

**Nichtlineare Strukturanalyse
imperfekter windbelasteter schlanker
stählerner Kreiszyinderschalen**

von

Karsten Höhn

Bericht Nr. 4 (2002)

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 akademi-
schen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

**Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Thiele
Prof. Dr.-Ing. S. Winter
Prof. Dr.-Ing. W. Graße**

Tag der Verleihung: 23. 10. 2002

**Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der
Tragstrukturen**

Band 4

Karsten Höhn

**Nichtlineare Strukturanalyse imperfekter wind-
belasteter schlanker stählerner Kreiszyinderschalen**

**Shaker Verlag
Aachen 2003**

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Höhn, Karsten:

Nichtlineare Strukturanalyse imperfekter windbelasteter schlanker stählerner
Kreiszyinderschalen / Karsten Höhn.

Aachen : Shaker, 2003

(Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen ; Bd. 4)

Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-1068-7

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
odervollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1068-7

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

VORWORT

Diese Arbeit entstand während der Zeit meines Graduiertenstudiums seit April 1998 am Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig.

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Thiele danken. Er war es, der mir die Aufnahme der wissenschaftlichen Arbeit an seinem Institut ermöglichte. Er betreute mein Studium, die Auseinandersetzung mit dem Forschungsgegenstand sowie die Erstellung dieser Arbeit. Geduldig und mit viel Einfühlungsvermögen stand er in vielen Gesprächen zur Verfügung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Winter, Universität Leipzig, und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. W. Graße, Technische Universität Dresden, danke ich für die uneingeschränkte Übernahme eines Gutachtens zu dieser Dissertationsschrift.

Herrn Dr.-Ing. W. Schneider, Mitarbeiter des Institutes für Statik und Dynamik, danke ich ganz besonders für die intensive Zusammenarbeit am Forschungsthema der Stahlkamine. Seine Erfahrungen mit numerischen Analysen und die Implementierung des Softwaresystems FEMAS an den Computern des Rechenzentrums, die maßgeblich durch ihn vorangetrieben wurde, trugen zur Realisierung der Forschungsaufgabe bei. In zahlreichen Diskussionen gab er mir fachlichen Rat und half mir, meine Arbeit an imperfekten Kaminen in das von ihm koordinierte Forschungsgebiet stählerner Kreiszyinderschalen zu integrieren.

Den weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Statik und Dynamik danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit während meines Graduiertenstudiums. Sie standen für fachliche wie auch für übergreifende Gespräche stets zur Verfügung.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern. Sie haben mir Rückhalt geboten und für die Forschungsaufgabe, die ich mir gestellt habe, Mut gegeben. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Karsten Höhn

Leipzig, 23. Oktober 2002

INHALTSVERZEICHNIS

Begriffe und Symbole	III
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Stand der Normung	3
2.1 Windbelastung und Vereinfachung in den Vorschriften	3
2.2 Lineare Systemantwort der windbelasteten schlanken Kreiszylinderschale – Eingang in die Normung	5
2.3 Verzweigungsverhalten und geometrisch und physikalisch nichtlineares Verhalten	9
2.3.1 Übersicht	9
2.3.2 Beanspruchung durch zentrischen Druck	10
2.3.3 Beanspruchung durch Umfangsdruck	12
2.3.4 Beanspruchung durch stabartige Biegung	13
2.3.5 Beanspruchung durch Wind	14
2.4 Reale Imperfektionen	17
2.4.1 Allgemeines	17
2.4.2 Experimentell erhaltene und untersuchte Imperfektionen	17
2.4.3 Real mögliche Imperfektionsform und Ort deren Auftretens	17
2.4.4 Real auftretende Imperfektionsamplitude	18
2.5 Gegenwärtiger Normungsstand der Beulsicherheit	19
2.6 Zusammenfassung	21
3 Rechenmodell	22
3.1 Allgemeines	22
3.2 Material	22
3.3 Schalentheorie	24
3.4 Anwendung der Finiten Elemente Methode auf lineares Systemverhalten	25
3.5 Anwendung der Finiten Elemente Methode auf lineare Verzweigungsanalysen	26
3.6 Anwendung der Finiten Elemente Methode auf nichtlineares Systemverhalten	27
3.6.1 Last-Verformungs-Pfad	27
3.6.2 Pfadverfolgungsalgorithmen	28
3.7 Element und Diskretisierung	29
4 Lineare Stabilitätsanalyse der windbelasteten schlanken Kreiszylinderschale	31
4.1 Allgemeines	31
4.2 FE-gestützte Parameteranalysen zur linearen Stabilität	31
5 Nichtlineare Tragfähigkeitsanalyse geometrisch imperfekter Kamine	39
5.1 Allgemeines	39
5.2 Zusammenhang zwischen Spannungszustand und Imperfektionsanfälligkeit	40
5.3 Tragverhalten und Auswertungskriterien	42
5.4 Analyse imperfekter Strukturen	44
5.4.1 Beschreibung eigenformaffiner und kollapsaffiner Imperfektionsformen	44
5.4.2 Konzept der quasi kollapsaffinen Imperfektion	47
5.4.3 Formansatz ringsymmetrischer, quasi kollapsaffiner Imperfektionen	47

5.4.4	Einfluss des Vorbeulortes x_0 und Erweiterung des Konzeptes der quasi kollapsaffinen Imperfektion	49
5.4.5	Einfluss der Wellenlänge l_0 einer ringsymmetrischen Imperfektion	52
5.4.6	Einfluss der Amplitude w_0 einer ringsymmetrischen Imperfektion	54
5.4.7	Zusammenhang zwischen Pfadverhalten und Imperfektionssensitivität	62
5.4.8	Einfluss der Imperfektion auf die maßgebende Versagensart	67
6	Auswirkung auf die Bemessung stählerner Kamine	73
6.1	Spannungsnachweis	73
6.2	Nachweis der Beulsicherheit	74
6.2.1	Anforderungen an die Schalen	74
6.2.2	Vorgehensweise	75
6.2.3	Numerische Berechnung des realen Beulwiderstandes – Konzept IIIb der DAST-Richtlinie 017	76
6.2.4	Numerische Berechnung des ideal-elastisch-plastischen Beulwiderstandes – Konzept II der DAST-Richtlinie 017	81
6.2.5	Numerische Berechnung des ideal-elastischen Beulwiderstandes – Konzept I der DAST-Richtlinie 017	85
6.2.6	Nachweis ohne numerisch ermittelten Widerstand	89
6.2.7	Schlussfolgerungen aus der Bewertung verschiedener Bemessungskonzepte	94
7	Konsequenzen für die weitere Forschung	97
7.1	Eingliederung in übergeordnete Forschungsgebiete	97
7.2	Strukturantwort bei bekannter Imperfektion	97
7.3	Größe realer und anzunehmender Imperfektionen	97
7.4	Nachweis der Beulsicherheit	98
8	Zusammenfassung	100
9	Literatur	103