

Studien zum Beulverhalten von eng ringversteiften Kreiszyinderschalen unter Axialdruck

Andreas Jäger¹ und Hartmut Pasternak²

¹ EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH, Am Alten Rathaus 5, 34253 Lohfelden, Deutschland
E-Mail: a.jaeger_ehs@t-online.de

² BTU, Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau, Universitätsplatz 3-4, 03044 Cottbus, Deutschland
E-Mail: Hartmut.Pasternak@b-tu.de

ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Vernachlässigung der Ringversteifung beim Axialbeulnachweis versteifter Behälter wird heute oftmals eine unnötig schwere Behälterkonstruktion ausgeführt. Anhand einer Gegenüberstellung aus der Literatur bekannter Experimente an versteiften und unversteiften Kreiszyinderschalen, sowie einer numerischen Parameterstudie an einer sehr schlanken, versteiften Kreiszyinderschale wird das Potential hinsichtlich der Verbesserung Beultragfähigkeit gegenüber unversteiften Schalen gezeigt.

1 Einleitung

Ringversteifte Behälter werden heute typischerweise z.B. in der Biogasindustrie oder der Ölindustrie gebaut. Durch die Verwendung von umlaufenden, schubfest mit der Tankwand verbundenen Stahlprofilen kann eine wirtschaftliche Konstruktion erreicht werden, die auch bei großen Behälterdurchmessern und hohen Wind- und Unterdrucklasten dünne Wandstärken ermöglicht. Aus Unterdruck, Wind und auch Erdbeben entstehen kombinierte Membranspannungsfelder, die neben einer Umfangs- auch eine Meridianbeanspruchung in der Schale bewirken. Bedingt durch den Nachweis gegen axiales Beulen sind häufig größere Wandstärken erforderlich, als es der globale Beulnachweis erfordern würde. Durch die Vernachlässigung der günstigen Wirkung der Ringversteifung auf den Axialbeulnachweis wird der reale Bauteilwiderstand unterschätzt und Behälterkonstruktionen werden unnötig schwer ausgeführt. Baufirmen führen ringversteifte Kreiszyinderschalen in unterschiedlicher Art und Weise aus. Bekannte Behälterbauer sind u.a. Grohnmeyer & Bank, Kremsmüller (Steifen angeschweißt, Abstand abhängig von der Beanspruchung), Lipp (Doppelfalztechnik mit herstellungsbedingt festem Abstand der Steifen von ca. 360 mm, vgl. Abbildung 1 l. und m. oder geschweißt) und Stallkamp (geschraubte Behälter mit angeschraubten leichten Ringsteifen in großen Abständen von ca. 1250 mm, Abbildung 1 r.).

Die Behälter von Lipp und Stallkamp werden üblicherweise mit sehr hohen Schlankheiten im Bereich von $\lambda > 2$ ausgeführt und profitieren in hohem Maße von den Ringsteifen.

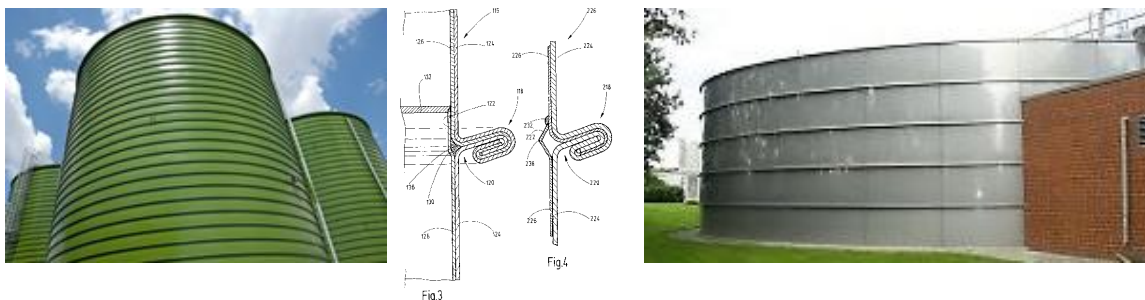


Abbildung 1: Bauweisen: Fa. Lipp (l. [Lipp GmbH, 2010] und m., [Lipp GmbH, 2012]), Fa. Stallkamp (r. [ESTA GmbH])

2 Stand der Technik und Normung

Schon in den frühen 1930er Jahren wurden u.a. durch Flügge [Flügge, 1932] erste Erkenntnisse zum Beulverhalten ausgesteifter Schalen gewonnen. Erst in den 1960er und 1970er Jahren, bedingt durch den Bedarf an hochleistungsfähigen, leichten Tragstrukturen in der Luft- und Raumfahrtindustrie, wie auch im Schiffsbau, wurde die Forschung an versteiften Schalen intensiviert und das Tragverhalten systematisch, vorwiegend experimentell, untersucht.

Einer der aktivsten Wissenschaftler dieser Zeit war Singer, der sich, zusammen mit Forscherkollegen, für viele Publikationen verantwortlich zeichnet (u.a. [Baruch, et al., 1966] und [Singer, 1972]). Nach den 1970er Jahren kam die Forschung an rein ringversteiften Schalen nahezu zum Erliegen, während orthogonal versteifte Schalen an Bedeutung gewannen.

Im Bauwesen wurde das Thema in jüngster Vergangenheit lediglich von zwei Autoren aufgegriffen. Zum einen untersuchte Barlag [Barlag, 2003] das Beulverhalten ringversteifter Schalen im elasto-plastischen Bereich und stellte eine umfangreiche Experimentdatenbank zusammen. Zum anderen beschäftigte sich Wirth in seiner Dissertation [Wirth, 2008] mit der Anwendbarkeit der DIN EN 1993-1-6 [EN 1993-1-6, 2007] u.a. auch auf das Tragverhalten von ringversteiften Behältern am Beispiel von kleinmaßstäblichen Lipp-Silos.

Die Erkenntnisse zu ringversteiften Schalen unter Axialdruck aus den 1960er und 1970er Jahren sind nur in geringem Umfang in die aktuelle Normung des Bauwesens übernommen wurden. U.a. wird mit Klausel 5.2.1 (7) in [EN 1993-1-6, 2010] eine Empfehlung zur Modellierung der Ringsteifen gegeben. Sie sind diskret zu berücksichtigen, wenn deren Abstand größer als das Maß $1.50\sqrt{r}$ ist. Die Hintergründe dieser Regelung werden nicht näher erläutert. Auch die ECCS Recommendations [Schmidt, et al., 2008], geben in diesem Punkt keine vertiefenden Angaben oder Literaturstellen.

Um die verbesserte Tragwirkung ringversteifter Schalen unter Axialdruck auch in vereinfachten Nachweisformaten, wie dem spannungsbasierten Nachweis, in Anspruch nehmen zu können, ist eine vertiefende und weiterführende Forschungsarbeit erforderlich.

3 Ergebnisse der Experimente aus der Literatur

Gegenübergestellt sind in Abbildung 2 die Ergebnisse der Beulexperimente an versteiften Kreiszyinderschalen aus [Barlag, 2003] und an unversteiften Schalen aus [Gettel, 2008]. Eine differenzierte Darstellung verschiedener Versteifungsgrade (Quotient aus Steifenfläche zu Blechstärke und Steifenabstand: $k_{St} = A_{St}/at$) ist für drei Bereiche, schwach versteift mit $k_{St} \leq 0.30$, mittlerer Versteifungsgrad mit $0.30 < k_{St} < 0.50$ und höherem Versteifungsgrad mit $k_{St} \geq 0.50$, angegeben. Tendenziell steigt die aufnehmbare Last bei konstanter Schlankheit mit dem Versteifungsgrad an, wobei der Unterschied zwischen gering versteiften Schalen zu stark versteiften Schalen im hohen Schlankheitsbereich gering ist (z.B. bei $\lambda = 2.4$). Die Streuung der experimentell ermittelten Traglasten steigt mit stärkerem Versteifungsgrad an. Tragfähigkeiten ringversteifter Schalen unter Axialdruck liegen bei gleicher Schlankheit um einen Faktor von 2.5 bis 3 höher, als bei unversteiften Schalen. So liegt, z.B. bei $\lambda = 2.4$ die untere Grenze des Abminderungsbeiwerts unversteifter Schalen $\chi_{exp,oS}$ bei ca. 0.05, während sich bei gering ringversteiften Schalen ein Abminderungsbeiwert $\chi_{exp,mS}$ von ca. 0.11 ($k_{St} = 0.30$) ablesen lässt. Stark ringversteifte Zylinderschalen erreichen bei der gleichen Schlankheit bereits die vierfache Tragfähigkeit mit $\chi_{exp,mS} = 0.21$ ($k_{St} > 0.30$). Die Streuung der im Versuch erreichten Traglasten mit unbekanntem Vorverformungen bedingt zusätzliche Verifikationen.

Eine aus den unteren Grenzwerten der Experimente abgeleitete Beulkurve, die das Potential ringversteifter Behälter beim Axialbeulnachweis andeutet, ist in Abbildung 2 mit Parametern angegeben (gestrichelte Kurve entspricht ca. Herstelltoleranzklasse A unversteifter Schalen).

4 Numerische Studien

Anhand einer am oberen Rand axial belasteten Schale im hohen Schlankheitsbereich sind parametrische Studien durchgeführt worden, um die Ergebnisse numerisch zu erweitern.

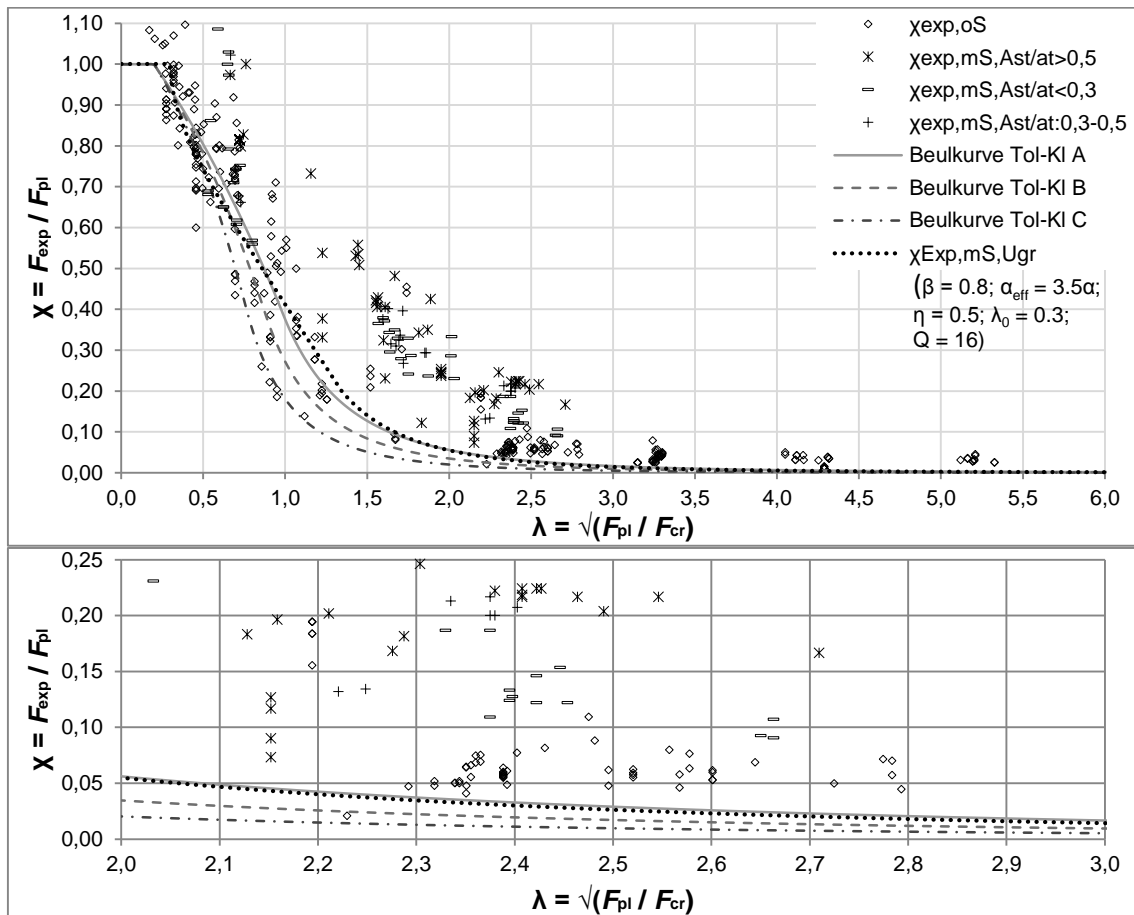


Abbildung 2: Beulexperimente aus [Barlag, 2003], [Gettel, 2008] und Beulkurven für S 355

Grundlage der Analysen bildete eine Berechnung am unversteiften Zylinder. Anschließend wurden am versteiften Zylinder Berechnungen mit variierenden Versteifungsgraden durchgeführt (Variation der Steifendicke oder des a -abstands). Bestimmt wurden die von [EN 1993-1-6, 2010] geforderten Tragfähigkeiten: LBA, MNA, GMNA, GMNIA. Für die GMNIA-Analysen stellten sich entweder skalierte erste Eigenformen oder eigenformaffine Imperfektionen als maßgebend für die Reduktion der vollplastischen Tragfähigkeit heraus. Folgende Parameter wurden verwendet: $R = 1654 \text{ mm}$, $t = 0.6 \text{ mm}$, $R/H = 0.50$, S 355, $\lambda \approx 2.8$, Rechtecksteife, HSK C.

Die Analysen wurden am (aufgrund der Symmetrie gewählten) Viertelzylinder mit dem SOFiSTiK-Modul „ASE“ mittels Newton-Raphson-Iterationsalgorithmus sowohl statisch – nur im Vorbeulbereich möglich, als auch kraftgesteuert transient (Vorbeulbereich und Nachbeulbereich erfassbar bis zur Kollapslast, danach weggesteuerte Berechnung) durchgeführt.

Für unversteifte Schalen (Tabelle 1) ergibt sich eine starke Unterschätzung der tatsächlichen Tragfähigkeit durch spannungsbasierten Nachweis, während die GMNIA-Analyse eine zufriedenstellende Übereinstimmung, bei nur 18% Abweichung zum Experiment, zeigt.

Die Verbesserung der Tragfähigkeit der versteiften Schale (Tabelle 2) stellt sich im Experiment deutlicher dar, als in der numerischen Simulation. Ergibt der Versuch noch eine um 134% höhere Traglast, als bei der unversteiften Schale, kann mit einer numerischen Berechnung lediglich eine Verbesserung um 30% ermittelt werden. Die Abweichung vom Experiment beträgt bei transienter Analyse ca. 113% zur „sicheren Seite“. Berücksichtigte man nur den Vorbeulbereich, würde man die tatsächliche Tragfähigkeit der versteiften Schale auf ca. 23% der wahren Tragfähigkeit einschätzen. Mittels spannungsbasiertem Nachweis würde man die reale Traglast um den Faktor 16 unterschätzen.

Die auf unversteifte Schalen anzuwendende Imperfektionsamplitude liefert zwar für versteifte

Tabelle 1: Ergebnisse am unversteiften Zylinder, Kräfte in kN für Herstelltoleranzklasse (HSK) C

Analyse	GMNA	GMNIA	α_{rech}	χ_{rech}	$\chi_{exp,oS}$	LBA	Spannungsbasierter Nachweis (SB)	
statisch	253	36	0.142	0.016	0.045	287	$\lambda \approx 2.83$	$\alpha_x = 0.054$
transient	316	87	0.275	0.038	$F_{exp,oS}$	MNA	$\chi_x = 0.007$	$F_{SB,C} = 15$
					103	2291		

Tabelle 2: Ergebnisse am versteiften Zylinder $k_{St} = 0.40$, $a_{St}/R = 0.15$, Kräfte in kN für HSK C

Analyse	GMNA	GMNIA	α_{rech}	χ_{rech}	$\chi_{exp,S}$	LBA	$F_{St}/F_{exp,S}$	$F_{St}/F_{SB,C}$
statisch	256	55	0.215	0.023	0.101	293	0.228	3.667
transient	330	113	0.342	0.047	$F_{exp,S}$	MNA	$F_{Tr}/F_{exp,S}$	$F_{Tr}/F_{exp,oS}$
					241	2382	0.469	1.299

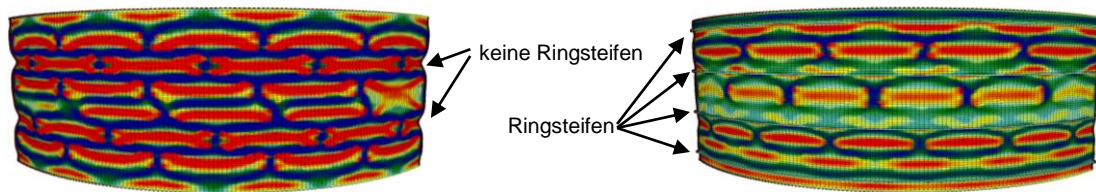


Abbildung 3: Verformung kurz vor Kollaps (l. un- und ringversteifte, r. ringversteifte Schale)

Schalen Ergebnisse „auf der sicheren Seite“, ist aber unwirtschaftlich. Weitere Studien zur Kalibrierung der Imperfektionsamplitude versteifter Schalen sind daher erforderlich, um die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment zu verifizieren. Abweichungen in den Maximallasten ergeben sich u.a. infolge des nur schwer erfassbaren Einflusses der Ringsteifen (Steifigkeit und Streckgrenze der Steifen, Verhärtung und Steifigkeit im Schweißnahtbereich) und der resultierenden Eigenspannungsverteilung im Zylindermantel durch das Schweißen, sowie Formabweichungen vom idealen Zylinder infolge von Schweißverzug).

Die transient ermittelte, gegenüber der statischen Analyse um 105% höhere Tragfähigkeit der ringversteiften Schale, zeigt, dass die Maximallast oberhalb des ersten Instabilitätspunkts liegt. Die Ringsteifen unterstützen das Tragsystem in Form von Diamantbeulen im Nachbeulbereich (Abbildung 3) und erlauben so einen stabilen postkritischen Zustand. Mit ihrer Biege- und MembranstEIFigkeit erhalten die Steifen die Rundheit des Zylinders und stützen das postkritische Tragsystem, bis ein Kollapsmechanismus einsetzt. Unversteiften Zylindern dagegen stehen als stützende Elemente lediglich die Schalenränder zur Verfügung. Ein ringversteiften Schalen gleichartiges postkritisches Tragsystem kann sich nicht einstellen und der nichtversteifte Zylinder versagt bei geringerer Last.

Da mit MNA- und LBA-Analysen keine postkritischen Reserven berücksichtigt werden können, ergeben sich für diese Berechnungstypen nur geringfügige Steigerungen (ca. 4%) durch einer Ringversteifung (infolge verstärkter Ausbildung zweiachsialer Membranspannungsfelder).

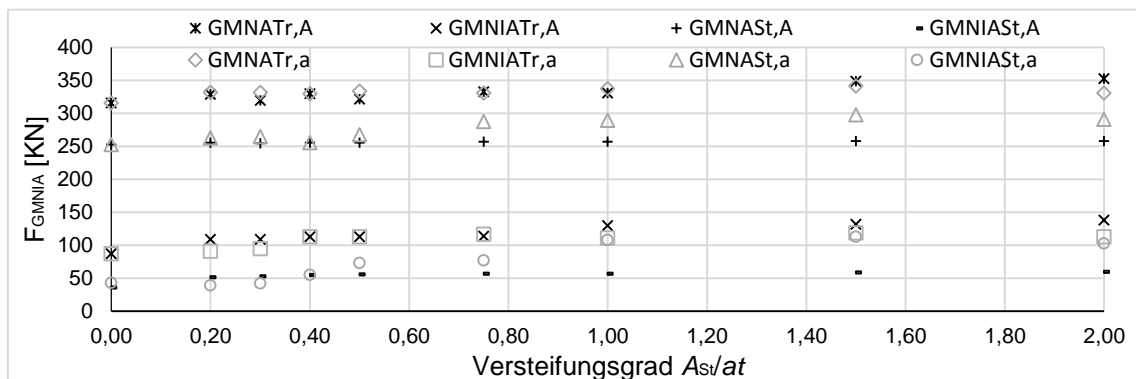


Abbildung 4: Tragfähigkeitsentwicklung der versteiften Schale abhängig vom Versteifungsgrad (a = Veränderung des Steifenabstands, A = Veränderung der Steifenquerschnittsfläche)

Die GMNA-Traglasten zeigen mit ca. 12% Laststeigerung von $k_{St} = 0$ auf $k_{St} = 2$ nur einen geringen Zuwachs infolge Ringversteifung (siehe Abbildung 4). Kräftigere Ringsteifen stellen sich als effektiver, als die Verringerung der Abstände heraus.

Anhand von Abbildung 4 wird ersichtlich, dass sich der prozentual größte Zugewinn an Tragfähigkeit beim Sprung vom Versteifungsgrad $k_{St} = 0$ auf $k_{St} = 0.10$ mit ca. 25% (GMNIA transient) einstellt. Bis hin zu hohen Versteifungsgraden von $k_{St} = 2$ steigt die Grenzlast insgesamt um ca. 59%. Eine Verstärkung des Querschnitts ist dabei maximal 17% effektiver, als die Verringerung des Steifenabstands. Das Vorbeulminimum (Traglast am ersten Instabilitäts-punkt) verschiebt sich bei enger liegenden Steifen hin zum Nachbeulminimum (postkritische Maximallast). Die Imperfektionsempfindlichkeit nimmt ab und die Schale versagt als Einheit von Steifen und Wandung, da sich die Ringbeulen des Zylindermantels zwischen den Steifen mit der Länge $l_{gx} = 1.73\sqrt{rt}$ nicht ausbilden können.

5 Zusammenfassung

Ringversteifte Schalen haben eine hohe Praxisrelevanz; die normative Behandlung hinsichtlich des durch die Steifen positiv beeinflussten Beulverhaltens gegen Axialbeulen wird allerdings nur ungenügend behandelt. Folglich wurden und werden unnötig schwere Behälterbauwerke gebaut. Anhand einer Auswertung der aktuell vorhandenen Kenntnisse aus Experimenten wurde die Grundlage für eine beispielhafte numerische Parameterstudie an einer schlanken Beispielschale abgeleitet und die Erwartungshaltung an diese formuliert. Mit der Simulation konnte die traglaststeigernde Wirkung der Ringsteifen nicht in gleicher Höhe, wie es die Experimente erwarten ließen, ermittelt werden. Ein überaus positiver Einfluss der Ringversteifung auf das Axialbeulverhalten ließ sich jedoch belegen.

6 Literaturverzeichnis

- Barlag S.** Zur Modellbildung für numerische Stabilitätsuntersuchungen elastoplastisch versagender Kreiszyylinder aus Stahl // Dissertation. - Hannover : Universität Hannover, 2003.
- Baruch M., Singer J. und Weller T.** Effect of eccentricity of stiffeners on the general instability of cylindrical shells under torsion // Proceedings of the 8th Israel Annual Conference on Aviation and Astronautics. - [s.l.] : Israel Journal of Technology, 1966. - Bd. 4.
- EN 1993-1-6** Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen; Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007 + AC:2009. - [s.l.] : Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2007.
- EN 1993-1-6** Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen; Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007 + AC:2009. - [s.l.] : Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2010.
- ESTA GmbH** Tank der Firma Stallkamp. - <http://www.stallkamp.de/en/products/tanks/flat-steel-tank> : Erich Stallkamp ESTA GmbH.
- Flügge W.** Die Stabilität der Kreiszyinderschale // Ingenieur Archiv 3, 463-506. - 1932.
- Gettel M.** Ersatzimperfectionen für den numerischen Beulsicherheitsnachweis stählerner Kreiszyinderschalen // Dissertation. - Leipzig : Universität Leipzig, 2008.
- Lipp GmbH** Tank der Firma Lipp. - http://www.lipp-system.de/19-ligavator_betavator.html : Lipp GmbH, 2010.
- Lipp GmbH** Zeichnung zum Patentantrag. - <http://www.google.com/patents/DE202012009932U1?cl=de> : Lipp GmbH, 2012.
- Schmidt H. and Rotter J.M.** Buckling of Steel Shells, European Design Recommendations, 5th Edition [Book]. - Multicom Lda, Mem Martins, Portugal : ECCS, 2008.
- Singer J.** Buckling of integrally stiffened cylindrical shells - a review of experiment and theory // Contributions to the Theory of Aircraft Structures. - Delft : Delft University Press, 1972.
- Wirth S.** Beulsicherheitsnachweise für schalenförmige Bauteile nach EN 1993-1-6: Kritische Analyse der praktischen Anwendbarkeit anhand zweier Fallstudien mit experimentellem Hintergrund // Dissertation. - Universität Duisburg-Essen : Shaker Verlag, 2008.