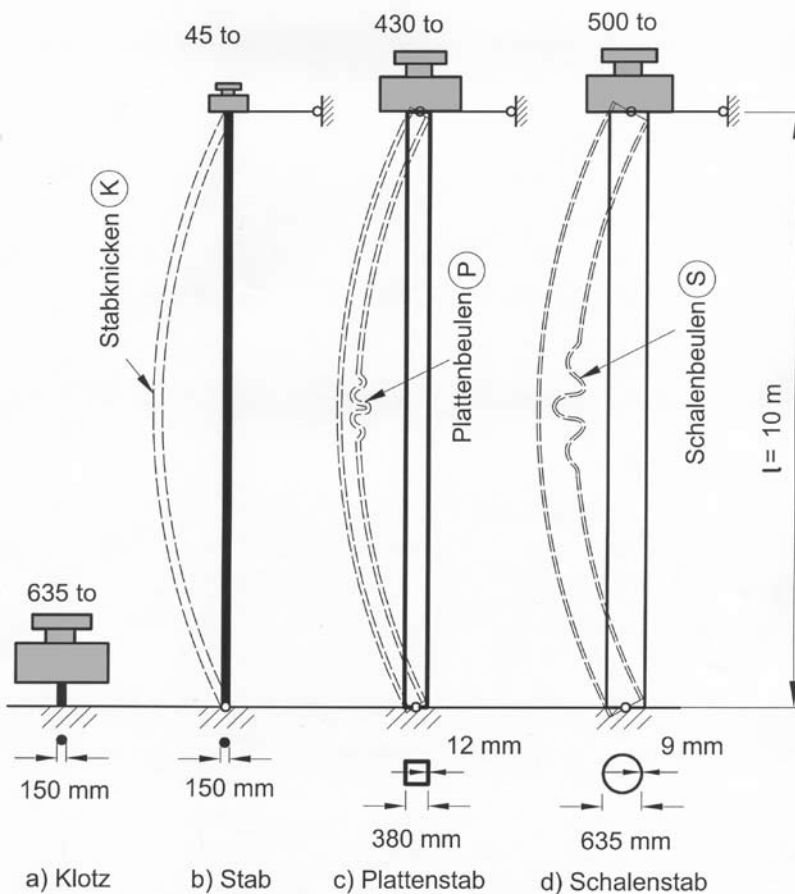
Stahlbau ist eine Bauweise, die durch leichte, das heißt schlanke und dünne Tragkonstruktionen geprägt ist. Das ist eine Folge der hohen Festigkeit des Baustoffes Stahl. Die Leichtigkeit hat allerdings ihren „statischen Preis“. Er besteht darin, dass immer dann, wenn unter den einwirkenden Lasten in Teilen der Tragkonstruktion Druckkräfte entstehen, so genannte *Stabilitätsprobleme* beim Tragwerksentwurf im Vordergrund stehen. Abbildung 1 veranschaulicht das anhand eines simplen Beispiels: Um eine Last von 635 Tonnen auf Druck zu tragen, benötigt man einen massiven runden Stahlklotz mit nur 150 Millimetern Durchmesser (Abb. 1a). Verlängert man diesen Stahlklotz aber auf zehn Meter Länge, so *knickt* der dadurch entstandene *Druckstab* bereits unter einer Last von 45 Tonnen seitlich aus

und „verweigert“ sich einer weiteren Lastaufnahme (Abb. 1b). Hätte man die Last nicht oben auf den Stab gestellt, sondern unten angehängt, so wäre ein Zugstab entstanden. Der hätte klaglos die 635 Tonnen des Klotzes getragen. Der Druckstab aber wird unter der genannten Druckkraft von 45 Tonnen instabil. Dieses Stabknicken gehört zur strukturellen Kategorie der *Stabilitätsprobleme*.

Die Tragfähigkeit des Druckstabes lässt sich nun bei gleichem Materialaufwand, also bei gleicher Menge verbrauchten Stahls, erheblich steigern, wenn er nicht als massiver Vollstab (wie in Abb. 1b) ausgebildet wird, sondern als Hohlprofil. Mit *ebenwandigem*, also rechteckigem Hohlquerschnitt lässt er sich maximal auf 430 Tonnen Tragfähigkeit bringen (Abb. 1c), mit *rundem*, also rohrförmigem Hohlquerschnitt sogar auf 500 Tonnen (Abb. 1d). Die ebenen Stabwände nennen wir in der

Strukturmechanik *Platten*, die runde Stabwand nennen wir eine *Schale*. Im ersten Fall überlagert sich dem Stabknicken nunmehr als weiteres Stabilitätsproblem das *Plattenbeulen* und begrenzt damit die Drucktragfähigkeit des rechteckig-hohlen *Plattenstabes* (siehe Abb. 1c). Im zweiten Fall ist es das Stabilitätsproblem *Schalenbeulen*, das zum Stabknicken hinzu kommt und die Drucktragfähigkeit des rund-hohlen *Schalenstabes* begrenzt (siehe Abb. 1d).

Wir können das Beispiel in Abbildung 1 auch andersherum deuten: Zur Weiterleitung einer Druckkraft von 500 Tonnen über zehn Meter freie Länge würde man mit einem Plattenstab im Vergleich zum Schalenstab ungefähr das $(500/430 \approx) 1,15$ fache an Stahl benötigen, mit einem Vollstab sogar das $(500/45 \approx)$ Elffache. Der Schalenstab stellt demnach die optimal stabile Tragstruktur zur Weiterleitung einer Druckkraft dar. Diese „Opti-



(1) Drucktragfähigkeit von Stahlbauteilen gleicher Querschnittsfläche (Baustahl S355).

mierungsaufgabe“ wurde übrigens bereits von der Natur gelöst – Getreidehalme sind bekanntlich weder massiv noch rechteckig-hohl, sondern rohrförmig.

Die Überlegenheit von Schalenstrukturen bei der Weiterleitung von Druckkräften soll anhand eines weiteren Einführungsbeispiels vertieft erläutert werden (Abb. 2). Ein zehn Millimeter dicker, 750 Millimeter hoher und 3.000 Millimeter breiter Blechstreifen aus Baustahl S235 trägt, wenn er am oberen und am unteren Rand gegen seitliches Ausweichen gehalten wird, eine Last von 80 Tonnen bis zum seitlichen Ausknicken. Das Ausknicken entspricht dem *Stabknicken* des Vollstabes in Abbildung 1b – der Blechstreifen verhält sich quasi wie ein streifenförmiger *Stab* (Abb. 2a). Formt man aus dem Blechstreifen eine rechteckige *Plattenstruktur*, so trägt diese eine Last von 450 Tonnen bis zum Versagen durch *Plattenbeulen* (Abb. 2b),

und als kreisrunde *Schalenstruktur* trägt der Blechstreifen schließlich eine Last von 690 Tonnen bis zum Versagen durch *Schalenbeulen* (Abb. 2c). Auch bei diesem Beispiel erweist sich also die Schale als optimal stabile Tragstruktur zur Weiterleitung von Druckkräften. Was man sich unter „Versagen durch Schalenbeulen“ vorzustellen hat, möge der Leser durch einen Vorausblick auf Abbildung 8 ermessen. Die dort gezeigte gebeulte „Standzarge“ eines Silos entspricht genau unserem elementaren Schalenbeispiel in Abbildung 2c. Wir nennen diese kreisrunde Schalenform eine „Kreiszyklinderschale“ und das entsprechende Schalenbeulproblem „Beulen unter Axialdruckbeanspruchung“. Um nun auf die stabilitätsmechanische Überlegenheit von Schalenstrukturen zurückzukommen, so ist sie, verglichen mit den anderen beiden Stabilitätsproblemen Stabknicken und Plattenbeulen, leider mit einer

erheblich größeren Komplexität des Stabilitätsproblems Schalenbeulen verbunden, wie nachfolgend dargestellt.

Das Schalenbeulen ist ein komplexes Stabilitätsproblem

Die klassische Stabilitätstheorie

Bisher haben wir baupraktisch reale Stahlbauteile betrachtet; soll heißen: Bauteile, die mit fertigungstechnisch unvermeidbaren *Imperfektionen* behaftet sind und die aus realem Baustahl hergestellt wurden. Imperfektionen sind zum Beispiel geringfügige Abweichungen von der nominell geraden Stabachse beim Stab, von der nominell ebenen Mittelfläche bei der Platte und von der nominell kreiszyklinderschen Mittelfläche bei der Schale. Realer Baustahl kann auf Druck höchstens bis zur *Fließgrenze* belastet werden, die für S235 bei $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$ und für S355 bei $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$ liegt.

Alle drei Strukturtypen können nun für theoretische Zwecke idealisiert werden: Der Stab sei *perfekt* gerade, die Platte sei *perfekt* eben, die Schale sei *perfekt* kreiszyklindersch, der Werkstoff habe keine Fließgrenze, sondern sei unbegrenzt *elastisch*.

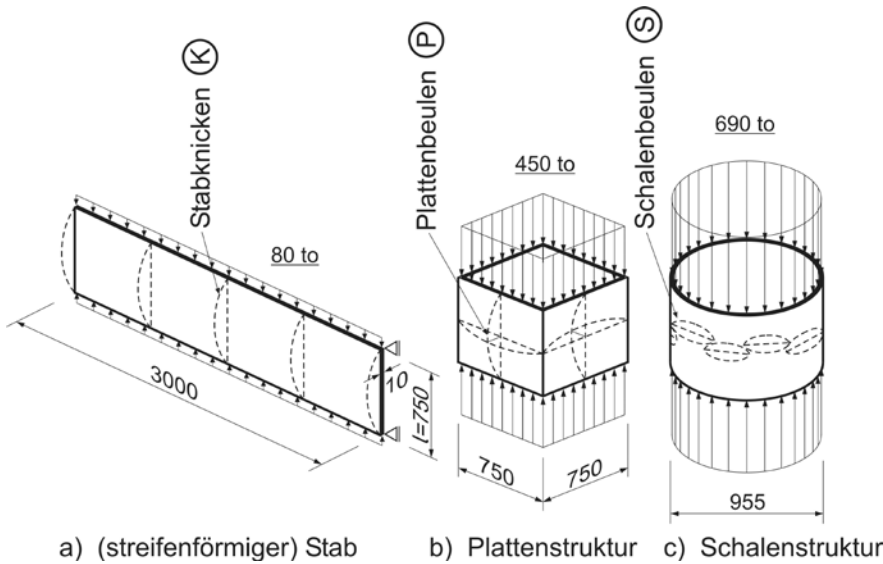
Die zugehörige Theorie nennt man die „klassische Stabilitätstheorie“. Sie wurde für den knickenden Stab bereits 1744 von Euler gelöst, für die beulende Rechteckplatte zuerst 1888 von Bryan, für die beulende Kreiszyklinderschale unabhängig voneinander 1908 von Lorenz, 1910 von Timoshenko, 1913 von Southwell. Die Ergebnisse sind die klassischen *idealen Knick- bzw. Beulspannungen* σ_{cr} (der Index „cr“ steht für critical):

$$\sigma_{K,cr} = \pi^2 E I^2 / l^2 \text{ für den gedrückten Stab,} \quad (1)$$

$$\sigma_{P,cr} = 0.366 \cdot \pi^2 E t^2 / b^2 \text{ für die gedrückte Rechteckplatte,} \quad (2)$$

$$\sigma_{S,cr} = 0.605 \cdot E t / r \text{ für die gedrückte Kreiszyklinderschale.} \quad (3)$$

Wendet man diese Gleichungen auf die drei Tragstrukturen in Abbil-



(2) Tragstrukturen aus dünnem Stahlblech im Vergleich (Baustahl S235).

dung 2 an, so erhält man 31, 135 und 2661 N/mm². Die idealisierte Plattenstruktur würde demnach theoretisch gut viermal so viel tragen wie der idealisierte Stab (das erscheint plausibel), die idealisierte Schalenstruktur dagegen 86-mal so viel (das erscheint bei aller Wertschätzung der Schalen nicht plausibel). Tatsächlich werden die Verhältnisse in der baupraktischen Realität wieder zurechtgerückt, wie die in Abbildung 2 eingetragenen tatsächlichen Traglasten zeigen.

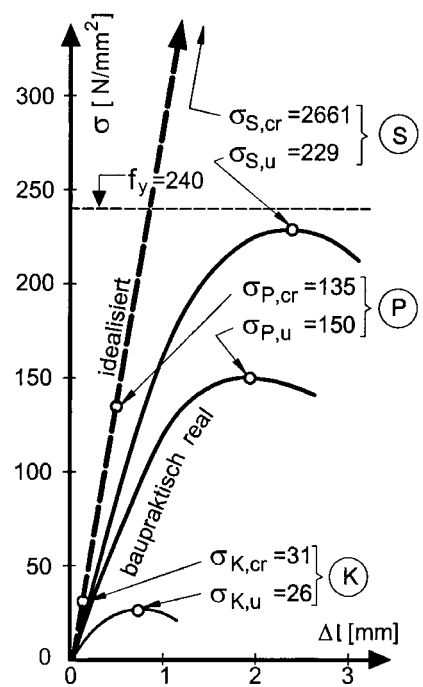
Abbildung 3 verdeutlicht diesen Sachverhalt noch einmal anhand der *Spannungs-Stauchungs-Kurven* der drei Bauteile von Abbildung 2. Man versteht darunter die Auftragung der einwirkenden Lastspannung σ über der dadurch verursachten Verkürzung Δl . Während beim Stab und bei der Platte die *realen Versagensspannungen* σ_u (der Index „u“ steht für ultimate) von der Größenordnung her in der Nähe der idealen Knick- bzw. Beulspannungen liegen, überschätzt die ideale Schalenbeulspannung $\sigma_{s,cr}$ nach Gleichung (3) die reale Schalentragfähigkeit erheblich¹. Zwischen der klassischen Stabilitätstheorie für Schalen und dem realen Tragverhalten von Schalen besteht offenbar eine erhebliche Diskrepanz.

Die Diskrepanz zwischen klassischer Theorie und Realität

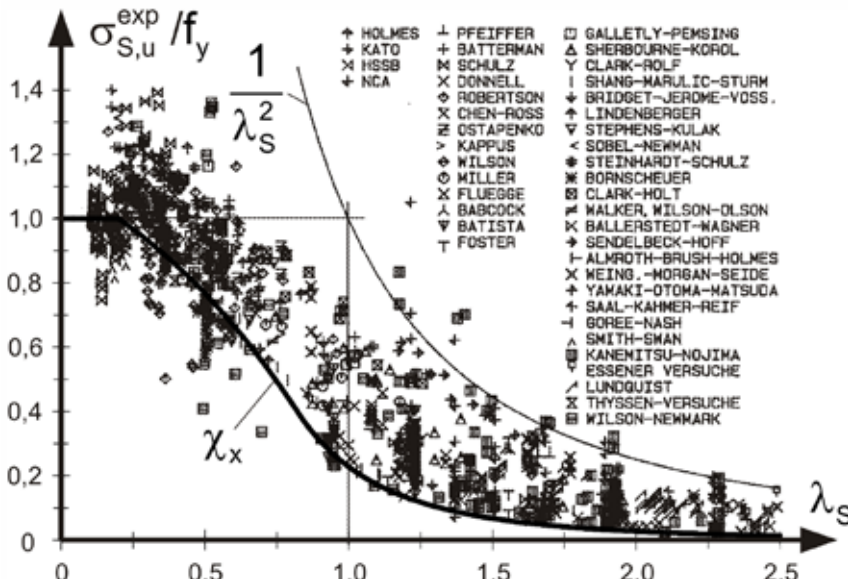
Die Diskrepanz gilt mehr oder weniger ausgeprägt auch für andere, hier nicht angesprochene Schalenbeulfälle. Sie wurde spätestens Ende der zwanziger Jahre des vorigen Jahrhunderts offenkundig, als Robertson in England begann, systematische experimentelle Untersuchungen für den Vergleich mit der Theorie durchzuführen. Bis dahin hatte man kreiszylindrische Konstruktionen, beispielsweise Rohrstäbe wie in Abbildung 1d (damals noch aus Blechen zusammengesetzt), rein empirisch auf Grund von Versuchen bemessen. Bekannte historische Beispiele sind die Britan- nia- und Conway-Brücken in England (1849) und die Firth-of-Forth-Brücke in Schottland (1890). Im 20. Jahrhundert wurden dann weltweit fast unübersehbar viele wissenschaftliche Schalenbeulversuchsreihen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Auswertung im Rahmen einer Essener Diplomarbeit von 1988². Aufgetragen sind dort experimentelle Versagensspannungen $\sigma_{s,u}$ von etwa 1.200 Schalenbeulversuchen an axialgedrückten Kreiszyklindern (ähnlich Abb. 2c), jeweils bezogen auf die entsprechende Fließgrenze f_y , über der *bezogenen Schalenschlankheit*

$$\lambda_s = (f_y / \sigma_{s,cr})^{0,5} \tag{4}$$

In Abbildung 4 werden also auf der Abszisse nach rechts die untersuchten Schalen immer dünner und ihre Tragfähigkeit demzufolge immer geringer. Die eingezeichnete $(1/\lambda_s^2)$ -Kurve repräsentiert die theoretischen Ergebnisse aus Gleichung (3) für geometrisch perfekte und unbegrenzt elastische Schalen, die horizontale Gerade bei 1.00 repräsentiert die Fließgrenze. Man erkennt zum einen eine ungewöhnlich große Streuung der experimentellen Versagensspannungen. Zum anderen werden die immensen, durch die Imperfektionen verursachten Tragfähigkeitsverluste gegenüber der klassischen Stabilitätstheorie der perfekt idealisierten Schale deutlich. Sie betragen bei sehr dünnen Schalen (zum Beispiel $\lambda_s = 2.0$) bis zu 90 Prozent (!). Mit der eingezeichneten χ_x -Kurve haben die „Normmacher“ versucht, den experimentellen Befund näherungsweise als *untere fünf-Prozent-Fraktilkurve* einzufangen – etwa fünf Prozent der Versuchsergebnisse



(3) Spannungs-Stauchungs-Kurven der drei Tragstrukturen in Abbildung 2 (die baupraktischen Kurven sind qualitativ zu verstehen).



(4) Ergebnisse weltweit veröffentlichter Beulversuche an axialgedrückten Kreiszyinderschalen.

dürfen unter dieser Kurve liegen. Die χ_x -Kurve ist Bestandteil der in Arbeit befindlichen, europäisch harmonisierten Bemessungsnorm EN 1993-1-6 für beulgefährdete stählerne Schalenbauten und steht in ähnlicher Form bereits in der zurzeit in Deutschland gültigen Baubestimmung DIN 18800-4. Man nennt das ein halbempirisches Bemessungsverfahren, wobei χ_x der *Beulabminderungsfaktor* ist. Er fängt den negativen Einfluss der unvermeidbaren Imperfektionen ein. Mit ihm berechnet der Tragwerksplaner die in die Bemessung einzuführende (quasi genormte) *reale Beulspannung* $\sigma_{S,R}$ (der Index „R“ steht für Resistance) zu

$$\sigma_{S,R} = \chi_x \cdot f_y \tag{5}$$

Heute weiß man, dass die Ursache für die Diskrepanz zwischen klassischer Theorie und Realität im grundsätzlich unterschiedlichen *postkritischen* Tragverhalten idealisierter Schalen, verglichen mit idealisierten Stäben und Platten, liegt (Abb. 5). Während idealisierte Stäbe sich jenseits des kritischen Zustandes, der die ideale Knickspannung nach Gleichung (1) liefert, also nach dem Knicken, theoretisch *indifferent* verhal-

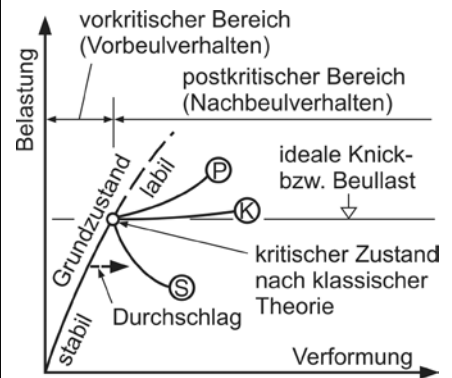
ten und idealisierte Platten sich nach dem Beulen sogar *gutartig* verhalten – ihre theoretische Lastverformungskurve steigt bei wachsenden Beulverformungen wieder an –, ist das postkritische Verhalten der Schalen (auch *Nachbeulverhalten* genannt) theoretisch *bösartig*. Die von einer ursprünglich perfekten Schale jenseits des kritischen Zustandes, der die ideale Beulspannung nach Gleichung (3) liefert, also nach dem Beulen, bei jetzt zunehmenden Beulverformungen (beispielsweise bei zunehmender Beultiefe) theoretisch noch ertragbare Last liegt zum Teil drastisch unter der idealen Beullast. Reale Schalen, das heißt von vornherein imperfekte Schalen, schlagen deshalb bereits bei einer weit unter der idealen Beullast liegenden *realen Beullast* in diesen *Nachbeulzustand* durch (siehe Abb. 5).

Die Höhe der realen Beullast (bzw. der realen Versagensspannung $\sigma_{S,u}$) ist abhängig von Art und Größe der Imperfektionen. Zu den Imperfektionen gehören Formabweichungen, Dickenabweichungen, Last- und Auflagerexzentrizitäten (so genannte „geometrische“ Imperfektionen) ebenso wie Walz-, Umform-, Richt- und Schweißspannungen sowie werkstoffliche

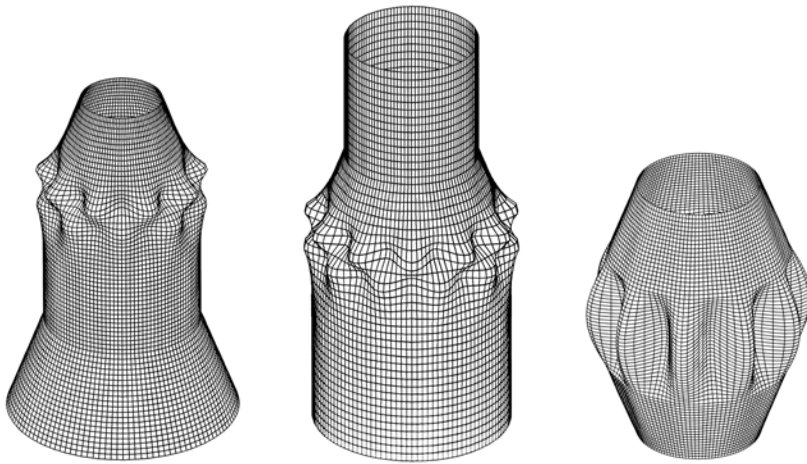
Unregelmäßigkeiten (so genannte „strukturelle“ Imperfektionen). Es leuchtet unmittelbar ein, dass je nach Herstellprozess und Herstellpräzision diese Imperfektionen sehr unterschiedlich ausfallen – deshalb auch die große Streuung der Versuchsergebnisse in Abbildung 4. Ganz vermeidbar sind Imperfektionen aber eben nicht, und Schalen reagieren nun einmal – im Gegensatz zu Stäben und Platten – schon auf sehr kleine Abweichungen von der Sollform empfindlich mit einem Tragfähigkeitsverlust.

Das Dilemma der unbekanntten Imperfektionen

Theoretisch ist das komplexe Stabilitätsverhalten imperfekter Schalen nur mit so genannten *nichtlinearen Schalentheorien* beherrschbar. Das wurde zwar schon in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts erkannt, jedoch erst ab den fünfziger Jahren für stark vereinfachte Imperfektionsannahmen mit vereinzelt konkreten Ergebnissen realisiert. Seit den siebziger Jahren wurden dann, begünstigt durch die rasante Entwicklung der Computer und der darauf abgestützten Berechnungsmethode der *Finiten Elemente* (FEM), die nichtlinearen Schalentheorien zu einem so hohen Stand entwickelt, dass heute jede beliebige Schalenstruktur unter jeder beliebigen Lastkombination „exakt“ berechnet



(5) Unterschiedliches postkritisches Tragverhalten idealisierter gedrückter Stäbe (K), Platten (P) und Schalen (S).



(6) Mit einer nichtlinearen Schalentheorie berechnete kritische Beulformen von zusammengesetzten Zylinder-Kegel-Schalen.

werden kann. Das gilt zunächst für die kritische Beullast und Beulform der perfekt idealisierten Struktur (Abb. 6)³.

Das gilt aber vor allem auch für die tatsächliche Traglast der imperfekten Struktur – dies allerdings mit der Einschränkung, dass die Imperfektionen bekannt sein müssen, damit man sie in das Berechnungsmodell einbauen kann. Und das ist das große Dilemma einer ausschließlich computergestützten Bemessung stabilitätsgefährdeter Schalen. Auf den Punkt gebracht, wäre es heute mit Computerhilfe einfach, folgendermaßen vorzugehen: Man baut ein Schalenbauwerk (zum Beispiel ein Silo), lässt es ganz genau vermessen, gibt die genaue (imperfekte) Geometrie in den Rechner ein, führt die nichtlineare Stabilitätsberechnung durch und teilt dann dem Bauherrn mit, was sein Bauwerk aushält (beispielsweise was er in seinem Silo lagern darf). Es ist unschwer einzusehen, dass es so nicht geht. Diesem Dilemma ist nur mit einer Doppelstrategie beizukommen: Es sind *Herstelltoleranzen* zu definieren, die von der Stahlbauwerkstatt bei der Fertigung und Montage eingehalten werden müssen. Und es sind *Berechnungsverfahren* zu entwickeln, wie der Tragwerksplaner vorab die innerhalb dieser Herstell-

toleranzen ungünstigst denkbare Imperfektionsform aufspüren kann, damit er sie der Bemessung zugrunde legen kann. Auf dem Feld der computergestützten Beulbemessung stählerner Schalenbauten wird derzeit an vielen Stellen in vielen Ländern intensiv geforscht^{4,5,6,7}.

Die Essener Schalenbeulforschung

Eines muss zunächst klargestellt werden: Natürlich konnten wir auch bisher schon stählerne Schalenbauten errichten, die stand sicher sind. Grundlage dafür waren und sind überwiegend die oben angesprochenen halbempirischen Bemessungsverfahren. Und wo Wissenslücken bestehen, werden sie durch vorsichtige Berechnungsannahmen auf der sicheren Seite abgedeckt. Aber Ziel eines guten Tragwerksentwurfes ist ja nicht nur ausreichende Standsicherheit, sondern auch angemessene Wirtschaftlichkeit. Und deshalb gab und gibt es auf dem Feld der Bemessungsverfahren für baupraktisch imperfekte Schalenbauten noch sehr viele Forschungsaufgaben.

Das Fachgebiet Stahlbau der Universität Essen hat in den letzten beiden Jahrzehnten unter meiner Leitung eine Reihe von Einzelbeiträgen zur Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren für schalen-

beulgefährdete Stahlbauten geleistet. Alle Forschungsarbeiten waren stets kombiniert theoretisch-experimenteller Natur, um den Bezug zur Stahlbaupraxis sicherzustellen. Dabei ist unter „theoretisch“ vor allem die Durchführung systematischer numerischer Analysen mit Hilfe moderner FEM-Software zu verstehen. In den folgenden Abschnitten wird anhand von fünf Typen stählerner Schalenbauten und ihrer spezifischen Schalenbeulprobleme gezeigt, wie die Essener Forschungsarbeiten Beiträge dazu geleistet haben, das spannende Bemessungsproblem „Schalenbeulen im Stahlbau“ besser zu beherrschen.

Silos aus Stahl

Behälter zur Speicherung von Feststoffpartikeln werden Silos genannt – im Gegensatz zu Behältern für Flüssigkeiten oder für Gase. Das Spektrum der zu speichernden Feststoffpartikel (meist als „Silogut“ bezeichnet) ist sehr groß und reicht von organischen Gütern wie Getreide, Zucker oder Gärfutter über mineralische Güter wie Zement oder Betonkies bis zu Kunststoffgranulaten aus modernen chemischen Fertigungsprozessen. Werden Silos aus Stahl gebaut, so handelt es sich in aller Regel um stehende dünnwandige Kreiszyinderschalen (Abb. 7) mit Durchmessern bis zu 35 Metern und Höhen bis zu 40 Metern. Sie werden meist von oben befüllt und nach unten entleert.

Spezifische Schalenbeulprobleme in Silos

Das Silogut drückt horizontal von innen gegen die Silowandung und erzeugt horizontale Zugspannungen in Umfangsrichtung (so genannte „Kesselspannungen“ oder „Fassspannungen“), ähnlich wie Flüssigkeiten oder Gase. Im Gegensatz zu letzteren gibt das Silogut aber auch vertikale Lasten an die Wandung ab, insbesondere, wenn es beim Entleeren an der Wand entlang nach unten rutscht. Diese Lasten heißen

„Wandreibungslasten“. Sie erzeugen vertikale Druckspannungen in der Silowandung, so dass hier das klassische Schalenbeulproblem der axialgedrückten Kreiszylinderschale gemäß Abbildung 2c vorliegt. So weit, so überschaubar.

In der Bemessungspraxis verkompliziert sich nun aber die Problemstellung infolge einer Reihe von Einflüssen. Erstens sind die Wandreibungslasten sehr stark von den physikalischen Kenngrößen und der Beschaffenheit des Silogutes (wie körnig oder staubförmig) abhängig und streuen sehr stark. Man ist trotz aller Fortschritte bei der theoretisch-numerischen Durchdringung der Vorgänge im „fließenden“ Silogut (Stichwort: Schüttgutmechanik) immer noch auf Lastannahmen aus Versuchen angewiesen. Zweitens ist das Stabilitätsverhalten einer Silowand günstiger als das einer Zylinderwand des Basisfalles gemäß Abbildung 2c, weil der vom Silogut auf die Silowand ausgeübte *Innen-Druck* q_i „imperfektionsglättend“ wirkt und weil das Einbeulen nach innen vom Silogut selbst behindert (aber nicht verhindert) wird. Beide stabilisierenden Einflüsse sind nur schwer quantitativ zu erfassen. Drittens stehen Silos oft auf Einzelstützen, wodurch die Axialdruckbeanspruchung ungleichmäßig wird.

Alle diese Aspekte führen dazu, dass der Tragwerksentwurf eines Silos viel Sachkenntnis erfordert⁸. Leider wird das immer wieder unterschätzt, so dass die Schadensrate bei Silos deutlich höher ist als bei anderen Baukonstruktionen (Abb. 8 und 9).

Essener Forschungsbeiträge

Roland Krysik hat untersucht, wie das Stabilitätsverhalten axialgedrückter Kreiszylinderschalen (beispielsweise als Wandung eines Silos) und Kegelschalen (beispielsweise als Auslauftrichter eines Silos) durch Innendruck q_i beeinflusst wird.⁹ Den Innendruck hat er bei seinen Versuchen mit Hilfe von Wasser

im Inneren der Versuchskörper erzeugt. Die Versuchskörper wurden – zusammen mit dem Druckwasser im Inneren – in einer Prüfmaschine axial druckbelastet und zum Beulen gebracht (ähnlich Abb. 2c). Aus solchen experimentellen und einer Vielzahl paralleler theoretischer Untersuchungen hat er eine Reihe von Verbesserungsvorschlägen für die Bemessung entwickelt. Einer dieser Vorschläge modifiziert den Beulabminderungsfaktor χ_x in Gleichung (5) zur Erfassung des Innendruckeinflusses wie folgt:

$$\chi_{x,9} = C_{9,el} \cdot C_{9,pl} \cdot \chi_x \quad (6)$$

mit dem *elastischen Erhöhungsfaktor* zur Erfassung des imperfektionsglättenden Einflusses (gilt ab $\lambda_s = 1,0$)

$$C_{9,el} = 1 + 1,2 \lambda_s \left[\frac{q_i}{E} \left(\frac{r}{t} \right)^2 \right]^{0,38} \quad (6a)$$

und dem *plastischen Reduzierungsfaktor* zur Erfassung der Gefahr vorzeitigen Fließversagens

$$C_{9,pl} = \left[1 - 0,75 \left(\frac{q_i}{f_y} \right)^2 \left(\frac{r}{t} \right)^2 \right]^{0,85} - 0,5 \left(\frac{q_i}{f_y} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (6b)$$

Dieser Vorschlag wird voraussichtlich in die Euronorm übernommen.

Heribert Düsing hat sich mit der Verbesserung des Stabilitätsverhaltens von Kreiszylinderschalen durch Längssteifen auseinandergesetzt.¹⁰ Solche Längssteifen können beispielsweise an der Silowandung vertikal über Einzelstützen angeordnet werden, um Schadensfälle wie den in Abbildung 9 dargestellten auszuschließen.

Schornsteine aus Stahl

Industrieschornsteine dienen dazu, Rauch- oder Abgase in die Atmosphäre abzuführen. Sie lassen sich als so genannte *freistehende* (das heißt nicht zusätzlich abgestützte) Schornsteine bis zu Höhen von etwa 120 Metern in Stahl ausführen. Der statischen Form nach sind sie langrohrförmige Kreiszylinderschalen, analog zu dem Schalenstab in Abbildung 1d, allerdings unten fest im Fundament eingespannt, dafür oben



(7) Silogruppe aus Stahl zur Speicherung von Kunststoffgranulaten.

frei – ähnlich einem überdimensionalen Getreidehalm, allerdings ohne Ähre. Dieser Schalenstab hat in der einfachsten Ausführung als *einwandiger* Schornstein gleichzeitig tragende und rauchgasführende Funktion. Das hat bei Kraftwerken, deren Rauchgase bis zu 550 Grad Celsius heiß sind, zur Folge, dass der Schornstein zusätzlich von außen wärmeisoliert werden muss. Man bildet deshalb Kraftwerkschornsteine meistens zweiwandig als *Doppelmantelschornsteine* aus. Bei ihnen wird die rauchgasführende Funktion von einem wärmeisolierten *Innenrohr* wahrgenommen, das wegen der hohen Temperatur und der chemisch aggressiven Reststoffe im Rauchgas aus Edelstahl besteht. Die tragende Funktion wird vom äußeren *Tragrohr* wahrgenommen, das aus normalem Baustahl besteht (Abb. 10).

Die wesentliche Belastung des *Tragrohrs* ist der Wind. Er erzeugt auf der windabgewandten Seite vertikale Druckspannungen, die zum Schalenbeulen führen können – ähnlich wie in der Mitte des knickenden Schalenstabes in Abbildung 1d. Die wesentliche Belastung des *Innenrohrs* ist der Unterdruck, der sich im Schornstein infolge des „natürlichen Zuges“ ausbildet. Der Unterdruck stellt für die Innenrohrschale ebenfalls ein Beulproblem dar. Beide genannten Schalenbeulprobleme werden heute vom



(8) Beulen in der „Standzarge“ eines Silos.
Foto: J.M. Rotter, Edinburgh

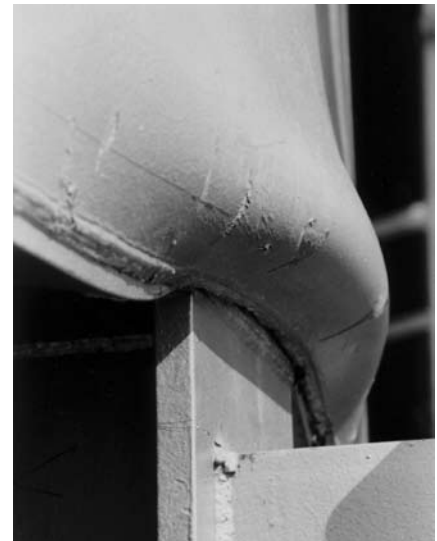
Tragwerksplaner bei der Bemessung zuverlässig beherrscht. In den letzten Jahren ist aber bei den modernen Kraft-Wärme-Kopplungs-Kraftwerken (auch *Heizkraftwerke* genannt) in den Schornstein-Innenrohren ein interessantes Schalenbeulproblem aufgetaucht, über das nachfolgend berichtet wird.

Ein spezifisches Schalenbeulproblem im Innenrohr von Heizkraftwerk-Schornsteinen

Die Technologie der Kraft-Wärme-Kopplung wird wegen der hohen Energieeffizienz umweltschonend mit Recht gefördert. Die Kopplung besteht darin, dass in

einer *ersten Phase* Gasturbinen elektrischen Strom („Kraft“) erzeugen und in einer *zweiten Phase* das dabei entstandene heiße Rauchgas ($T = 450$ bis 550 Grad Celsius) in einem *Abhitzeessel* Wärme erzeugt. Die Wärme dient entweder industriellen Zwecken oder als Fernwärme der Heizversorgung von Städten oder Stadtteilen. Nach dem Wärmezug im Abhitzeessel hat das Rauchgas nur noch Temperaturen in der Größenordnung von 100 Grad Celsius (im Weiteren als „kalt“ bezeichnet) und wird über den Schornstein in die Atmosphäre entlassen.

Es ist nun aber beim Betrieb solcher Heizkraftwerke unvermeidbar,



(9) Beule über einer Silostütze.
Foto: W. Guggenberger, Graz

dass zeitweise das heiße Rauchgas unter Umgehung des nachgeschalteten Abhitzeessels direkt in die Atmosphäre abgegeben werden muss. Das ist beispielsweise der Fall, wenn im Sommer keine Wärme benötigt wird, trotzdem aber Strom erzeugt werden soll. Diese Betriebsart wird „Bypass-Betrieb“ genannt. Dazu braucht man wegen des heißen Rauchgases einen Doppelmantelschornstein mit hitzebeständigem Edelstahl-Innenrohr. Es liegt nahe, diesen Schornstein auch für das kalte Rauchgas bei Normalbetrieb zu verwenden, um die Kosten für einen zweiten Schornstein zu sparen. Da aber das heiße und das kalte Rauchgas aus separaten Rohrleitungssystemen kommen, hat ein solcher Doppelfunktionsschornstein entweder zwei getrennte Eintrittsöffnungen (zum Beispiel heiß von unten, kalt von der Seite), oder die beiden Rauchgasleitungen werden bereits vor Eintritt in den Schornstein zusammengeführt. In beiden Fällen kann mit Hilfe von Klappen oder Schiebern von einer Betriebsart auf die andere Betriebsart umgeschaltet werden.

Die unterschiedlichen Temperaturen der beiden Rauchgasarten bewirken, dass sich das Innenrohr bei Umschalten von Normalbetrieb auf Bypass-Betrieb und umge-



(10) Doppelmantelschornstein eines Heizkraftwerkes.

kehrt wechselweise ausdehnt und zusammenzieht. Zum Verständnis: Ein 75 Meter hohes Innenrohr mit sechs Metern Durchmesser wird bei Erwärmung von 20 auf 500 Grad Celsius um etwa 650 Millimeter länger (!) und um etwa 55 Millimeter breiter. Das muss zwangungsfrei erfolgen können, da das Rohr sonst zerstört würde (es würde zerknittert). Konstruktiv wird das erreicht, indem das Innenrohr sich frei gegenüber dem äußeren Tragrohr vertikal verschieben kann, wobei es teleskopartig geführt wird. Die Führungskonstruktionen wiederum dürfen die Vergrößerung des Durchmessers nicht behindern. Wie das im Einzel-

nen realisiert wird, kann hier nicht vertieft werden. Es ist bewährter Stand der Technik im Stahlschornsteinbau, wenn heiße Gase abgeführt werden müssen.

Nachdem man diese Technik sinngemäß für die Doppelfunktionsschornsteine von Heizkraftwerken übernommen hatte, gab es im zurückliegenden Jahrzehnt eine Reihe unerwarteter Beulschäden in den Innenrohren. Die festgestellten Beulen waren alle vom selben Typ, nämlich „froschmaulartig“ nach innen gewölbt (Abb. 11). Diese Beulenform ist charakteristisch für Kreiszyinderschalen unter Axialdruckbeanspruchung (vgl. Abb. 2c).

In mehreren gutachterlichen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Ursache stets in der falschen Vorstellung der Konstrukteure lag, der Übergang des Innenrohres vom heißen in den kalten Zustand beim Umschalten von Bypass-Betrieb zu Normalbetrieb vollziehe sich gleichmäßig. Man ging quasi davon aus, dass das erhitzte Innenrohr vom nunmehr durchströmenden kalten Rauchgas gleichmäßig heruntergekühlt würde. In der Realität sind aber so genannte *Temperatursträhnen* im Rauchgasgemisch während des Umschaltvorganges nicht zu vermeiden – selbst bei sorgfältiger Zwangsmischung der heißen und kalten Teilgasströme vor Eintritt des zusammengeführten Rauchgasgemisches in den Schornstein mit Hilfe von strömungsmechanischen Vorrichtungen. Bei einem der geschädigten Schornsteine war das versucht worden. Die Temperatursträhnen erzeugen in der Innenrohrwandung Temperaturdifferenzen ΔT zwischen gegenüberliegenden Wandbereichen (zum Beispiel 450 Grad Celsius auf der einen, 480 Grad Celsius auf der gegenüberliegenden Seite). Auf solche (vermeintlich unbedeutenden) *Temperaturgradienten* ΔT würde das Innenrohr an sich schadlos mit einer spannungslosen „bananenartigen“ Verkrümmung reagieren, wenn es daran nicht durch die teleskopartigen Führungskonstruktionen gehindert würde. Die Folge der Behinderung sind *Zwängungsspannungen* in vertikaler Richtung, die zwangsläufig zu den beobachteten Beulerscheinungen führen.

Essener Forschungsbeiträge

Aus den Schadensanalysen habe ich, zusammen mit Ufuk Kocabiyik, ein Konzept entwickelt, wie Innenrohre von Doppelfunktionsschornsteinen beulsicher dimensioniert werden können. Darüber wurde auch international berichtet¹¹. Das Kernstück des Konzeptes besteht darin, das statische System des

geführten Innenrohres so *statisch bestimmt* wie möglich auszubilden. Auf diese Weise können die unvermeidbaren Temperatursträhnen – sie werden neuerdings auch zutreffend als „thermische Imperfektionen“ bezeichnet – keine großen Zwängungsspannungen in der Rohrwandung erzeugen, weil das Rohr sich mit Hilfe spannungsloser Verkrümmungen „Luft verschaffen kann“. Die Verkrümmungen müssen ihm allerdings konstruktiv durch einen ausreichend großen *Ringspalt* zwischen Innenrohr und Tragrohr ermöglicht werden.

Die erforderliche *statische Bestimmtheit* wird bei dem Konzept erreicht, indem eine ausreichende Anzahl *statischer Gelenke* in das Innenrohr eingebaut werden. Konkret sind das so genannte *Wellenkompensatoren*, wie in Abbildung 12 zu sehen. Die genaue Auslegung eines solchen „temperaturtoleranten“ Innenrohrsystems muss von Fall zu Fall gezielt erfolgen.

Bei der Analyse des ersten Innenrohrbeulschadens Mitte der neunziger Jahre hatte sich – quasi als Nebenergebnis – herausgestellt, dass keine befriedigenden Kenntnisse über das Beulverhalten von Schalen aus Edelstahl unter hohen Temperaturen existierten. Die Problematik besteht darin, dass sich bei den betreffenden *austenitischen* Edelstählen unter hohen Temperaturen nicht nur die beulrelevanten Werkstoffkenngrößen Elastizitätsmodul E und Fließgrenze f_y ändern, sondern auch die Art des Werkstoffverhaltens (konkret: die Form der *Spannungsdehnungslinie*). Kirsi Hautala hat sich dieses Problems angenommen.¹² In extrem aufwändigen Warmbeulversuchen (bis 400 Grad Celsius), unterstützt durch parametrische FEM-Serienberechnungen, hat sie herausgefunden, dass man zwar die vom Stahlhersteller gewährleisteten wärmereduzierten E - und f_y -Werte in das genormte Beulbemessungsverfahren einführen darf, dass man aber in einem bestimmten Bereich des bezogenen Schalenschlankheits-

grades λ_s gemäß Gleichung (4) den Beulabminderungsfaktor χ_x noch einmal reduzieren muss zu

$$\chi_{x,red} = \psi(\lambda_s, T) \cdot \chi_x \tag{7}$$

Für den „Edelstahlfaktor“ ψ lassen sich konkrete Formeln angeben¹³. Er beträgt ungünstigstenfalls 0,75.

Vakuumbehälter aus Stahl

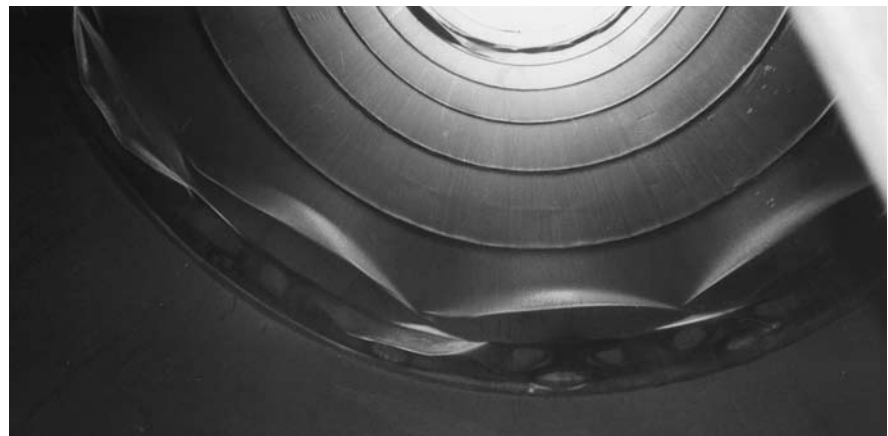
In der Verfahrenstechnik laufen viele Prozesse bei Unterdruck ab. Die dafür benötigten Behälter werden Vakuumbehälter genannt. Das ist nicht ganz zutreffend, denn sie sind in aller Regel nicht völlig luftleer. Die Prozessunterdrücke betragen meist nur Bruchteile des atmosphärischen Normaldruckes von einem bar. Trotzdem ist Schalenbeulen das beherrschende Bemessungsproblem, wenn ein solcher Vakuumbehälter in Stahl ausgeführt wird.

Einer der größten in Europa je hergestellten stählernen Vakuumbehälter mit etwa 1.700 Kubikmetern Volumen steht in Bremen, und er ist wirklich für *absolutes Vakuum* ausgelegt (konkret: für einen Innendruck von 0,000 001 bar). Er verbirgt sich bescheiden in einem 146 Meter hohen Betonturm, der wie ein riesiger Kugelschreiber seit 1990 auf dem Gelände der Universität Bremen steht (Abb. 13). Es handelt sich um

den „Fallturm“ des Zentrums für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM). Kernstück des Fallturmes ist eine 112 Meter hohe, frei stehende Stahlröhre. Der quasi um sie herum gebaute Betonturm schirmt sie gegen Umwelteinflüsse, insbesondere gegen Wind ab. Aus der Stahlröhre kann bis auf den genannten Restdruck die Luft herausgezogen (*evakuiert*) werden. Lässt man nun durch diesen praktisch luftleeren Raum eine Stahlkapsel herunterfallen, so herrscht in ihr für die Dauer des freien Falls Schwerelosigkeit wie im Weltraum. Das machen sich die Physiker des ZARM zunutze, indem sie „in einer erdgebundenen Forschungseinrichtung Experimente unter Schwerelosigkeit“ durchführen können.

Spezifische Schalenbeulprobleme in Vakuumbehältern

Wird ein Vakuumbehälter rohrförmig ausgebildet (wie die Fallröhre in Bremen), so stellt sie eine Kreiszyinderschale unter innerem Unterdruck bzw. – statisch gleichwertig – unter äußerem Überdruck (meist als „Manteldruck“ bezeichnet) dar. Dies ist ein weiterer klassischer Schalenbeulfall, der in seiner idealisierten Form ebenfalls bereits Anfang des 20. Jahrhunderts gelöst wurde (von Mises 1914). Der kritische Manteldruck, bei dem die Schale beult,



(11) Beulschäden im Innenrohr eines Heizkraftwerk-Schornsteins (von unten nach oben gesehen).



(12) Sanierung eines beulgeschädigten Edelstahl-Innenrohres mit Hilfe von eingeschweißten Wellenkompensatoren.

wird mit wachsender Zylinderlänge immer kleiner, so dass man eine immer dickere Wandung wählen muss. Der Tragwerksplaner versucht deshalb, bei langen manteldruckbelasteten Kreiszyklinderschalen die Wanddicke auf ein fertigungstechnisch beherrschbares Maß zu beschränken, indem er ringförmige Versteifungen anordnet – ähnlich Fassdauben bei einem Weinfass.

Die Bemessungsaufgabe besteht nun darin, Abstand und Stärke dieser *Ringsteifen* so zu optimieren, dass der Zylinderabschnitt zwischen zwei Ringsteifen um ein gewisses Sicherheitsmaß früher beult als der gesamte Zylinder mitsamt Ringsteifen. Man nennt die erste Beulform „lokales Beulen“ (Abb. 14a), sie hat ein vergleichsweise gutartiges Nachbeulverhalten. Die zweite Beulform wird „globales Beulen“ genannt (Abb. 14b), sie führt in der Regel zum völligen Kollaps des Behälters. Bei einem stehenden Vakuumbehälter wie der Bremer Fallröhre kommt hinzu, dass sich im unteren Bereich vertikale Druckspannungen aus dem Eigengewicht in der Zylinderwandung einstellen. Es überlagern sich demnach die beiden elementaren Schalenbeulfälle „Axialdruck“ (gemäß Abb. 2c) und „Manteldruck“. Damit stellt sich die Frage der gegenseitigen ungünstigen Beeinflussung. Man spricht in einem solchen Fall von „Beulinteraktion“.



(13) Der „Fallturm“ in Bremen.

Essener Forschungsbeiträge

Zunächst sei erwähnt, dass die Bremer Fallröhre von mir, zusammen mit Roland Krysik, dimensioniert und als beulsicher nachgewiesen wurde. Da es kein verbindliches deutsches Regelwerk für das spezifische Schalenbeulproblem gab, musste auf Europäische Empfehlungen und die Literatur zurückgegriffen werden. Die Röhre hat einen Durchmesser von dreieinhalb Metern, eine Wanddicke von acht Millimetern und ist alle 160 Zentimeter mit einer leichten Ringsteife und alle 1.120 Zentimeter mit einer schweren Ringsteife versteift.

Das Grundproblem des Imperfektionseinflusses auf das Beulen von Kreiszyklinderschalen unter

Manteldruck wurde von Michael Stracke experimentell und theoretisch behandelt.¹⁴ Er entwickelte eine ausgefeilte Versuchstechnik, bei der das zu untersuchende Schalenmodell innerhalb eines Hochdruckprüfbehälters mittels Wasserdruck von außen belastet wurde (bis zu zehn bar), bei der aber trotzdem im Inneren des Modells die sich entwickelnden Beulverformungen messtechnisch verfolgt werden konnten. Einige seiner Erkenntnisse sind heute Bestandteil unserer Bemessungsnorm DIN 18800-4.

Ingrid Düsing erweiterte die Untersuchungen auf ringversteifte Kreiszyklinderschalen.¹⁵ Sie setzte sich damit auseinander, wie sich lokale und globale Beulformen in ihren Trageigenschaften, vor allem in ihrer



(14) Stählerne Schalenmodelle, die unter Manteldruck lokal (a) bzw. global (b) eingebeult sind.

Imperfektionsempfindlichkeit und in ihrem Nachbeulverhalten, voneinander unterscheiden. Die beiden in Abbildung 14 gezeigten stählerne Modellschalen stammen aus ihrer Arbeit. De facto ist das Modell in Abbildung 14a eine verkleinerte Nachbildung eines Abschnittes der Bremer Fallröhre; es versagte, wie gewünscht, durch *lokales Beulen*. Abbildung 14b zeigt, wie bei zu schwachen Ringsteifen sich die unerwünschte *globale Beulform* einstellt.

Den Fragen der Beulinteraktion widmete sich Thomas Winterstetter.¹⁶ Seine sehr umfangreichen theoretischen Untersuchungen, ebenfalls unterstützt durch Versuche, lieferten weitreichende Verbesserungsvorschläge für die Beulbemessung von Kreiszyinderschalen unter kombinierten Belastungen¹⁷. Sie werden zurzeit in die erste europäisch harmonisierte Bemessungsnorm für stählerne Schalenbauten eingearbeitet.

Tankbehälter aus Stahl

Behälter zur Speicherung von Flüssigkeiten werden Tankbehälter (oder einfach Tanks) genannt. Meist werden sie als „topfartige“ stehende Kreiszyinder mit Durchmessern bis zu $d = 100$ Metern und Höhen bis zu $h = 25$ Metern ausgeführt und haben ein festes Dach (Abb. 15). Die gespeicherte Flüssigkeit (beispielsweise Rohöl) drückt von innen horizontal gegen die Tankwandung und erzeugt horizontale Zugspannungen in Umfangsrichtung – ähnlich wie



(15) Tankbehälter zur Zwischenlagerung von Rohöl.

das Silogut in einem Silo, aber ohne dessen zusätzliche vertikale Wandreibungslasten. Die Beanspruchungsverhältnisse sind damit sehr einfach. Die erforderliche Wanddicke nimmt von oben nach unten entsprechend dem wachsenden Flüssigkeitsdruck zu.

Das Schalenbeulen spielt nur dann eine Rolle, wenn der Flüssigkeitsdruck wegfällt, das heißt wenn der Behälter leer ist. Tritt aber dann ein Orkan auf, so sind die oberen dünnen Wandbereiche auf der Luvseite infolge des Winddruckes beulgefährdet. Die Beulgefährdung wird durch das Eigengewicht des Daches noch erhöht, denn es erzeugt vertikale Druckspannungen in der Wandung. Wir haben also wieder den Fall der Beulinteraktion aus „Axialdruck“ und „Manteldruck“ wie im unteren Bereich der Fallröhre. Dieser Beulfall ist in der Regel für den oberen Bereich von Tankbehältern bemessungsbestimmend.

Entfällt das Dach, so sprechen wir von einem *offenen* Tankbehälter. Einsatzgebiete sind zum Beispiel Regenwasser- oder Trinkwasserbehälter in ariden Gebieten (eventuell mit Textilabdeckung gegen Verdunstung), Gießwasserbehälter für Großgärtereien oder Güllebehälter für landwirtschaftliche Großbetriebe. Ein weiterer moderner Anwendungsfall sind so genannte *Auffangtassen* um Erdöltanks herum. Solche Auffangräume werden heute gesetzlich gefordert, um bei undicht gewordenem Tank eine Verseuchung des Bodens und des Grundwassers

zu verhindern. Allen diesen offenen Tankbehältern sind die nachfolgend beschriebenen Aspekte bei der Schalenbeulanalyse unter Windbelastung gemeinsam.

Spezifische Schalenbeulprobleme bei offenen Tankbehältern

Da das Eigengewicht des Daches und damit dessen negativer Beuleinfluss entfällt, kann der obere Bereich der Wandung noch dünner ausgeführt werden als bei Tankbehältern mit Dach. Radius/Dicken-Verhältnisse $r/t =$ ungefähr 5.000 (beispielsweise Blechdicke $t =$ fünf Millimeter bei einem Durchmesser $d = 2r = 50$ Meter) sind keine Seltenheit. Solche extrem dünnwandigen, aber im Verhältnis zu ihrem Radius nicht sehr hohen Kreiszyinderschalen beulen zwar unter orkanartiger Windbelastung ein, weisen aber – man weiß das aus Taifun- bzw. Hurrikan-Erfahrungen – ein *gutartiges* Nachbeulverhalten im Sinne der P-Kurve in Abbildung 5 auf. Konkret bedeutet das, die eingebeulte Wandung bricht nicht zusammen, sondern trägt den extremen Winddruck so lange *überkritisch* (quasi wie eine Reihe gespannter Tücher), bis bei abflauendem Wind die Beulen wieder herauspringen. Die zugehörige Beulform nennen wir wieder „lokales Beulen“ (Abb. 16a). Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass der obere Rand kreisförmig bleibt. Das tut er natürlich nur, wenn dort eine ausreichend kräftige Ringsteife angeordnet ist. Anderenfalls träte „globales Beulen“ ein (Abb. 16b), was unweigerlich den Kollaps des Behälters zur Folge hätte.

Das gutartige Nachbeulverhalten wird in manchen, international viel angewendeten Regelwerken für Tankbauwerke, so auch in dem des American Petroleum Institute, verdeckt in Rechnung gestellt, indem kein scharfer Beulsicherheitsnachweis unter orkanartiger Windbelastung gefordert wird.

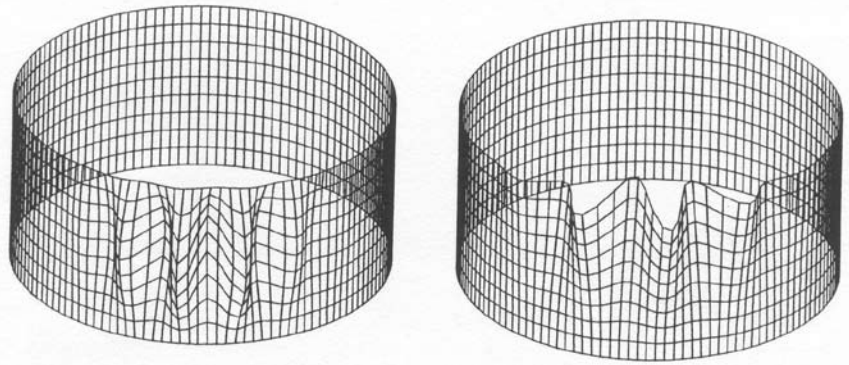
Dafür wird dort aber eine empirische Formel für das erforderliche Mindest-Widerstandsmoment der Randsteife angegeben:

$$W_{RS} \geq 0,058 \cdot 10^{-6} \cdot d^2 h. \quad (8)$$

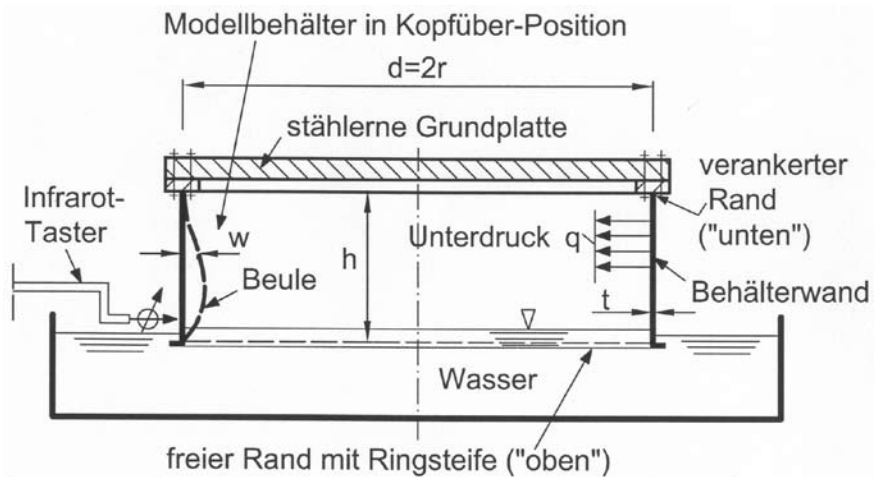
Essener Forschungsbeiträge

Um die bisher eher empirisch basierte Bemessungsstrategie für *extrem dünnwandige, offene Tankbehälter* unter orkanartiger Windbelastung auf eine rationalere Basis abstützen zu können, führten Bernd Binder¹⁸ und Holger Lange¹⁹ mehrjährige experimentelle und numerische Untersuchungen durch. Binder entwickelte zunächst eine spezielle Versuchsanlage für gleichmäßigen (rotationssymmetrischen) Manteldruck. Ihr Grundkonzept geht auf eine Idee von Maria Esslinger aus Braunschweig zurück (Abb. 17). Es besteht darin, dass der Modellbehälter in „Kopfüber-Position“ montiert wird und seine offene Seite, das heißt sein freier Schalenrand (unversteift oder ringversteift), wenige Millimeter in Wasser getaucht wird. Dadurch kann mittels Evakuierung des Zylinderinneren die Wandung auf äußeren Manteldruck belastet werden, ohne dabei die Bewegungsfreiheit des Randes (wenn er beulen „möchte“) zu behindern. Die Modellbehälter ($d = 1000$ Millimeter, $h = 150$ bzw. 500 Millimeter) hatten Wanddicken von $t = 0,2$ und $0,5$ Millimetern. Sie bestanden aus PVC-Folie oder Stahl-Kaltband. Für die Messung der Beuldeformationen musste wegen der extremen Dünnwandigkeit ein *berührungsloses*, opto-elektronisches Messverfahren mit Hilfe eines umlaufenden Infrarot-Reflexlichttasters eingesetzt werden.

Die Versuchsanlage wurde später von Lange für eine „windlastähnliche“ Verteilung des Manteldruckes über den Umfang weiterentwickelt. Offene stehende Kreiszyylinder unterliegen, wenn sie vom Wind angeströmt werden, einer über den Umfang veränderlichen Manteldruckverteilung. Sie ist durch nach



(16) Berechnete kritische Beulformen stehender offener Kreiszyinderschalen unter Windbelastung: (a) mit starker Randsteife – lokales Beulen, (b) ohne oder mit schwacher Randsteife – globales Beulen.



(17) Schematischer Versuchsaufbau für Nachbeulversuche an offenen kreiszyllindrischen Modellbehältern.



(18) Windenergieanlagen auf stählernen Rohrtürmen.

innen gerichteten resultierenden Druck im Luvbereich (Außendruck plus Innensog), nach außen gerichteten resultierenden Druck an den Flanken (Außensog minus Innensog) und Quasi-Nullbelastung im Leebereich (Außensog minus Innensog) gekennzeichnet. Diese Druckverteilung wurde nun im Labor näherungsweise simuliert, indem der Zylinder viertelkreisweise *innerem Unterdruck* (Luvseite), *innerem Überdruck* (Flanken) bzw. *keinem Druck* (Leeseite) ausgesetzt wurde. Versuchstechnisch wurde das durch Evakuieren des luftdicht gegenüber dem übrigen Zylinderinneren abgeschlossenen Luvsegmentes und luftgefüllte PVC-Überdruckkissen an den Flankensegmenten realisiert. Mit dieser Versuchstechnik konnte experimentell nachgewiesen werden, dass das Nachbeulverhalten unter der veränderlichen Winddruckverteilung noch gutartiger ist als unter gleichmäßigem (rotationssymmetrischem) Manteldruck.

Beide Versuchsreihen wurden durch umfangreiche numerische Untersuchungen ergänzt. Sie liefern die strukturmechanische Erklärung und Untermauerung dafür, warum bei ausreichend versteiftem oberem Behälterrand selbst in sehr dünnen Wandblechen nach Orkanen selten bleibende Beulverformungen gefunden wurden. Es stellte sich auch heraus, dass die empirische Bemessungsformel (8) sich durch ein sinnvolles baustatisches Tragmodell für die Randsteife unterlegen lässt. Außerdem konnte für eine rational fundierte Beulbemessung der sehr dünnen oberen Wandbereiche von offenen Tankbehältern vorgeschlagen werden, den genormten Beulabminderungsfaktor χ_0 für Schalenbeulen unter Manteldruck wie folgt zu erhöhen:

$$\chi_{0,erh} = (2.63 - 1.09 l/r) \cdot \chi_0 \quad (9)$$

In dieser Gleichung steht l für den vertikalen Abstand von Ringsteifen. Sind keine Zwischenringsteifen vorhanden, so ist l gleich

der Behälterhöhe h . Man erkennt, dass das beobachtete *gutartige* Nachbeulverhalten offenbar nur für niedrige Zylinder bzw. Zylinderabschnitte mit $l < 1.5r$ bzw. $< 0.75d$ gilt²⁰.

Stahltürme für Windenergieanlagen

Die Nutzung der Windenergie hat in den letzten Jahren einen rasanten Aufschwung genommen – aus meiner Sicht eine überaus begrüßenswerte Entwicklung. Die Windenergieanlagen (Windräder) stehen meist auf schlanken stählernen Rohrtürmen (Abb. 18). Die bisher ausgeführten größten Höhen liegen bei ungefähr 120 Metern. Vom Tragwerkstyp her sind die Türme einwandigen stählernen Schornsteinen vergleichbar. Die Analogie zu einem überdimensionalen Getreidehalm drängt sich hier noch mehr auf, denn im Gegensatz zum Schornstein, der nur sich selbst zu tragen hat, trägt der Turm am oberen Ende die Windturbine (ähnlich der Ähre des Getreidehalms). Die Belastung des Turms, insbesondere aus Wind, ist also ungleich größer als bei einem Schornstein gleicher Höhe und gleichen Fußdurchmessers. Deswegen muss aus Kostengründen der Rohrquerschnitt über die Höhe so optimiert werden, dass er überall statisch etwa gleich ausgenutzt ist. Das wird erreicht, indem nicht nur die Wanddicke von unten nach oben abnimmt (wie beim Schornstein), sondern auch der Turmdurchmesser. Es entsteht dadurch die typische, leicht konische Form, wie in Abbildung 18 zu sehen.

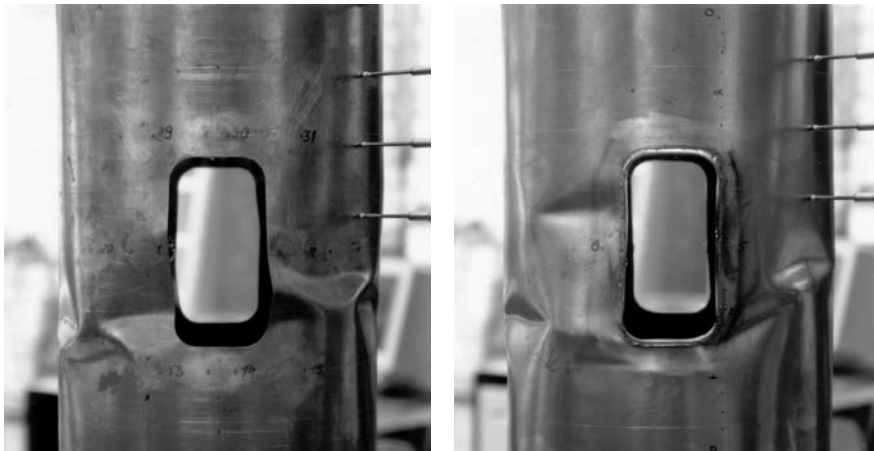
Wie beim Schornstein ist das Schalenbeulen unter Axialdruckbeanspruchung auf der windabgewandten Seite der bemessungsbestimmende Aspekt – neben der *Werkstoffermüdung*, die aber nicht Thema des vorliegenden Beitrages ist. Der betreffende Grundbeulfall – eine lange, kreiszylindrische oder leicht konische Rohrschale unter Biegung – ist seit langem Stand der

Technik und wird vom Tragwerksplaner beherrscht. Es haben sich aber einige windturmspezifische Detailpunkte herausgeschält, für die noch Forschungsbedarf bestand, um nicht nur zu tragsicheren, sondern auch wirtschaftlichen Konstruktionen zu kommen. Zwei von ihnen werden nachfolgend kurz beschrieben.

Spezifische Schalenbeulprobleme in Windenergietürmen

Die konische Turmform bedeutet für die Fertigung, dass jeder einzelne Turmabschnitt (in der Fachsprache: „Turmschuss“ genannt) individuell aus passgenau geschnittenen und in die konische Form gewalzten Grobblechstücken zusammengeschweißt werden muss. Das ist kostenintensiv, allerdings bei den üblichen Durchmesser (etwa drei bis fünf Meter) nicht zu umgehen. Bei kleineren Türmen hat man aber mehrfach versucht, industriell gefertigte und im Stahlhandel „vom Meter“ lieferbare Rohre einzusetzen. Da diese aber kreiszylindrisch sind (also einen konstanten Durchmesser haben), kann die statisch erwünschte Abnahme des Rohrdurchmessers von unten nach oben nur stufenweise realisiert werden, zum Beispiel in Form von drei Abschnitten mit Rohren unterschiedlichen Durchmessers. An den Übergangstellen werden kurze, stark konische Stücke eingeschweißt. Die dadurch bedingte Störung im Kraftfluss muss beim Beulsicherheitsnachweis natürlich berücksichtigt werden, sie stellt quasi eine besonders gravierende Imperfektion dar. Mangels genauer Kenntnisse behilft sich der Tragwerksplaner mit Maßnahmen auf der sicheren Seite, indem er zum Beispiel kostspielige zusätzliche Ringsteifen einzieht, die aber möglicherweise gar nicht nötig sind.

Ähnlich verhält es sich mit dem zweiten hier zu erwähnenden Detailpunkt. Das ist die Öffnung für die Eingangstür am Fuß des Turmes. Die konstruktiv nächstliegende Lösung ist eine einfache umlaufende Ver-



(19) Versuchskörper mit Mantelöffnungen nach Axialdruckbeulversuch:
(a) unversteifte Öffnung, (b) umlaufend randversteifte Öffnung.

steifung des Öffnungsrandes. Nach geltenden deutschen Baubestimmungen müssen aber zusätzliche „vorgebundene“ Längssteifen eingebracht werden, die ebenfalls möglicherweise gar nicht nötig sind.

Essener Forschungsbeiträge

Zur Lösung des ersten Problems hat Peter Swadlo mit seinen schon erwähnten Untersuchungen einen Beitrag geleistet. Abbildung 6b zeigt die kritische Beulform eines typischen konischen Übergangsbereiches zwischen zwei kreiszylindrischen Rohrschüssen unterschiedlichen Durchmessers, der von ihm (neben vielen anderen *zusammengesetzten Schalenformen*) theoretisch und experimentell untersucht wurde. Zwar war die untersuchte Belastung *zentrischer Axialdruck*, jedoch lassen sich die Erkenntnisse auf den partiellen Axialdruckbereich der windabgewandten Seite eines Windenergieurmes übertragen. Swadlo fand heraus, dass in der Regel keine Ringsteifen an den Übergängen erforderlich sind, und er entwickelte Vorschläge, wie der Beulsicherheitsnachweis des gestörten Schalenbereiches sachgemäß geführt werden sollte.

Des zweiten Problems hat sich Dejan Velickov angenommen.²¹ Er hat Kreiszylinderschalen mit unversteiften und umlaufend randversteiften *Mantelöffnungen* verschiedener

Abmessungen und Formen experimentell und theoretisch untersucht. Um in der Prüfmaschine optimale Belastungsverhältnisse zu bekommen, hatten seine aus Ein-Millimeter-Stahlblech hergestellten Versuchskörper jeweils *ein Paar* sich gegenüberliegender Öffnungen und wurden zentrisch auf Axialdruck bis zum Beulen belastet. Abbildung 19 zeigt zwei Versuchskörper aus dieser Reihe. Mit dem an diesen Versuchen validierten nichtlinearen FEM-Berechnungsmodell wurde dann das „richtige“ Öffnungsproblem (also nur *eine* Öffnung, *kein* zentrischer Axialdruck) mit Hilfe von numerischen Parameterstudien analysiert. Ergebnis sind Vorschläge für die Bemessungspraxis. Die Vorschläge betreffen einerseits unversteifte Öffnungen²², andererseits umlaufend randversteifte Öffnungen. Letztere wurden inzwischen in die neueste Ausgabe der Richtlinie für Windenergieanlagen des Deutschen Instituts für Bautechnik übernommen.

Schlussbemerkungen

Ob das Schalenbeulen nun wirklich ein spannendes Bemessungsproblem ist – das zu beurteilen, bleibt dem Leser überlassen. Für uns, die wir uns in den zurückliegenden 20 Jahren im Fachgebiet Stahlbau der Universität Essen damit beschäftigt haben, war es jedenfalls spannend.

Es war vor allem auch deshalb spannend, weil ich vielfältige Gelegenheiten hatte, unsere Forschungsergebnisse im Rahmen deutscher und europäischer Fachgremien mit Kollegen zu diskutieren und in die Entwicklung von Regelwerken für die Baupraxis (wie Normen) einzubringen. Dabei war mir deren fachgerechte und ausführliche Kommentierung und Erläuterung für die Anwender(innen) an der „Front der Tragwerksplanung“ stets ein besonderes Bedürfnis^{23,24}.

Zu den vielen angesprochenen experimentellen Forschungsprojekten ist noch hinzuzufügen, dass sie ohne engagierte Labormitarbeiter nicht in annähernd der erreichten Qualität hätten realisiert werden können. Übrigens wurden alle Versuchsreihen – über ihre Verwendung in Dissertationen hinaus – ausführlich innerhalb der Reihe „Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen der Universität Essen“ dokumentiert.

Bleibt nur noch eines klarzustellen: Natürlich wurde nicht nur in Essen das Tragverhalten beulender Schalen erforscht, sondern auch an anderen Stellen weltweit – und wird dort auch noch weiter erforscht werden. Die Zielsetzung des vorliegenden Beitrages war, dezidiert die Essener Beiträge herauszustellen. Das ist vor allem deshalb ein Anliegen, weil sich abzeichnet, dass diese Forschungsaktivitäten wohl eine Episode ohne Fortsetzung bleiben werden.

Summary

Steel structures are, because of the steel's high material strength, relatively slender and thin. That leads, as soon as internal compressive forces are involved in carrying the applied loads, to a pronounced sensitivity to becoming unstable. Among the three basic structure types which are capable of taking compressive forces – columns, plates, shells – the latter are optimally stable. However, the

related structural stability problem "shell buckling" is rather complex when it comes to practical design. One indication for the complexity are large discrepancies that are observed between the classical shell buckling theory and the buckling behaviour of real shells, be it in experiments or in structural failures. The superficial reason for the discrepancies are so-called imperfections to which shells are extremely sensitive. The deeper physical reason is the specific theoretical behaviour of shells that have been perfectly idealized and been virtually loaded up to their classical theoretical buckling load: Beyond this critical point they exhibit an "ill-humoured" postbuckling behaviour, i. e. they shed considerable parts of their load. Real imperfect shells have therefore a tendency to buckle under a much lower load than the classical one. Of course, with today's computers this real buckling behaviour is theoretically controllable by means of nonlinear shell theories in combination with the Finite Element Method (FEM). However, for practical design purposes the imperfections must either be known in advance (which is not feasible), or they have to be covered by reasonable assumptions. The field of computer-aided buckling design of steel shell structures is presently still a subject of numerous research efforts all over the world.

Anmerkungen/Literatur

- 1) Dieses bewusst anschaulich gewählte Beispiel ist unvermeidbar bemessungstechnisch nicht ganz „sauber“. Bei dem realen streifenförmigen Druckstab handelt es sich um eine hochschlanke Struktur, die rein elastisch versagt. Die reale Schale dagegen ist eine sehr gedrungene Struktur, deren Versagen vom Werkstofffließen dominiert wird. Wäre sie aus unbegrenzt elastischem Werkstoff, das heißt entfielen die Fließgrenze, so würden die Imperfektionen die Versagensspannung nur auf etwa die Hälfte von 2661 N/mm² herabdrücken. Bei hochschlanken Schalen geht die Imperfektionsabminderung aber bis auf ein Zehntel herunter.
- 2) Waeteraere, K.P.: Überprüfung der experi-

mentellen Absicherung der Beulkurve für sehr imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle in der zukünftigen DIN 18800-4 am Beispiel der axialgedrückten Kreiszyinderschale. Diplomarbeit Essen 1988

- 3) Swadlo, P.: Stabilität zusammengesetzter stählerner Kreiszyinder-Kegel-Schalen unter Axialdruck und Außendruck. Dissertation Essen 2001
- 4) Teng, J.G.: Buckling of thin shells – recent advances and trends, in: Applied Mechanics Review 4/1996, 263–274
- 5) Schmidt, H.: Stabilitätsnachweise für Stahlkonstruktionen – Entwicklung, Stand, Ausblick, in: Deutscher Ausschuss für Stahlbau (Hrsg.): Bericht Nr. 20/1996 aus Forschung, Entwicklung und Normung, Köln 1996, 11–23
- 6) Schmidt, H.: Stability of steel shell structures – general report, in: Journal of Constructional Steel Research 55/2000, 159–181
- 7) Rotter, J.M.: Advanced computer calculations in the design of shell structures, in: Chan, S.L., Teng, J.G., Chung, K.F. (eds.): Advances in Steel Structures, Proceedings 3rd Int. Conf. Hong Kong, Oxford 2002, 27–42
- 8) Rotter, J.M.: Guide for the economic design of circular metal silos. London 2001
- 9) Krysik, R.: Stabilität stählerner Kegelstumpf- und Kreiszyinderschalen unter Axial- und Innendruck. Dissertation Essen 1994
- 10) Düsing, H.E.: Stabilität längsversteifter stählerner Kreiszyinderschalen unter zentrischem Axialdruck – Theoretische Grundlagen und baupraktischer Beulsicherheitsnachweis. Dissertation Essen 1994
- 11) Schmidt, H., Kocabiyyik, U.: Sustainable steel chimney design for combined heat and power plants, in: N.N.(ed.): Steel in Sustainable Construction, Proceedings Int. IISI World Conf. Luxembourg, Int. Iron and Steel Institute, Luxembourg 2002, 167–172
- 12) Hautala, K.T.: Buckling of axially compressed cylindrical shells made of austenitic stainless steels at ambient and elevated temperatures. Dissertation Essen 1998
- 13) Schmidt, H., Hautala, K.T.: Beulstabilität axialgedrückter Kreiszyinderschalen aus austenitischen nichtrostenden Stählen bei normalen und erhöhten Temperaturen, in: Bauingenieur 10/2001, 464–473
- 14) Stracke, M.: Stabilität kurzer stählerner Kreiszyinderschalen unter Außendruck. Dissertation Essen 1987
- 15) Düsing, I.E.: Stabilität stählerner ringversteifter Kreiszyinderschalen unter allseitig konstantem Außendruck. Dissertation Essen 1998
- 16) Winterstetter, T.A.: Stabilität von Kreiszyinderschalen aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung. Dissertation Essen 2000
- 17) Winterstetter, T.A., Schmidt, H.: Stabilität von Kreiszyinderschalen aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, in: Stahlbau 6/2001, 412–418
- 18) Binder, B.: Stabilität einseitig offener, verankerter, außendruckbelasteter Kreiszyinderschalen unter besonderer Berücksichtigung des Nachbeulverhaltens. Dissertation Essen 1996

- 19) Lange, H.: Vergleichende Untersuchungen zum Tragsicherheitsnachweis oben offener, randversteifter, kreiszylindrischer Behälter unter Berücksichtigung überkritischer Beultragreserven. Diplomarbeit Essen 1996
- 20) Schmidt, H., Binder, B., Lange, H.: Postbuckling strength design of open thin-walled cylindrical tanks under wind load, in: Thin-Walled Structures 31/1998, 203–220
- 21) Velickov, D.: Stabilität stählerner Kreiszyinderschalen mit unversteiften und umlaufend randversteiften Mantelöffnungen unter Axialdruck. Dissertation Essen 2000
- 22) Velickov, D., Schmidt, H.: Beulwiderstand axialgedrückter Metallkreiszyinderschalen mit unversteifter Mantelöffnung, in: Stahlbau 6/1998, 459–464
- 23) Schmidt, H., Greiner, R.: Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 4, in: Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H. (Hrsg.): Beuth-Kommentar Stahlbauten, Erläuterungen zu DIN 18800 Teile 1 bis 4, 3. Auflage, Berlin 1998, 333–417
- 24) Schmidt, H.: Beulsicherheitsnachweise für Schalen nach DIN 18800 Teil 4, E-DAST-Richtlinie 017 und DIN EN 1993-1-6, in: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2002, Berlin 2002, 291–342

Der Autor

Herbert Schmidt (Jahrgang 1936) studierte von 1957 bis 1962 Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig, arbeitete drei Jahre als Statiker im Stahlbrückenbau in Mainz, war fünf Jahre Assistent am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig und promovierte dort 1970 mit einer Arbeit aus dem Brückenbau. Nach sechs weiteren Jahren als Oberingenieur am gleichen Institut sowie einem zwischenzeitlichen einjährigen Forschungsaufenthalt an der Lehigh University in Bethlehem/USA folgte er Ende 1977 einem Ruf als C3-Professor an die Universität Stuttgart. Dort leitete er im Otto-Graf-Institut (Forschungs- und Materialprüfungsanstalt des Landes Baden-Württemberg) die Abteilung Baukonstruktionen, bis er Mitte 1981 auf die neu geschaffene C4-Professur Stahlbau der Universität Gesamthochschule Essen berufen wurde. Es folgten zwei Jahrzehnte engagierter und fruchtbarer Lehr- und Forschungstätigkeit in Essen. Einer der Schwerpunkte war die im vorliegenden Beitrag behandelte Schalenstabilität. Unter der Leitung Schmidts entstanden unter anderem 14 Doktorarbeiten und eine große Zahl von Veröffentlichungen und Tagungsbeiträgen. Viele der in Essen erarbeiteten Ergebnisse fanden Eingang in Handbücher, Regelwerke und Normen. 1990 und 1998 weilte Schmidt als Gastprofessor an australischen Universitäten. Seine wissenschaftlichen Leistungen wurden durch Berufung auf ehrenamtliche Positionen in vielen nationalen und europäischen Fachgremien gewürdigt, unter anderem in den Deutschen Ausschuss für Stahlbau als stellvertretender Vorsitzender und in die Arbeitsgruppe Schalenstabilität der Europäischen Konvention für Stahlbau als Vorsitzender. Seit 2001 ist Herbert Schmidt im Ruhestand.