

**Beulsicherheitsnachweise für schalenförmige Bauteile
nach EN 1993-1-6:
Kritische Analyse der praktischen Anwendbarkeit
anhand zweier Fallstudien
mit experimentellem Hintergrund**

Vom Fachbereich Bauwissenschaften der Fakultät Ingenieurwissenschaften
der Universitäts Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stefan Wirth

Hauptberichter: Univ. Prof. Dr.-Ing. Herbert Schmidt
Mitberichter: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner
Eingereicht am: 27. März 2008
Mündliche Prüfung: 09. Mai 2008

Fachbereich Bauwissenschaften der Fakultät Ingenieurwissenschaften
Institut für Metall- und Leichtbau
Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Schriftenreihe Institut für Metall- und Leichtbau
Universität Duisburg-Essen
herausgegeben von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Band 1

Stefan Wirth

**Beulsicherheitsnachweise für
schalenförmige Bauteile nach EN 1993-1-6**

**Kritische Analyse der praktischen Anwendbarkeit anhand
zweier Fallstudien mit experimentellem Hintergrund**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7717-8

ISSN 1867-6782

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für Kati

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen (ehemals Fachgebiet Stahlbau).

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Schmidt. Für sein reges Interesse, seine zahlreichen Anregungen und Ratschläge und für seine ständige Diskussionsbereitschaft danke ich ihm ebenso herzlich wie für die Übernahme des Hauptreferates.

Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner vom Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens sowie für ihre wertvollen Hinweise.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hanshermann Prediger für sein mir entgegengebrachtes Vertrauen. Gerne erinnere ich mich an unsere gemeinsame Zeit am Lehrstuhl zurück.

Schließlich danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Metall- und Leichtbau für die freundschaftliche Atmosphäre und die gute Zusammenarbeit. Besonders danke ich an dieser Stelle meinen ehemaligen Kollegen und Freunden Herrn Dr.-Ing. Sammy Zein El Dine und Herrn Dipl.-Ing. Markus Schiborr.

Meiner Lebensgefährtin Frau Katja Becker danke ich herzlich für die Unterstützung und Geduld während meiner Promotion. Abschließend, wobei die Reihenfolge keine Wertung darstellt, bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich auf vielerlei Weise unterstützt haben.

Remscheid, im Juli 2008

Stefan Wirth

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zusammenfassender Überblick.....	3
1.3	Zusammenstellung von Abkürzungen und Formelzeichen.....	5
2	Historische Entwicklung der Regelwerke zur Schalenstabilität	11
2.1	Einführung in die Stabilität der axial gedrückten Kreiszyinderschale.....	11
2.1.1	Ideales Beulverhalten der perfekten Kreiszyinderschale.....	11
2.1.2	Nachbeulverhalten der perfekten Kreiszyinderschale.....	15
2.1.3	Einfluss allgemeiner Beulrandbedingungen.....	17
2.1.4	Imperfekte Kreiszyinderschalen.....	19
2.2	Deutsche Regelwerke zur Schalenstabilität.....	27
2.2.1	DAST-Richtlinie 013.....	29
2.2.2	DIN 18800-4.....	31
2.2.3	DAST-Richtlinie 017 (Entwurf).....	34
2.3	Ausgewählte internationale Regelwerke zur Schalenstabilität.....	40
2.3.1	ECCS-Recommendations.....	40
2.3.2	Eurocodes.....	41
3	Beulsicherheitsnachweise schalenförmiger Stahlbauten nach EN 1993-1-6	43
3.1	Allgemeines.....	43
3.2	Berechnungskonzepte für Schalenberechnungen.....	44
3.3	Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis.....	47
3.4	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis.....	53
3.4.1	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- und LBA-Berechnung.....	53
3.4.2	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA-Berechnung.....	58
3.5	Beulrelevante geometrische Toleranzen, Qualitätsklassen der Herstellgenauigkeit.....	68
3.5.1	Allgemeines.....	68
3.5.2	Toleranzen für Unrundheit.....	69
3.5.3	Toleranz für Vorverformungen (Vorbeulen) in der Schalenwand.....	70

4 Numerische Schalenberechnungen – Vorüberlegungen und theoretische Grundlagen	73
4.1 Allgemeines	73
4.2 Modellbildung bei numerischen Simulationen	74
4.2.1 Verwendete Elemente	74
4.2.2 Diskretisierung	76
4.2.3 Werkstoffgesetz	77
4.3 Unterschiede im Stabilitätsversagen	79
4.3.1 Stabilitätsversagen infolge Durchschlagen	80
4.3.2 Stabilitätsversagen infolge Gleichgewichtsverzweigung	81
4.4 Numerische Berechnungsverfahren	83
4.4.1 Lineare Analysen	83
4.4.2 Nichtlineare Analysen	85
4.5 Aufspüren von Verzweigungspunkten	89
4.6 Verifizierung des numerischen Werkzeugs anhand eines Bench-Mark-Tests 91	
4.6.1 Bench-Mark-Beulversuch	92
4.6.2 Numerische Bench-Mark-Untersuchungen	93
5 Fallstudie I: Kreiszyinderschalen mit exzentrisch rand- und längsversteiften Mantelöffnungen unter Axialdruck	97
5.1 Allgemeines	97
5.2 Experimentelle Untersuchungen	100
5.2.1 Versuchsprogramm	101
5.2.2 Versuchskörper	103
5.2.3 Werkstoff	105
5.2.4 Geometrische Imperfektionen	107
5.2.5 Versuchsaufbau, Messprogramm	117
5.2.6 Versuchsdurchführung	120
5.2.7 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse	121
5.2.8 Versuche im Einzelnen	126
5.2.9 Diskussion und Wertung der Versuchsergebnisse	134
5.2.10 Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Beanspruchbarkeiten	139
5.3 Numerische Vergleichsanalysen zu den Traglastversuchen	144
5.3.1 Baustatische Modellbildung/Finite-Elemente-Modell	144
5.3.2 Untersuchungen zur Konvergenz	146
5.3.3 Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen	147

5.4 Weiterführende numerische Untersuchungen zur Versteifung von Mantelöffnungen.....	152
5.4.1 Einfluss des Verbindens der Längssteifen auf das Beultragverhalten	152
5.4.2 Einfluss einer vollständigen Ringversteifung auf das Beultragverhalten	155
5.5 Anwendung der EN-Formate für den Beulsicherheitsnachweis auf die Modellschalen	157
5.5.1 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	157
5.5.2 Numerisch gestützter MNA-LBA-Beulsicherheitsnachweis	163
5.5.3 Numerisch gestützter GMNIA-Beulsicherheitsnachweis	170
5.5.4 Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse der Beulsicherheitsnachweise nach EN-1993-1-6	179
6 Fallstudie II: Spiralgefaltete Stahlblechsilos unter Axialdruck.....	181
6.1 Allgemeines	181
6.2 Experimentelle Untersuchungen	183
6.2.1 Versuchsprogramm	184
6.2.2 Versuchskörper	185
6.2.3 Geometrische Imperfektionen	189
6.2.4 Werkstoff.....	194
6.2.5 Versuchsaufbau	195
6.2.6 Versuchsergebnisse.....	199
6.3 Numerische Vergleichsanalysen zu den Traglastversuchen	205
6.3.1 Baustatische Modellbildung / Finite-Elemente-Modell.....	205
6.3.2 Untersuchungen zur Konvergenz.....	208
6.3.3 Validierung des FE-Modells anhand der experimentellen Ergebnisse	209
6.4 Anwendung der EN-Formate für den Beulsicherheitsnachweis auf die unversteiften Modellsilos	210
6.4.1 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	210
6.4.2 Numerisch gestützter MNA-LBA-Beulsicherheitsnachweis	212
6.4.3 Numerisch gestützter GMNIA-Beulsicherheitsnachweis	215
6.4.4 Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse der Beulsicherheitsnachweise nach EN 1993-1-6 – unversteifte Silos ...	225
6.5 Anwendung der EN-Formate für den Beulsicherheitsnachweis auf die versteiften Modellsilos	227
6.5.1 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	227
6.5.2 Numerisch gestützter MNA-LBA-Beulsicherheitsnachweis	231

6.5.3	Numerisch gestützter GMNIA-Beulsicherheitsnachweis	238
6.5.4	Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse der Beulsicherheitsnachweise nach EN 1993-1-6 – längsversteifte Silos	252
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	255
7.1	Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen.....	255
7.2	Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen	258
8	Literaturverzeichnis	261
Anlagen	273

Anlagenverzeichnis

Anlagen zu Kapitel 2 – Regelwerke zur Schalenstabilität

Anlage 2.1: Bemessungsformeln für axial gedrückte Kreiszyinderschalen
oben: nach der DAST-Richtlinie 013, unten: nach DIN 18800 Teil 4

Anlagen zu Kapitel 5 – Fallstudie I

Anlage 5.1: Schneideskizzen REP1/REP2 und REP3

Anlage 5.2: Schneideskizzen LEP1 und LEP2

Anlage 5.3: Schneideskizzen LZP

Anlage 5.4: Zugversuche Blechtafeln REP1/REP2, REP3 und LEP1

Anlage 5.5: Zugversuche Blechtafeln LEP2, LZP und Steifenmaterial

Anlage 5.6: Materialkennwerte der Kreiszyinderschalen und der Steifen

Anlage 5.7: Bereinigte geometrische Imperfektionen der Versuchskörper;
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 10-fach überhöht
oben: REP1, unten: REP2

Anlage 5.8: Bereinigte geometrische Imperfektionen der Versuchskörper;
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 10-fach überhöht
oben: REP3, unten: LEP1

Anlage 5.9: Bereinigte geometrische Imperfektionen der Versuchskörper;
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 10-fach überhöht
oben: LEP2, unten: LZP

Anlage 5.10: Messstellenpläne, oben: REP1, unten: REP2

Anlage 5.11: Messstellenpläne, oben: REP3, unten: LEP1

Anlage 5.12: Messstellenpläne, oben: LEP2, unten: LZP

Anlage 5.13: Versuchsergebnisse REP1

Anlage 5.14: Versuchsergebnisse REP1 - Steifendehnungen

Anlage 5.15: Versuchsergebnisse REP2

Anlage 5.16: Versuchsergebnisse REP2 - Steifendehnungen

- Anlage 5.17:** Versuchsergebnisse REP3
- Anlage 5.18:** Versuchsergebnisse REP3 - Steifendehnungen
- Anlage 5.19:** Versuchsergebnisse LEP1
- Anlage 5.20:** Versuchsergebnisse LEP1 - Steifendehnungen
- Anlage 5.21:** Versuchsergebnisse LEP2
- Anlage 5.22:** Versuchsergebnisse LEP2 - Steifendehnungen
- Anlage 5.23:** Versuchsergebnisse LZP
- Anlage 5.24:** Versuchsergebnisse LZP - Steifendehnungen
- Anlage 5.25:** Experimentelle Nachbeulverformungsplots: REP1 und REP2
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.26:** Experimentelle Nachbeulverformungsplots: REP3 und LEP1
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.27:** Experimentelle Nachbeulverformungsplots: LEP2 und LZP
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.28:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: REP1
Teil 1, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.29:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: REP1
Teil 2, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.30:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: REP2
Teil 1, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.31:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: REP2
Teil 2, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.32:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: REP3
Teil 1, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.33:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: REP3
Teil 2, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.34:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: LEP1
Teil 1, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.35:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: LEP1
Teil 2, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.36:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: LEP2
Teil 1, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht

- Anlage 5.37:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: LEP2
Teil 2, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.38:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: LZP
Teil 1, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.39:** Numerische Verformungen bei perfekter Ausgangsgeometrie: LZP
Teil 2, Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 20-fach überhöht
- Anlage 5.40:** Numerische GMNIA-Verformungen im Nachbeulbereich; REP1
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.41:** Numerische GMNIA-Verformungen im Nachbeulbereich; REP2
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.42:** Numerische GMNIA-Verformungen im Nachbeulbereich; REP3
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.43:** Numerische GMNIA-Verformungen im Nachbeulbereich; LEP1
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.44:** Numerische GMNIA-Verformungen im Nachbeulbereich; LEP2
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht
- Anlage 5.45:** Numerische GMNIA-Verformungen im Nachbeulbereich; LZP
Darstellung der abgewickelten Mantelfläche; 5-fach überhöht

Anlagen zu Kapitel 6 – Fallstudie II

- Anlage 6.1:** Konstruktive Ausbildung der Modellsilos I und II ohne Längssteifen
- Anlage 6.2:** Konstruktive Ausbildung der Modellsilos III und IV mit Längssteifen
- Anlage 6.3:** Konstruktive Ausbildung der Modellsilos III und IV (Detail I)
- Anlage 6.4:** Fotos Modellsilos I und II
- Anlage 6.5:** Fotos Modellsilos III und IV
- Anlage 6.6:** Beispiel für Messprotokoll: Zylindergeometrie (oberer Rand)
- Anlage 6.7:** Zur Ausmessung der Modellsilos:
oben: Ausmessen der Profilhöhen h_f der Falze
unten: Messschiene für Aufnahme der Meridianprofile vor dem Versuch (Meridianimperfectionen) und während des Versuches (Beulverformungen)
- Anlage 6.8:** Beispiel für Messprotokoll: Meridiangeometrie

- Anlage 6.9:** Geometrische Imperfektionen der Messmeridiane – SILO I
- Anlage 6.10:** Geometrische Imperfektionen der Messmeridiane – SILO II
- Anlage 6.11:** Werkstoffkennwerte aus Zug- und Druckproben der Modellsilos
- Anlage 6.12:** Zum Versuchsaufbau:
oben: Messstativ für vertikale Verschiebungsmessung (außen)
unten: ungünstigste Stelle mit maximaler Entfernung zwischen Siloblech und unterem Ringträger
- Anlage 6.13:** Last-Verkürzung-Kurven; oben SILO I, unten SILO II
- Anlage 6.14:** Last-Verkürzung-Kurven; oben SILO III, unten SILO IV
- Anlage 6.15:** Last-Dehnung-Kurven; Membrandehnungen ε_{xM} SILO I - oben
- Anlage 6.16:** Last-Dehnung-Kurven; Membrandehnungen ε_{xM} SILO I - unten
- Anlage 6.17:** Last-Dehnung-Kurven; Membrandehnungen ε_{xM} SILO II - oben
- Anlage 6.18:** Last-Dehnung-Kurven; Membrandehnungen ε_{xM} SILO II - unten
- Anlage 6.19:** Last-Dehnung-Kurven; Steifenoberflächendehnungen ε_x
SILO III - oben
- Anlage 6.20:** Last-Dehnung-Kurven; Steifenoberflächendehnungen ε_x
SILO IV - oben
- Anlage 6.21:** SILO I: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 1
- Anlage 6.22:** SILO I: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 4
- Anlage 6.23:** SILO II: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 6
- Anlage 6.24:** SILO II: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 26
- Anlage 6.25:** SILO III: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 32 (Wandblech zwischen Längssteifen)
- Anlage 6.26:** SILO III: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 30 (Längssteife)
- Anlage 6.27:** SILO III: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 34 (Längssteife)
- Anlage 6.28:** SILO III: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians,
Meridian 38 (Längssteife)
- Anlage 6.29:** SILO III: Längssteifen-Messmeridiane vor und nach dem Versuch

-
- Anlage 6.30:** SILO IV: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians, Meridian 24 (Längssteife)
- Anlage 6.31:** SILO IV: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians, Meridian 14 (Längssteife)
- Anlage 6.32:** SILO IV: Typisches Beispiel für Profilentwicklung eines Messmeridians, Meridian 12 (Längssteife)
- Anlage 6.33:** SILO IV: Längssteifen-Messmeridiane vor und nach dem Versuch
- Anlage 6.34:** Modellsilo I nach dem Versuch: Außenansichten
- Anlage 6.35:** Modellsilo I nach dem Versuch: Innenansichten
- Anlage 6.36:** Modellsilo II nach dem Versuch: Außenansichten
- Anlage 6.37:** Modellsilo II nach dem Versuch: Innenansichten
- Anlage 6.38:** Modellsilo III; oben: während des Versuchs, unten: nach dem Versuch
- Anlage 6.39:** Modellsilo III nach dem Versuch: Außenansichten
- Anlage 6.40:** Modellsilo III nach dem Versuch: Innenansichten
- Anlage 6.41:** Modellsilo IV nach dem Versuch: Außenansichten
- Anlage 6.42:** Modellsilo IV nach dem Versuch: Innenansichten (Längssteife 18 für Materialproben entfernt)
- Anlage 6.43:** Modellsilo IV nach dem Versuch: Innenansichten - Details

