

**Tragverhalten
einzelgestützter zylindrischer
Silostrukturen mit Auslauftrichter**

von

Holger Schroth

Bericht Nr. 10 (2005)

Universität Leipzig
Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. R. Thiele
Prof. Dr.-Ing. M. Kaliske

Von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität
Leipzig genehmigte Dissertation zur Erlangung des
akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Schneider
Prof. Dr.-Ing. R. Thiele
Prof. Dr.-Ing. W. Graße

Tag der Verleihung: 12. 10. 2005

Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der
Tragstrukturen

Band 10

Holger Schroth

**Tragverhalten einzelgestützter zylindrischer
Silostrukturen mit Auslaufrichter**

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4794-7

ISSN 1615-8423

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Kurzfassung

Der Silo – und besonders der aufgeständerte stählerne Rundsilo mit Auslaufrichter gilt durch die vielen Vorzüge des Trag- und Strukturelementes Schale als prädestiniert für die Lagerung kleiner und mittlerer Schüttgutmengen, wie sie z.B. in der Bau- und Landwirtschaft vorkommen. Trotz der weiten Verbreitung und der daraus resultierenden großen Anstrengungen in Richtung der Formulierung sicherer Bemessungsnormen hat es sich als schwierig herausgestellt, diese günstigen Voraussetzungen – und insbesondere die bekannt hohe Trageffizienz von Schalen – durch gesicherte statische Berechnungen nachzuweisen. Viele Schadensfälle einerseits und starke Überbemessung andererseits waren die Folge.

Die vorliegende Dissertation widmet sich daher diesem seit mehreren Jahrzehnten aktuellen Thema. Neben einer umfangreichen Studie zur Wirkungsweise der Zylinderschale im Gesamtverbund des mit einer Haupttringsteife im Verschneidungsbereich versehenen Silos umfasst die Arbeit zudem ein Bemessungskonzept auf der Grundlage ursachenreiner Abminderungsfaktoren.

Die Gesamtarbeit untergliedert sich in drei Hauptteile: einen auf- und vorbereitenden Teil, einen ergebnisbeschreibenden Teil und einen ergebnisumsetzenden Teil. Im abschließenden Kapitel 7 werden offen gebliebene Fragen dieser Arbeit verdeutlicht, indem weitere signifikante Einflüsse durch Detaillösungen aus der Fertigungspraxis aufgezeigt und z.T. Lösungsvorschläge auf der Grundlage des vorgeschriebenen Bemessungskonzeptes unterbreitet werden.

Im ersten Teil wird auf die Problematik der arbeitsbezeichnenden Struktur vorbereitet. Neben der Aufbereitung des aktuellen Wissensstandes findet sich auch eine knappe Übersicht der theoretischen Grundlagen numerischer Strukturanalysen.

Der zweite Teil der Arbeit dient der Darstellung der numerisch ermittelten Ergebnisse. Da der einzelgestützte Silo durch eine ungewöhnlich hohe Sensitivität gegenüber jeglicher Art nichtlinearer Einflüsse charakterisiert ist, verzichtet die Arbeit auf lineare Beulwertuntersuchungen. Begleitende Beulwertuntersuchungen nichtlinearer Rechnungen waren aus Gründen des numerischen Aufwandes und der hardwareseitigen Restriktionen nicht möglich. Darüber hinaus ist der dabei zu erwartende zusätzliche Informationsgewinn als gering einzuschätzen. Einleitend werden in diesem Abschnitt die Spannungs- und Verformungszustände auf der Grundlage rein linear geführter Analysen der perfekten Struktur untersucht (LA). Anschließend werden diese Untersuchungen um geometrisch und materiell nicht-lineares Verhalten erweitert (GMNA). Die Analyse der Sensitivität gegenüber geometrischen Imperfektionen (GMNIA) schließt diesen mittleren Abschnitt ab.

Im dritten Teil werden die Ergebnisse in einem realitätsnahen Bemessungskonzept umgesetzt, welches ohne numerische Unterstützung handhabbar ist. Dabei werden auf der Grundlage der linearen Rechnungen Ansätze für Lastverteilung und Störeinflüsse entwickelt, welche einzeln bei der Ermittlung des Grenzwiderstandes Beachtung finden. Ebenfalls separat werden die Einflüsse der Imperfektionssensitivität einbezogen. Das vorgestellte Bemessungskonzept wird abschließend an drei Beispielgeometrien dargestellt.

Abstract

Many advantages of thin walled metal shells makes the silo-structure one of the best solutions to store medium and large amounts of bulk material. This becomes even higher validity for the special form of cylindrical column supported silos with a cone shell as the feeding hopper. Therefore the silo is well spread in industries like civil engineering or agriculture. Accounting to this spreading the request of bringing the good properties of shells to save but effective design rules force up rapidly during the last 15 years. In spite of this pressure the solution of this task is problematic and still not be solved yet. In consequence, in the past there was many cases of damage as well as highly over-designed silo structures.

This dissertation investigate this topic actual since several decades. Besides a sweeping study to the carrying methods of the cylinder shell within the whole silo structure in the end one main result of this thesis is the formulation of a design concept based on causal separated knock down factors. The research is confined to silos with only one single ring stiffener at the cylinder-cone-transition.

The whole work is divided in three main parts, a preparing and improving part, a solution and result describing part and a result employing part. Besides the three main parts there is a small finishing part with focus on unsolved questions and a discussion to special designs in coherence to the presented design rules.

Within the first part the researched silo structure will be described in detail and discussed in context to the actual knowledge. Furthermore a small abstract of the theoretical basics of numerical analysis is given.

The second part presents the results of a large number of numerical analysis. Because of natural sensitivity of thin walled shells against any kind of nonlinear influences, the work cuts out computing buckling-values based on both linear properties and linear numerical formulation. Moreover, gradually buckling-value analysis within nonlinear analysis are cut out as well because of numerical expense and the limitations in hardware capacity. Furthermore the extra knowledge expected from these analysis are quite low. The first paragraph of this part presents the linear calculated (LA) stress and deflection states in a wide parametric range of the silo structure. As the next step these analysis are promoted by both geometrical and material nonlinearity (GMNA). The study of sensitivity against geometrical imperfections (GMNIA) closes these middle part.

In the third main part the results are used to formulize a popular design concept, which can be handled without powerful hard- and software. The statements to deflections of disturbance are described on base of linear calculated results (LA). The sectional loading are calculated on the base of GMN-Analysis. Combining these states the resistance of the supported cylinder shell section against destabilisations can be developed step by step. At the end this resistance has to be knock down according to sensitivity against imperfections. Finally the presented design concept are demonstrated with three silo structures.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in weiten Teilen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen an der Universität Leipzig. Nach einem zweijährigen Exkurs in die dünnwandigen Strukturen der Automobilindustrie gelangte sie schließlich in den gehobenen Stand einer Dissertationsschrift.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Thiele, der mir nach meinem Studium die sofortige Aufnahme der Forschungstätigkeit zu einem Thema ermöglichte, welches in den folgenden Jahren bis heute meine wissenschaftliche Neugier fesselt. Er verstand es stets, mein Wirken auf den Kern zu fokussieren und mich in zweckmäßigen wissenschaftlichen Bahnen zu leiten. Mit seiner steten Unterstützung, zahlreichen Anregungen und impulsgebenden Gesprächen hat er maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

In gleicher Weise danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Schneider. Er hat mich vom ersten Semester an über meine ganze akademische Laufbahn begleitet und ist so zu einer steten Größe in meinem akademischen Umfeld geworden. Mit seiner unermüdlichen Eifer bei der wissenschaftlichen Erschließung neuer Zusammenhänge hat er mich immer wieder aufs Neue in den Strudel der Faszination Wissenschaft mitgerissen. Gerne erinnere ich mich an tiefgründige und fruchtbare Diskussionen in den Räumlichkeiten des Institutes. Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Schneider für die tatkräftige Unterstützung im gesamten Verlauf des Promotionsverfahrens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Graße danke ich für die uneingeschränkte Übernahme eines Gutachtens zu meiner Dissertationsschrift.

Weiterhin danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Statik und Dynamik der Tragstrukturen für ihre tatkräftige Unterstützung und anregende Gespräche, aus denen nicht selten Ideen für neue Ansätze hervorgingen.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern. Nur durch ihren kontinuierlichen Rückhalt war es mir möglich, mich ganz der wissenschaftlichen Aufgabe zu stellen und diese durch alle Widrigkeiten hindurch zum Erfolg zu führen.

Mein ganz privater Dank gilt meiner Lebensgefährtin Heike Daub. Sie hat mir gezeigt, wie wichtig es ist, begonnene Aufgaben zu beenden, auch wenn dies nicht immer auf direktem Weg möglich ist. Mit ihrem natürlichen Initiativdrang hat sie mich bis zum letzten Tastendruck immer wieder aufs Neue ermutigt, das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren und es konsequent und mit Nachdruck zu verwirklichen.

Holger Schroth

München, 14. November 2005

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	III
Untersuchtes Parameterspektrum	VIII
Darstellungsformate von Last-Verformungs-Pfaden	VIII
Spezifische Begriffe	IX
1 Einführung	1
1.1 Einleitung und Problemstellung	1
1.2 Zielstellung und Umfang der Arbeit	2
1.2.1 Zielstellung	2
1.2.2 Umfang der Arbeit	3
1.3 Stand der Forschung	4
1.3.1 Entwicklungen in der Schalenstatik	4
1.3.2 Zylinderschale unter axialsymmetrischer Beanspruchung	5
1.3.3 Zusammengesetzte Schalenstrukturen	5
1.3.4 Diskret gestützte Schalenstrukturen	6
1.3.5 Imperfektionsempfindlichkeit	7
1.3.6 Belastungskonzept des zylindrischen Silos	9
1.4 Normen und Richtlinien	10
1.4.1 Entwicklung und Gegenwart	10
1.4.2 Anwendbarkeit der vorhandenen Normen auf einzelgestützte Silos	12
1.4.3 Ausblick auf die EC-Norm	13
2 Strukturmechanische Modellbildung und Lösungsverfahren	17
2.1 Allgemeines	17
2.2 Struktur- und Lastannahmen	17
2.2.1 Strukturelle Modellbildung	17
2.2.2 Lastannahmen	18
2.3 Tragverhalten	19
2.3.1 Grundlegende Aspekte der linearen und nichtlinearen Schalenstatik	19
2.3.2 Nichtlineare Einflüsse und Imperfektionen	21
2.3.3 Tragwirkung des einzelgestützten Silos	24
2.4 Finite-Element-Methode (FEM)	29
2.4.1 Allgemeines	29
2.4.2 Grundgleichungen der FEM	30
2.4.3 Lösungsverfahren der nichtlinearen FEM	31
2.4.4 FE-Modell	33
3 Lineare Analyse der perfekten Tragstruktur	34
3.1 Vorbemerkung	34
3.2 Beanspruchung der Silostruktur	34
3.2.1 Allgemeines	34
3.2.2 Membran- und Schubspannungsbeanspruchung	35
3.2.3 Biegebeanspruchung	39
3.2.4 Verformung	42
3.3 Parameterstudie zur Auflagerbeanspruchung	44
3.3.1 Parameterraster	44
3.3.2 Auflagerkräfte und -spannungen	44
3.3.3 Radiale Verformungen am Auflager	51

4	Vollständig nichtlineare Analyse der perfekten Tragstruktur	57
4.1	Einfluss der Geometrieparameter auf den Versagensprozess	57
4.1.1	Einleitung	57
4.1.2	Einfluss der Dünnwandigkeit r/t	60
4.1.3	Einfluss der Neigung des Auslaufrichters α_K	62
4.1.4	Einfluss der Wandstärke der Ringsteife t_{RS}	64
4.1.5	Einfluss der Ringsteifenbreite b_S	66
4.1.6	Einfluss der Auflagerbreite b_{St}	68
4.1.7	Einfluss der Stützenanzahl n_{St}	70
4.1.8	Einfluss der Fließgrenze f_{yk}	72
4.2	Parameterstudien	74
4.2.1	Bezogene Lastfaktoren	74
4.2.2	Traglast bei variabler Auflagerbreite	77
4.2.3	Traglast bei variabler Dünnwandigkeit der Zylinderschale	78
4.3	Abgrenzung der Versagensarten „Elastisch“ und „Plastisch“	79
5	Vollständig nichtlineare Analyse der imperfekten Tragstruktur	82
5.1	Allgemeines	82
5.2	Imperfektionen bei dickwandigen Schalen ($r/t = 200$)	84
5.3	Imperfektionen bei mittlerer Schalensteifigkeit ($r/t = 400$)	90
5.4	Imperfektionen bei dünnwandigen Schalen ($r/t = 800$)	95
5.5	Zusammenfassung und Ergebnisdarstellung	101
6	Bemessungskonzept	103
6.1	Einleitung	103
6.2	Problembeschreibung	103
6.3	Bemessungskonzept	104
6.4	Anwendungsgrenzen	108
6.5	Bemessungsbeispiele	109
7	Konsequenzen für die weitere Forschung	112
7.1	Grundlagen	112
7.2	Konstruktive Details	112
8	Zusammenfassung	114
9	Literatur	115
	Anlagen	120