

Alexander Bruns

Numerische Untersuchung zum
Tragverhalten von dünnwandigen,
zylindrischen, zellulären Strukturen unter
axialer Belastung

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2004 Diplom.de
ISBN: 9783832489854

Alexander Bruns

**Numerische Untersuchung zum Tragverhalten von
dünnwandigen, zylindrischen, zellulären Strukturen
unter axialer Belastung**

Alexander Bruns

Numerische Untersuchung zum Tragverhalten von dünnwandigen, zylindrischen, zellulären Strukturen unter axialer Belastung

Diplomarbeit
Universität Dortmund
Fachbereich Bauwesen
Institut für Baumechanik-Statik
Abgabe Dezember 2004



Diplomica GmbH _____
Hermannstal 119k _____
22119 Hamburg _____

Fon: 040 / 655 99 20 _____
Fax: 040 / 655 99 222 _____

agentur@diplom.de _____
www.diplom.de _____

ID 8985

Bruns, Alexander: Numerische Untersuchung zum Tragverhalten von dünnwandigen, zylindrischen, zellulären Strukturen unter axialer Belastung

Hamburg: Diplomica GmbH, 2005

Zugl.: Universität Dortmund, Diplomarbeit, 2004

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2005

Printed in Germany

Autorenprofil

Name: Alexander Johannes Theodor Bruns

Titel: Dipl.-Ing.

Geb.-Datum: 9. Februar 1976

Anschrift: Steffensweg 177, 28217 Bremen

Telefon: 0421-3381131

Handy: 0179-2182005

E-Mail: kontakt@alexander-bruns.de

Bildungsgang: Abschluss 01.12.2004: Diplom, Bauingenieurwesen, Note 2,0
05.04.2000, Vordiplom, Bauingenieurwesen, Note 3,0
13.06.1995, Allgemeine Hochschulreife (Abitur), Note 2,7

01.04.2004 - 01.12.2004 Diplomarbeit am Lehrstuhl Baumechanik-Statik der Universität Dortmund Thema Ultraleichtbau, FEM-Analyse von Zylinderschalen, Untersuchung der Imperfektionsempfindlichkeit und Verzweigungslastberechnungen, Note 1,0

01.04.2000 - 31.03.2005 Studium Bauingenieurwesen an der Universität Dortmund, Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau (B2), Projekte: Feuerwache in Bochum und ICE Bahnhofshalle in Dortmund im Rahmen des Dortmunder Modell Bauwesen, Hauptdiplom, Note 2,0

01.10.1995 - 31.03.2000 Studium Bauingenieurwesen an der Universität Dortmund, Projekt: Reihenhaus im Rahmen des Dortmunder Modell Bauwesen, Vordiplom, Note 3,0

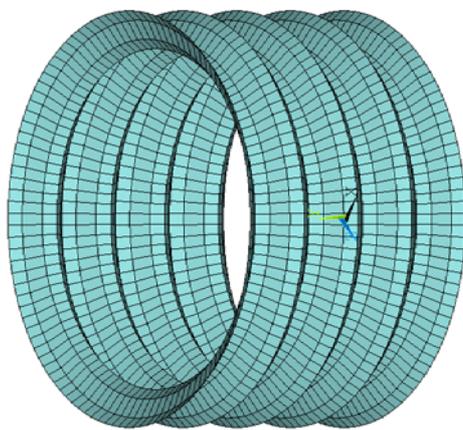
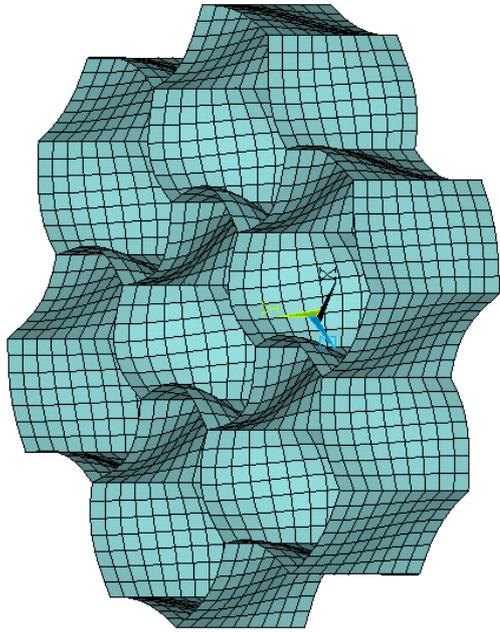
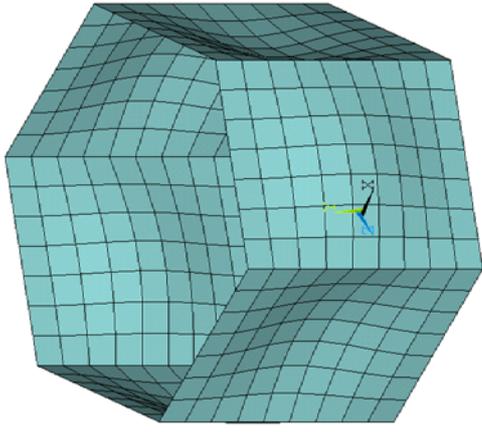
01.08.1986 - 13.06.1995 Städt. Franz-Stock-Gymnasium, Arnsberg, Abiturfächer Mathematik (LK), Physik (LK), Englisch, Sozialwissenschaften, Abitur, Note 2,7

23.01.1984 - 30.06.1986 Städt. Kath. Bekenntnisgrundschule „St. Michael“, Arnsberg

01.08.1982 - 20.01.1984 Städt. Gemeinschaftsgrundschule „Mühlenberg“, Arnsberg

Kenntnisse: Intensive und detaillierte EDV-Kenntnisse, 5 Jahre Berufserfahrung als Administrator, Umgang mit Linux, Unix und Windows-Server (Mail-, File-, Print-, Datenbank-, Web-, Fax- und Monitoring Server), HTML, Perl, Bash als Programmiersprachen

1 Jahr Erfahrung mit FEM und Anwendung mit ANSYS



Vorwort

Die vorliegende Arbeit basiert auf den Theorien zum Tragverhalten von dünnwandigen Schalen und auf numerischen Untersuchungen mit ANSYS. Sie stellt die Abschlussarbeit meines Studiums des Bauingenieurwesens an der Universität Dortmund, Studienrichtung B2 Konstruktiver Ingenieurbau, dar.

Den Berechnungen stand die Einarbeitung in die Nichtlinearität des Tragverhaltens von dünnwandigen Strukturen und die Beschäftigung mit FEM-Lösungswegen für nichtlineare Probleme voran. In diese Arbeit sind neben der Literaturstudie insgesamt 6.050.631 Sekunden¹ ANSYS-Berechnungszeit in 32.562 Berechnungen geflossen. Dabei hat ANSYS eine Datenmenge von über einem Terabyte produziert, wovon über 23 Gigabyte für die Auswertung der Berechnungen benötigt wurden.

Ich möchte mich für die Betreuung und die Unterstützung durch den Lehrstuhl Baumechanik-Statik an der Universität Dortmund bedanken. Herr Prof. Obrecht vertraute mir das Thema dieser Arbeit an, stellte mir die ANSYS-Lizenzen des Lehrstuhls zur Verfügung und nahm sich regelmäßig Zeit für meine Fragen. Auch bei Svenja Lange und Christian Maruszyk, wissenschaftliche Angestellte am Lehrstuhl, möchte ich mich für die Hilfestellung in ANSYS bedanken. Weiterhin danke ich Markus Behlau und Irmgard Mühlenkord für die spontane Hilfestellung bei Problemen mit dem Lizenz-Server.

Auch gilt mein Dank meinem Arbeitgeber Sports & Bytes GmbH, ganz speziell dem technischen Leiter Armin Matthaei. Er ermöglichte mir die Nutzung der Hardware des neuen Datenbank-Clusters² für meine Berechnungen mit ANSYS, die gleichzeitig einen Burn-In- und Dauer-Last-Test darstellten.

Zuletzt danke ich Karl-Richard Heering, Ingo Heinsch, Verena Nopto, Julia Heinrich, meiner Freundin Birgit Krieger und meinem Bruder Alfred Bergkemper. Sie haben dazu beigetragen, die Orthographiefehler in dieser Arbeit zu verbessern, sie auch für Leser, denen die Materie fremd ist, verständlich zu machen und sie in einem hochwertigen farbigen Druck zu Papier zu bringen.

Alexander Bruns, November 2004

¹entspricht 100.843,9 Minuten, 1.680,7 Stunden oder 70 Tagen

²Zwei Server mit jeweils Dual AMD Opteron Prozessor, 4 GB Arbeitsspeicher, 160 GB Serial-ATA-Raid und Gigabit-Ethernet unter Gentoo-Linux 2004.2 (64-Bit, x86_64) mit Kernel 2.6.7

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		i
Inhaltsverzeichnis		ii
Abbildungsverzeichnis		iv
Bezeichnungen		viii
1 Einleitung		1
1.1 Themenstellung und Inhalt		1
1.2 Begriffsdefinitionen		1
Kritische Last, Verzweigungslast, Beullast		1
Gleichgewichtspfad		1
Verzweigungspunkt		2
Beulen		2
Nachbeulverhalten		2
Imperfektionsempfindlichkeit		2
1.3 Motivation		2
1.4 Tragverhalten		3
2 FEM mit ANSYS		5
2.1 Verwendung der FEM		5
2.2 Anwendung von ANSYS		6
2.3 Numerisches Modell		6
3 Untersuchung des Kreiszylinders		9
3.1 Numerisches Modell		11
3.1.1 Solid-Model		11
3.1.2 Netzgenerierung		14
3.1.3 Randbedingungen		15
3.1.4 Berechnung		18
3.1.5 Ausgabe		19
3.2 Ergebnisse der Berechnungen		20
3.2.1 Variation der Elementgröße		20
3.2.2 Variation der Höhe		21
3.2.3 Variation der Wandstärke		22
3.2.4 Imperfektionsempfindlichkeit		23
4 Untersuchung des Sechseckzylinders		25
4.1 Numerisches Modell		27
4.1.1 Solid-Model		27

4.1.2	Netzgenerierung	29
4.1.3	Randbedingungen	30
4.2	Ergebnisse der Berechnungen	33
4.2.1	Variation der Elementgröße	33
4.2.2	Variation der Höhe	34
4.2.3	Variation der Wandstärke	35
4.2.4	Imperfektionsempfindlichkeit	36
5	Untersuchung von zellulären Sechseckzylinderstrukturen	38
5.1	Numerisches Modell	38
5.1.1	Solid-Modell und Vernetzung	38
Version 1	40
Version 2	42
5.2	Ergebnisse der Berechnungen	45
5.2.1	Variation der Elementgröße	45
5.2.2	Variation der Höhe	46
5.2.3	Imperfektionsempfindlichkeit	47
5.2.4	Einfluss der Zellenanzahl auf die kritische Last	47
6	Vergleich der Untersuchungsergebnisse	49
6.1	Variation der Elementgröße	49
6.2	Variation der Höhe	49
6.3	Variation der Wandstärke	50
6.4	Imperfektionsempfindlichkeit	51
6.5	Last pro Gewicht	51
7	Zusammenfassung	53
	Literaturverzeichnis	54
A	ANSYS Ein- und Ausgabedateien	55
A.1	Berechnung der Beullast und der zugehörigen Beulformen eines Kreiszylinders	55
A.2	Untersuchung der Imperfektionsempfindlichkeit eines Kreiszylinders	73
A.3	Berechnung der Beullast eines Sechseckzylinders unter Variation der Höhe	78
A.4	Berechnung der Beullast eines drei-zelligen Sechseckzylinders	83
A.5	Untersuchung der Imperfektionsempfindlichkeit eines sieben-zelligen Sechseckzylinders	89
B	Skript- und Batch-Dateien	92
B.1	Berechnung im Batchbetrieb	92
B.2	Generierung der Eingabedateien	95
B.3	Auswertung der Ausgabedateien	97
C	Zusätzliche Abbildungen	99
C.1	Kreiszylinder	99
C.2	Sechseckzylinder	105
C.3	Zelluläre Sechseckzylinderstrukturen	135

Abbildungsverzeichnis

0.1	Bezeichnungen am Zylinder	viii
1.1	Kreiszyylinder	1
1.2	Sechseckzyylinder	1
1.3	mehrzelliger Sechseckzyylinder	1
1.4	Last–Verschiebungs–Diagramm	4
1.5	Imperfektionsempfindlichkeit	4
2.1	ANSYS Element SHELL63, Elastisches Schalen–Element	7
2.2	Randbedingungen und Belastung am oberen Zylinderrand	7
2.3	Solid–Model und vernetzte Struktur eines imperfekten Kreiszyinders	8
2.4	Vernetzte Struktur eines perfekten und imperfekten Sechseckzyinders	8
3.1	Kreis: Beulform	10
3.2	Kreis: Erzeugende des Solid–Model	13
3.3	Kreis: Solid–Model als Linien– und Flächenansicht	14
3.4	Kreis: Vernetzte Struktur	15
3.5	Kreis: Aufgekrempelte Beulform	15
3.6	Kreis: Randbedingung RB01	16
3.7	Kreis: Randbedingung RB02	17
3.8	Kreis: Randbedingung RB03	17
3.9	Kreis: Randbedingung RB01 an Knoten	18
3.10	Kreis: Kritische Beullast nach Elementgröße	20
3.11	Kreis: Erste Beulform, RB01	21
3.12	Kreis: Absolute kritische Beullast nach Zylinderhöhe	21
3.13	Kreis: Erste Beulform eines hohen Zylinders, RB01	22
3.14	Kreis: Absolute kritische Beullast nach Wandstärke	22
3.15	Kreis: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion	24
4.1	Sechseck: Unterschiedliche Formen S1 bis S4	26
4.2	Sechseck: Solid–Model als Linien– und Flächenansicht	29
4.3	Sechseck: Vernetzte Struktur	30
4.4	Sechseck: Randbedingung RB04	31
4.5	Sechseck: Randbedingung RB05	32
4.6	Sechseck: Randbedingung RB01 an Knoten	32
4.7	Sechseck: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße	33
4.8	Sechseck: Erste Beulform, RB01	33
4.9	Sechseck: Erste Beulform, RB05	34
4.10	Sechseck: Absolute kritische Beullast nach Höhe	34
4.11	Sechseck: Erste Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB01	35
4.12	Sechseck: Absolute kritische Beullast nach Wandstärke	35

4.13	Sechseck: Absolute kritische Beullast nach Imperfektion	36
4.14	Sechseck: Imperfektionsempfindlichkeit, Form S1	37
5.1	Zellulär: neunzehn-zellige Struktur	39
5.2	Zellulär: Solid-Model als Linien- und Flächenansicht	44
5.3	Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße	45
5.4	Zellulär: Erste Beulform, 19 Zellen, Version 2, RB01	46
5.5	Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Höhe	46
5.6	Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion	47
5.7	Zellulär: Kritische Last pro Volumen nach Zellenanzahl	48
6.1	Vergleich: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße	49
6.2	Vergleich: Absolute kritische Beullast nach Höhe	50
6.3	Vergleich: Absolute kritische Beullast nach Wandstärke	50
6.4	Vergleich: Absolute kritische Beullast nach Imperfektion	51
6.5	Vergleich: Last pro Volumen	52
C.1	Kreis: Zweite Beulform, RB01	99
C.2	Kreis: Dritte Beulform, RB01	99
C.3	Kreis: Vierte Beulform, RB01	100
C.4	Kreis: Fünfte Beulform, RB01	100
C.5	Kreis: Erste Beulform, RB02	100
C.6	Kreis: Zweite Beulform, RB02	101
C.7	Kreis: Dritte Beulform, RB02	101
C.8	Kreis: Vierte Beulform, RB02	101
C.9	Kreis: Fünfte Beulform, RB02	102
C.10	Kreis: Erste Beulform, RB03	102
C.11	Kreis: Zweite Beulform, RB03	102
C.12	Kreis: Dritte Beulform, RB03	103
C.13	Kreis: Vierte Beulform, RB03	103
C.14	Kreis: Fünfte Beulform, RB03	103
C.15	Kreis: Zweite Beulform eines hohen Zylinders, RB01	104
C.16	Kreis: Dritte Beulform eines hohen Zylinders, RB01	104
C.17	Kreis: Vierte Beulform eines hohen Zylinders, RB01	104
C.18	Kreis: Fünfte Beulform eines hohen Zylinders, RB01	105
C.19	Sechseck: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße	105
C.20	Sechseck: Zweite Beulform, RB01	106
C.21	Sechseck: Dritte Beulform, RB01	106
C.22	Sechseck: Vierte Beulform, RB01	106
C.23	Sechseck: Fünfte Beulform, RB01	107
C.24	Sechseck: Sechste Beulform, RB01	107
C.25	Sechseck: Siebte Beulform, RB01	107
C.26	Sechseck: Achte Beulform, RB01	108
C.27	Sechseck: Neunte Beulform, RB01	108
C.28	Sechseck: Zweite Beulform, RB05	108
C.29	Sechseck: Dritte Beulform, RB05	109
C.30	Sechseck: Vierte Beulform, RB05	109
C.31	Sechseck: Fünfte Beulform, RB05	109
C.32	Sechseck: Sechste Beulform, RB05	110
C.33	Sechseck: Siebte Beulform, RB05	110

C.34 Sechseck: Achte Beulform, RB05	110
C.35 Sechseck: Neunte Beulform, RB05	111
C.36 Sechseck: Zweite Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB01	111
C.37 Sechseck: Dritte Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB01	111
C.38 Sechseck: Vierte Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB01	112
C.39 Sechseck: Fünfte Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB01	112
C.40 Sechseck: Erste Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB05	112
C.41 Sechseck: Zweite Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB05	113
C.42 Sechseck: Dritte Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB05	113
C.43 Sechseck: Vierte Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB05	113
C.44 Sechseck: Fünfte Beulform eines hohen Zylinders, Form S1, RB05	114
C.45 Sechseck: Imperfektionsempfindlichkeit, Form S1	115
C.46 Sechseck: Imperfektionsempfindlichkeit, Form S2	116
C.47 Sechseck: Imperfektionsempfindlichkeit, Form S3	117
C.48 Sechseck: Imperfektionsempfindlichkeit, Form S4	118
C.49 Sechseck: Vergleich Beulformen, S1, RB01, Ansicht1	119
C.50 Sechseck: Vergleich Beulformen, S1, RB01, Ansicht2	120
C.51 Sechseck: Vergleich Beulformen, S1, RB05, Ansicht1	121
C.52 Sechseck: Vergleich Beulformen, S1, RB05, Ansicht2	122
C.53 Sechseck: Vergleich Beulformen, S1, RB01, Ansicht1	123
C.54 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S2, RB01, Ansicht2	124
C.55 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S2, RB05, Ansicht1	125
C.56 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S2, RB05, Ansicht2	126
C.57 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S3, RB01, Ansicht1	127
C.58 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S3, RB01, Ansicht2	128
C.59 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S3, RB05, Ansicht1	129
C.60 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S3, RB05, Ansicht2	130
C.61 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S4, RB01, Ansicht1	131
C.62 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S4, RB01, Ansicht2	132
C.63 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S4, RB05, Ansicht1	133
C.64 Sechseck: Vergleich Beulformen, Form S4, RB05, Ansicht2	134
C.65 Zellulär: Kritische Last pro Volumen nach Zellenanzahl	135
C.66 Zellulär: Erste Beulform, 1 Zelle, Version 2, RB01	136
C.67 Zellulär: Erste Beulform, 2 Zellen, Version 2, RB01	136
C.68 Zellulär: Erste Beulform, 3 Zellen, Version 2, RB01	136
C.69 Zellulär: Erste Beulform, 4 Zellen, Version 2, RB01	137
C.70 Zellulär: Erste Beulform, 7 Zellen, Version 2, RB01	137
C.71 Zellulär: Erste Beulform, 19 Zellen, Version 2, RB01	137
C.72 Zellulär: Erste Beulform, 1 Zelle, Version 2, RB05	138
C.73 Zellulär: Erste Beulform, 2 Zellen, Version 2, RB05	138
C.74 Zellulär: Erste Beulform, 3 Zellen, Version 2, RB05	138
C.75 Zellulär: Erste Beulform, 4 Zellen, Version 2, RB05	139
C.76 Zellulär: Erste Beulform, 7 Zellen, Version 2, RB05	139
C.77 Zellulär: Erste Beulform, 19 Zellen, Version 2, RB05	139
C.78 Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße, Form S1	140
C.79 Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße, Form S2	141
C.80 Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße, Form S3	142
C.81 Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Elementgröße, Form S4	143
C.82 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB01, eine Zelle	144

C.83 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB01, zwei Zellen	145
C.84 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB01, drei Zellen	146
C.85 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB01, vier Zellen	147
C.86 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB01, sieben Zellen	148
C.87 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB01, neunzehn Zellen	149
C.88 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB05, eine Zelle	150
C.89 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB05, zwei Zellen	151
C.90 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB05, drei Zellen	152
C.91 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB05, vier Zellen	153
C.92 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB05, sieben Zellen	154
C.93 Zellulär: Normierte kritische Beullast nach Imperfektion, Form S1, RB05, neunzehn Zellen	155
C.94 Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Höhe, Form S1, RB01	156
C.95 Zellulär: Absolute kritische Beullast nach Höhe, Form S1, RB01	157

Bezeichnungen

Geometrie³

- x : Koordinatenrichtung
(horizontal nach außen)
- y : Koordinatenrichtung
(vertikal in Zylinder-Höhe)
- z : Koordinatenrichtung
(horizontal in Zylinder-Umfangsrichtung)
- r : Radius des Zylinders
- t : Wandstärke des Zylinders
- h : Höhe des Zylinders

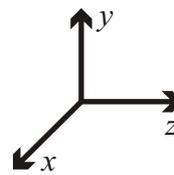
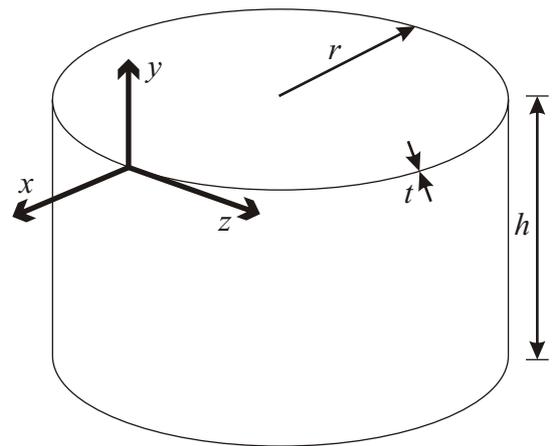


Abb. 0.1: Bezeichnungen am Zylinder

Verschiebungen

- Δ : Verschiebung
- u : Verschiebung in y -Richtung
- v : Verschiebung in z -Richtung
- w : Verschiebung in x -Richtung
- δ : Verschiebung / Imperfektion in x -Richtung

Materialkennwerte

- E : Elastizitätsmodul, E -Modul [N/mm^2]
- I : Trägheitsmoment [mm^4]
- ν : Querdehnzahl [–]

³Entgegen der üblichen Notation sind die Koordinatenachsen an die in ANSYS übliche Notation angepasst worden

1 Einleitung

1.1 Themenstellung und Inhalt

Das Thema dieser Diplomarbeit lautet: „Numerische Untersuchung zum Tragverhalten von dünnwandigen, zylindrischen, zellulären Strukturen unter axialer Belastung“. Es soll erforscht werden, wie sich das Tragverhalten beim Wechsel von einzelligen zu mehrzelligen Strukturen ändert und ob eine Steigerung der Last im Vergleich zu einzelnen Zylindern auftritt. Zuerst werden einzelne Kreiszyylinder (Kapitel 3) und Sechseckzyylinder (Kapitel 4) auf das Verhalten bei Belastung untersucht. Das Verhalten von mehrzelligen Zylinderstrukturen wird anhand von Sechseckzyindern in Anordnungen von zwei, drei, vier, sieben und 19 Zellen untersucht (Kapitel 5). Ein Vergleich der Ergebnisse der Kreis- und Sechseckzyylinder und der mehrzelligen Zylinder wird in Kapitel 6 unternommen. Die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen sind in Kapitel 7 zusammengefasst. Daran anschließend sind in Anhang A bis Anhang C die Ein- und Ausgabedateien der ANSYS-Berechnung angegeben, die Skripte, die bei der Berechnung Verwendung fanden, und die die folgenden Kapitel ergänzenden Abbildungen.

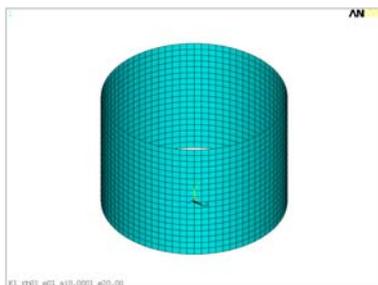


Abb. 1.1: Kreiszyylinder

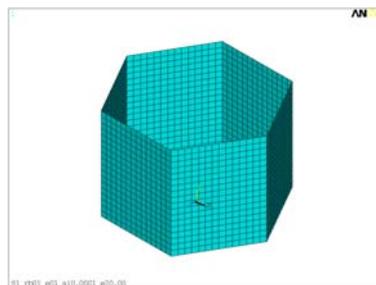


Abb. 1.2: Sechseckzyylinder

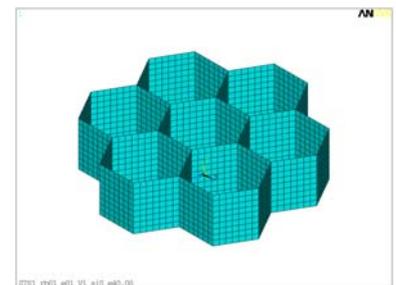


Abb. 1.3: mehrz. Sechseckzyylinder

1.2 Begriffsdefinitionen

Kritische Last, Verzweigungslast, Beullast

Wird die Last auf eine zylindrische Struktur kontinuierlich gesteigert, so gibt es zu jeder Last einen eindeutigen Gleichgewichtszustand. Wird eine bestimmte Last überschritten, so ist der Gleichgewichtszustand ab diesem Punkt nicht mehr eindeutig. Die Struktur beult aus und zweigt auf einen anderen Gleichgewichtspfad ab oder nimmt evtl. keine weitere Last mehr auf.

Gleichgewichtspfad

Trägt man die Last P zusammen mit der zugehörigen Verformung δ in ein Last-Verschiebungs-Diagramm ein, so bewegen sich die zugehörigen Punkte auf einer Kurve. Da zu jedem Punkt ein Gleichgewichtszustand gehört, spricht man von einem Gleichgewichtspfad.

Verzweigungspunkt

Das ist der Punkt in einem Last–Verschiebungs–Diagramm, an dem die Verzweigungslast erreicht ist. Der Gleichgewichtspfad hat an dieser Stelle einen Knick, da der Gleichgewichtszustand nicht mehr eindeutig ist und in einen anderen übergeht.

Beulen

Mit Beulen ist das Verhalten einer zylindrischen Struktur unter der Belastung mit der kritischen Last gemeint. Die Struktur ändert ihre Ausgangskonfiguration und wird nicht nur zusammengestaucht, sondern ändert die Form auch senkrecht zur Belastungsrichtung unter der kritischen Last.

Nachbeulverhalten

Erreicht die Belastung die kritische Last, so gibt es für das Verhalten der Struktur jenseits des Verzweigungspunktes zwei oder mehr Möglichkeiten. Ist nach dem Beulen eine weitere Belastung möglich, dann steigt der Gleichgewichtspfad nach dem Verzweigungspunkt an und man spricht von einem stabilen Nachbeulverhalten. Obwohl die Struktur sich durch das Ausbeulen verformt hat, ist eine weitere Aufnahme von Last möglich. Bricht die Struktur bei der kritischen Last zusammen, fällt der Gleichgewichtspfad nach dem Verzweigungspunkt ab. Es handelt sich dann um ein instabiles Nachbeulverhalten.

Imperfektionsempfindlichkeit

Bei einer zylindrischen Struktur spricht man von Imperfektionsempfindlichkeit, wenn kleine oder große Vorverformungen senkrecht zur Belastungsachse signifikante Änderungen der kritischen Last hervorrufen und diese sich bei zunehmender Imperfektion verringert. Ändert sich die Last auch bei einer verformten Struktur nicht oder steigt die Last bei zunehmender Imperfektion sogar, so sagt man, dass die Struktur in dieser Form unempfindlich gegenüber Imperfektionen ist.

1.3 Motivation

Die Analyse des Tragverhaltens von dünnwandigen Strukturen setzt sich zum Ziel, Formen zu finden, die im Vergleich zu anderen gleichen Gewichts bessere Eigenschaften besitzen. Dies bedeutet nicht nur eine große aufzunehmende Last, sondern auch eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Imperfektionen oder anderen Einflüssen, die die Tragwirkung beeinträchtigen können. Dabei sind die Strukturen und Formen interessant, die mit möglichst wenig Gewicht eine sehr hohe Tragfähigkeit erreichen und somit das Gewicht optimal in Tragwirkung umsetzen.

Diesem Ziel widmet sich die Forschung zum Thema „Ultraleichtbau“, welche nicht nur in den klassischen Disziplinen wie z. B. dem Flugzeugbau auf großes Interesse stößt. Auch im Bausektor werden zunehmend Materialien und Strukturen benötigt, die leichtere Tragwerke ermöglichen, ohne auf große Spannweiten oder große aufnehmbare Lasten verzichten zu müssen. Dabei gibt es zum einen den Weg, über das Material Gewicht einzusparen, zum anderen über die Formgebung das Material besser auszunutzen.

Die Frage, ob sich die Trageigenschaften signifikant ändern, wenn zylindrische Strukturen zellulär angeordnet werden und sich gegenseitig beeinflussen, wird in dieser Arbeit untersucht. Anhand von mehrzelligen Sechseckzylindern werden die Eigenschaften einer so entstandenen Bienenwabenstruktur mit den einzelligen Zylindern verglichen.