

**Imperfektionssensitivität
schlanker stählerner Kreiszyinderschalen
unter statischer Windbelastung**

von

Ingo Timmel

Bericht Nr.8 (2004)

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

Tag der Verleihung: 14.07.2004

Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der
Tragstrukturen

Band 8

Ingo Timmel

**Imperfektionssensitivität
schlanker stählerner Kreiszyinderschalen
unter statischer Windbelastung**

Shaker Verlag
Aachen 2004

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., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3046-7

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 häufigen Anwendung von schlanken stählernen Kreiszyinderschalen stehen erhebliche Kenntnislücken gegenüber, so dass diese Strukturen derzeit auf sehr unterschiedlichem Sicherheitsniveau bemessen werden. Reale Schalenträgerwerke sind durch ein breites Spektrum von Imperfektionen gekennzeichnet, wodurch die Tragfähigkeit gegenüber den perfekten Strukturen deutlich gemindert wird. Aufbauend auf den Erkenntnissen zum Tragverhalten *perfekter* schlanker Kreiszyinderschalen unter Windbelastung widmet sich diese Arbeit den *imperfekten* Strukturen.

Die vorgestellten Parameterstudien erfolgen ausschließlich numerisch. Das verwendete FE-Modell berücksichtigt sowohl geometrische als auch materielle Nichtlinearitäten, welche im untersuchten Geometriebereich mit einer Schlankheit $20 \leq h/r \leq 60$ und einer Dünnwandigkeit $50 \leq r/t \leq 350$ maßgeblichen Einfluss besitzen.

Um die Einflüsse von praktisch unvermeidbaren Imperfektionen wie z.B. Vorbeulen, Unrundheiten, Exzentrizitäten, Nennickenabweichungen oder Eigenspannungen in einer numerischen Analyse abzudecken, werden geometrische Ersatzimperfektionen eingeführt. Das Auffinden geeigneter Imperfektionsformen und die Untersuchung des Einflusses der einzelnen Imperfektionsparameter sind Kerninhalte dieser Arbeit. Außerdem bildet die Auseinandersetzung mit dem aktuellen Regelwerk zur Bemessung von Schalenträgerwerken einen weiteren Schwerpunkt.

Untersucht wird die freistehende Schale, die nur am Fuß gestützt ist. Dies entspricht nach der Stabtheorie einem Kragträger. Obwohl das Erscheinungsbild von schlanken Kreiszyinderschalen stabartig anmutet, zeigen sie ein ausgeprägtes Schalenträgerverhalten, welches gegenüber der Stabtheorie deutlich abweicht.

ABSTRACT

The widespread application of slender cylindrical steel shells is currently not covered by sufficient knowledge. Therefore, the design of these structures can not assure an even safety level. Real shell structures are characterised by a broad range of imperfections, through what the load bearing capacity is considerably reduced compared to the perfect structure. The load bearing capacity of *perfect* slender cylindrical steel shells under wind loading could be recently clarified. Using this knowledge this paper is about the imperfect structures.

The presented parameter studies are exclusively based on numerical analysis. The used FE-model takes geometrical as well as material non-linearity into consideration. The non-linearity has a substantial influence in the investigated geometry range with a height to radius ratio of $20 \leq h/r \leq 60$ and a radius to thickness ratio of $50 \leq r/t \leq 350$.

The shells are modelled in the numerical analysis with geometrical equivalent imperfections in order to cover real imperfections which cannot be avoided in practice, e.g. initial dimples, out-of-roundness, eccentricities, deviations from nominal thickness or residual stresses. The identification of appropriate imperfection pattern and the investigation of the influence of the several imperfection parameters are the main contents of the paper. In addition the current design regulations for shell structures are discussed.

The investigation concentrates on the free-standing shell structure, which is only supported at the bottom. This would comply with a cantilever according to beam theory. Although the slender cylindrical shell may look like a beam, it shows a distinct shell behaviour which deviates considerable from beam theory.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner vierjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig. Sie wurde durch die Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes TH 473/8 finanziell unterstützt.

Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Schneider. Er ist nicht nur der Erstgutachter sondern der eigentliche Vater dieser Dissertation. Er hat den Forschungsantrag für die DFG geschrieben, bewilligt bekommen und schließlich bei der Bewerberauswahl auf mich gesetzt. Ich hatte vier Jahre lang das Privileg, ein Arbeitszimmer mit Ihm zu teilen und habe dadurch sowohl fachlich als auch menschlich in hohem Maße profitiert.

Besonders freue ich mich, dass sich Herr Prof. Dr.-Ing. W. Graße, Professur für Stahlbau der Technischen Universität Dresden, bereit gefunden hat, ein Gutachten im Promotionsverfahren zu übernehmen. Für seine wertvollen Hinweise, sowohl in inhaltlicher als auch stilistischer Hinsicht, möchte ich ihm herzlich danken.

Für die freundliche Übernahme eines weiteren Gutachtens danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Thiele, bei dem ich schon als Student der damaligen TH Leipzig meine ersten Vorlesungen in Technischer Mechanik genossen habe und ohne dem es den Bereich Bauingenieurwesen an der Universität Leipzig wahrscheinlich nie gegeben hätte.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Kaliske, der seit 2002 das Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig leitet, und somit für die außerordentlich guten Arbeitsbedingungen verantwortlich ist, unter denen ich diese Arbeit fertig stellen durfte.

Mein Dank gilt weiter den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Statik und Dynamik der Tragstrukturen sowie des Rechenzentrums der Universität Leipzig. Ohne ihre Hilfe wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass es mich gibt und dass sie mir das Urvertrauen mitgegeben haben, um mich auch auf Dinge mit ungewissem Ausgang einlassen zu können. Dieses Urvertrauen ist nicht nur für die Forschung wichtig, aber hier eben auch.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Barbara und meinen beiden Söhnen Hannes und Moritz. Sie geben mir das gute Gefühl, dass die wissenschaftliche Arbeit zwar ein wertvoller aber nicht einziger Inhalt eines glücklichen Lebens ist.

Ingo Timmel

Leipzig, Juli 2004

INHALTSVERZEICHNIS

Symbole, Abkürzungen, Begriffe	III
1 Einführung	1
2 Wissensstand	3
2.1 Bemessung von Schornsteinen aus Stahl	3
2.2 Beulsicherheitsnachweise für Schalen	5
2.2.1 Allgemeines	5
2.2.2 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	6
2.2.2.1 Die ideale Beulspannung	9
2.2.2.2 Die reale Beulspannung	13
2.2.2.3 Vergleich von DIN 18800 T4 und EC 3 P1.6	17
2.2.3 Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis	18
2.2.3.1 LA - oder GNA - Beulsicherheitsnachweis	19
2.2.3.2 GMNA - Beulsicherheitsnachweis	20
2.2.3.3 GMNIA - Beulsicherheitsnachweis	23
2.2.4 Zusammenfassung zum Beulsicherheitsnachweis für Schalen	27
2.3 Experimentelle Untersuchungen	28
2.4 Schlanke windbelastete Kreiszyinderschalen	30
2.4.1 Abgrenzungskriterien	30
2.4.2 Lineare Schalenbiegetheorie	32
2.4.3 Nichtlineare Analyse der perfekten Struktur	35
2.4.4 Einfluss von Imperfektionen	39
3 Rechenmodell	40
3.1 Windbelastung	40
3.2 Material	41
3.3 Mechanische Parameter der Schale	43
3.4 Methode der Finiten Elemente	44
3.4.1 Allgemeines	44
3.4.2 FE-Programmsystem	45
3.4.3 Pfadverfolgung	46
3.4.4 Diskretisierung	48
4 Imperfektionssensitivität	51
4.1 Mögliche Imperfektionsformen	51
4.1.1 Überblick	51
4.1.2 Realistic – Worst - Stimulating	51
4.1.3 Quasi-kollapsaffine Imperfektionen	52
4.2 Relevante und bezogen Imperfektionsamplituden	54
4.3 Vergleich von Imperfektionsformen	56
4.3.1 Eigenformaffin – Sichelförmig - Axialsymmetrisch	56
4.3.2 Vergleich axialsymmetrischer Imperfektionen	60
4.3.2.1 Parameter axialsymmetrischer Imperfektionen	60
4.3.2.2 Konvex - Konkav	62
4.3.2.3 Einfach- und Mehrfachwellig	67
4.4 Einfluss der axialsymmetrischen Imperfektion	71
4.4.1 Einfluss der Imperfektionslänge	71

4.4.2	Einfluss des Imperfektionsortes	74
4.4.3	Einfluss der Imperfektionsamplitude	78
4.4.3.1	Allgemeines zur Imperfektionssensitivität	78
4.4.3.2	Multimodales Versagen, Lokale und globale Durchschlagspunkte	79
4.4.3.3	Abgrenzung der maßgebenden Versagensart	82
4.4.3.4	Pfadverhalten der perfekten Struktur und Imperfektionssensitivität	83
4.5	Einfluss von Imperfektionen auf das luvseitige Beulen	86
4.5.1	Untersuchte Imperfektionsformen	86
4.5.2	Der Versagensmechanismus der perfekten Schale	87
4.5.3	Einfluss der Imperfektionsform einer luvseitigen Einzelbeule	90
4.5.4	Einfluss der Imperfektionsform Unrundheit	91
4.5.5	Einfluss einer axialsymmetrischen Imperfektion	93
4.5.5.1	Identifizierung und Einfluss der Diskretisierung	94
4.5.5.2	Einfluss der Imperfektionslänge und konkav / konvex	96
4.5.5.3	Vergleich mit Versagensform (A) und (B)	97
5	Bemessung	101
5.1	Vorbemerkung	101
5.2	Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	101
5.3	LA – Beulsicherheitsnachweis	105
5.4	GMNA – Beulsicherheitsnachweis	111
5.5	GMNIA – Beulsicherheitsnachweis	115
5.5.1	Kalibrierung	115
5.5.2	Konsistente Imperfektionsamplituden	119
5.5.3	Beulwiderstände der imperfekten windbelasteten KZS	121
5.6	Vergleiche, Schlüsse und Vorschläge	125
5.6.1	Das modifizierte GMNIA – Konzept als Vergleichsbasis	125
5.6.2	Vergleich mit dem spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis	126
5.6.3	Vergleich mit dem LA – Beulsicherheitsnachweis	127
5.6.4	Vergleich mit dem GMNA – Beulsicherheitsnachweis	128
5.6.5	Schlüsse zum GMNIA – Beulsicherheitsnachweis	129
6	Schluss	131
6.1	Rückblick und Ausblick	131
6.2	Zusammenfassung	132
7	Literatur	137

SYMBOLS, ABKÜRZUNGEN, BEGRIFFE

Spezifische Begriffe

Dünnwandigkeit r/t :

Verhältnis Radius zu Wanddicke der Kreiszyllinderschale

Luv, Bug:

windzugewandte Seite, $\varphi=0^\circ$

Lee, Heck:

windabgewandte Seite, $\varphi=180^\circ$

Normierter Lastfaktor (NLF):

Lastfaktor bezogen auf diejenige Windlast, bei welcher nach der Stabtheorie im Einspannquerschnitt an Zug- und Druckrand des Kreisringquerschnittes die Streckgrenze erreicht wird. $NLF=1,0$ charakterisiert die elastische Grenzlast bei Bemessung nach der Stabtheorie.

Quasi-kollapsaffine Imperfektion:

Geometrische Ersatzimperfektion, deren Form vom Kollapsmuster der perfekten Schale abgeleitet wird.

Ringsteife:

Örtliches Versteifungsbauteil, das an einem Punkt des Schalenmeridians in Ringrichtung verläuft. Die Ringsteifen sind in Ringrichtung biegesteif, in Meridianrichtung dagegen biegeweich, so dass sie in ihrer Ebene zwar die Kreisringform, nicht aber das Ebenbleiben des Querschnittes erzwingen.

Schlankheit h/r :

Verhältnis Höhe zu Radius der Kreiszyllinderschale

Symbole und Abkürzungen (lateinische Buchstaben)

A	Querschnittsfläche des Kreisringquerschnittes
a	Abweichung von der Sollgeometrie gem. [DIN 18800 T4, 90] (305)
BC	Boundary Condition, analog RB
C_x	Beiwert beim Beulsicherheitsnachweis
d	Durchmesser der Kreiszyllinderschale
DP	Durchschlagspunkt
E	Elastizitätsmodul
FE	Finite Elemente
f_y	Streckgrenze
GMNA	Geometrisch und Materiell Nichtlineare Analyse
GMNIA	Geometrisch und Materiell Nichtlineare Analyse mit Imperfektionen
GNA	Geometrisch Nichtlineare elastische Analyse
GNIA	Geometrisch Nichtlineare elastische Analyse mit Imperfektionen
h	Höhe der Kreiszyllinderschale
h_{el}	Höhe eines FE-Elementes in Meridianrichtung
IS	Imperfektionssensitivität
K	Dimensionsloser Längenparameter einer Kreiszyllinderschale
	$K=(l/r)/\sqrt{(r/t)}= \omega/(r/t)$
KZS	Kreiszyllinderschale

k	Anpassungsfaktor für die nach Stabtheorie ermittelten Schnittgrößen der schlanken windbelasteten Kreiszyinderschale $k=0.5+2.94(r/t)/(h/r)^2 \geq 1$
k_{GMNIA}	Kalibrierungsfaktor beim GMNIA Beulsicherheitsnachweis
LA	Lineare elastische Analyse
l	Länge eines Schalensegmentes
l_0	Imperfektionslänge, Ausdehnung einer (Sinus)-Vollwelle in Meridianrichtung
l_g	Messlänge zur Bestimmung der Vorbeultiefe
l_x	Imperfektionslänge, Ausdehnung einer (Sinus)-Halbwelle in Meridianrichtung
l_{xi}	Halbwellenlänge des idealen Beulmusters in Meridianrichtung
$l_{x,RS}$	Halbwellenlänge der Randstörlösung
l_φ	Imperfektionslänge, Ausdehnung einer (Sinus)-Vollwelle in Ringrichtung
M	Biegemoment, Stabtheorie
MNA	Materiell Nichtlineare Analyse
m	Anzahl der Beulvollwellen über den Zylinderumfang $2\pi r$
N	Normalkraft, Stabtheorie
n	Anzahl der Beulhalblängen über die Zylinderlänge l
n_x	Membrannormalkraft in Meridianrichtung
n_θ	Membrannormalkraft in Umfangsrichtung
$n_{x\theta}$	Membranschubkraft
Q	Parameter zur Erfassung der Herstellqualität beim Beulsicherheitsnachweis gem. [EC 3 P1.6, 99]
R	aus einer numerischen Analyse berechneter Widerstand
R_{cr}	elastischer idealer Beulwiderstand (als Lastfaktor auf Bemessungslast)
R_{pl}	plastischer Referenzwiderstand (als Lastfaktor auf Bemessungslast)
Re	Reynoldszahl
RB	Randbedingung für Schalen: RB1 – eingespannt, RB2 – gelenkig, RB3 - frei
r	Radius der Kreiszyinderschale
s	Anzahl der Ringsteifen, s=1: Steife bei $x=h$, s=2: Steifen bei $x=h$ und $x=0.5h$
t	Wanddicke der Kreiszyinderschale
U_n	bezogene Imperfektionsamplitude
w_0	Imperfektionsamplitude, maximale Abweichung von der Sollgeometrie in Radialrichtung
W	Widerstandsmoment des Kreisringquerschnittes
x	kartesische Koordinate der Kreiszyinderschale in Meridianrichtung mit $x=0$ im Einspannquerschnitt
x_0	Imperfektionsort, Abstand der Imperfektion zum Einspannquerschnitt
z	kartesische Koordinate der Kreiszyinderschale in Windrichtung mit $z=0$ im Querschnittsmittelpunkt

Symbole (griechische Buchstaben)

α	Faktor für elastische Imperfektionsabminderung beim Beulsicherheitsnachweis
α_t	Verhältnis der größten Meridiankraft im Einspannquerschnitt bei Berechnung der unausgesteiften windbelasteten KZS nach der linearen Schalenbiegetheorie zu derjenigen nach der Stabtheorie; die größte Meridiankraft ist eine Zugkraft und tritt am Luvmeridian auf

α_c	Verhältnis der größten Meridiandruckkraft im Einspannquerschnitt bei Berechnung der unausgesteiften windbelasteten KZS nach der linearen Schalenbiegetheorie zu derjenigen nach der Stabtheorie
β	Faktor für plastischen Bereich beim Beulsicherheitsnachweis gem. [EC 3 P1.6, 99]
γ	Teilsicherheitsbeiwert
Δw_0	Gemessene Vorbeultiefe nach Messvorschrift gem. [EC 3 P1.6, 99] bzw. Differenz zwischen minimaler und maximaler Abweichung von der Sollgeometrie in Radialrichtung bei sinusförmigem Imperfektionsansatz
Δw_k	Charakteristische Imperfektionsamplitude beim spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis gem. [EC 3 P1.6, 99]
ε	Dehnung
κ	Abminderungsfaktor beim Beulsicherheitsnachweis gem. [DIN 18800 T4, 90]
$\bar{\lambda}$	Bezogener Schalenschlankheitsgrad (im Text und in Bildern nur λ)
$\bar{\lambda}_0, \bar{\lambda}_p$	Vollplastischer bzw. teilplastischer Grenزشlankheitsgrad beim Beulsicherheitsnachweis gem. [EC 3 P1.6, 99] (im Text und in Bildern nur λ_0 bzw. λ_p)
μ	Querdehnzahl, $\mu=0.3$ für Stahl (im Englischen meist ν)
η	Beiwert zur Ermittlung der idealen Axialbeulspannungen, [DIN 18800 T4, 90]
η	Exponent in der Gleichung der Beulkurvenform, [EC 3 P1.6, 99]
φ	Koordinate der Kreiszylinderschale in Ringrichtung mit $\varphi=0^\circ$ am Luvmeridian
σ	Spannung
σ_x	Meridianspannung, Spannung in Axialrichtung
σ_{xSi}	Ideale Beulspannung für Axialdruck, [DIN 18800 T4, 90]
σ_{xRc}	Ideale Beulspannung für Axialdruck, [EC 3 P1.6, 99]
σ_{xRk}	Reale bzw. charakteristische Beulspannung für Axialdruck
σ_{xRd}	Grenzbeulspannung für Axialdruck (Bemessungswert)
χ	Abminderungsfaktor beim Beulsicherheitsnachweis gem. [EC 3 P1.6, 99]
ω	Dimensionsloser Längenparameter einer Kreiszylinderschale $\omega=(l/r) \cdot \sqrt{(r/t)}=K \cdot (r/t)$

Indizes

c	Compression, Druck
consist	consistent, konsistent
d	Bemessungswert
E	Spannung oder Verschiebung infolge der Einwirkung
k	Charakteristischer bzw. realer Wert
M	Material / Werkstoff, z.B. γ_M
mod	modified, modifiziert
ov	overall (zur Identifizierung einer numerischen Gesamtanalyse)
R	Widerstand
red	reduziert
vorh	vorhanden
zul	zulässig