

**Ersatzimperfektionen für den  
numerischen Beulsicherheitsnachweis  
stählerner Kreiszyinderschalen**

von

**Marco Gettel**

Bericht Nr. 12 (2008)

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. R. Thiele  
Prof. Dr.-Ing. H. Pasternak

Tag der Verleihung: 15.10.2008

Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der  
Tragstrukturen

Band 12

**Marco Gettel**

**Ersatzimperfektionen für den  
numerischen Beulsicherheitsnachweis  
stählerner Kreiszyinderschalen**

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.: Leipzig, 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 978-3-8322-7769-7

ISSN 1615-8423

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Nam vitiiis nemo sine nascitur.*

(Horaz)



## KURZFASSUNG

Der Eurocode 3 [EN 1993-1-6: 2007] bietet neben dem klassischen Beulsicherheitsnachweis auch zwei numerisch gestützte Nachweisverfahren an. Hierbei stellt die geometrisch und materiell nichtlineare Analyse der imperfekten Struktur (GMNIA) das komplexere und realistischere, aber dementsprechend auch das aufwendigere Verfahren dar. Die größte Herausforderung bei dessen Anwendung besteht in der Wahl der geometrischen Ersatzimperfektionen, welche sämtliche die Traglast mindernden Einflüsse der realen Struktur in geeigneter Weise im Finite-Element-Modell widerspiegeln sollen.

Einführend wird ein Überblick über den Problemkreis des Beulverhaltens von Kreiszyinderschalen mit Fokus auf den Einfluss von Imperfektionen gegeben sowie bisher veröffentlichte Beulversuche unter dem Gesichtspunkt der Bewertung vorhandener Imperfektionen neu ausgewertet. Im Hauptteil der Arbeit wird zunächst gezeigt, dass die Regelungen im aktuellen Eurocode [EN 1993-1-6: 2007] bezüglich der numerischen Beulsicherheitsnachweise stählerner Kreiszyinderschalen noch nicht in allen Fällen geeignet sind, eine sichere und wirtschaftliche Anwendung zu gewährleisten. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die Wahl einer geeigneten geometrischen Ersatzimperfektion für die geometrisch und materiell nichtlineare Analyse der imperfekten Kreiszyinderschale (GMNIA).

Zu diesem Problemkreis werden zunächst die in der Literatur für die Grundbeulfälle sowie für kombinierte Beanspruchungsarten verwendete Imperfektionsformen dargestellt und bewertet. Für jeden der drei Grundbeulfälle wird gezeigt, dass eigenformaffine Imperfektionen, welche in [EN 1993-1-6: 2007] als Standardform vorgeschrieben werden, grundsätzlich ungeeignet sind. Als geeigneter erweisen sich quasi-kollapsaffine Imperfektionen, also Formen, die sich am Versagensmuster realer Schalen orientieren, aber nicht auf diese beschränkt sind.

Aus dem Konzept quasi-kollapsaffiner Imperfektionen ergibt sich für den Grundbeulfall Axialdruck eine konvexe Ringvorbeule mit einer Breite, die der Vollwellenlänge des idealen Ringbeulmusters entspricht. Bei den Grundbeulfällen Umfangsdruck und Torsionsschub erweisen sich sog. natürliche Längsvorbeulen als besonders vorteilhaft. Bei diesen wird lediglich die Maximalamplitude vorgegeben, die restliche Form stellt sich nach dem natürlichen Abklingverhalten von Biegestörungen ein. Daher sind diese Imperfektionsformen nicht nur sehr einfach zu generieren, sondern verletzen auch bei großen Amplituden nicht die mechanische Integrität des numerischen Modells. Bei Umfangsdruck wird eine konkave und bei Torsionsschub eine konvexe natürliche Längsvorbeule gewählt. Alle drei verwendeten Formen lassen sich zudem auf einen möglichen produktionstechnischen Ursprung zurückführen und sind deshalb auch realistischer als eigenformaffine Imperfektionen.

Auf Basis der so gewählten Imperfektionsformen werden anschließend die im Eurocode vorgegebenen Imperfektionsamplituden in einem breiten Geometriebereich bei den drei Grundbeulfällen angewendet und die so ermittelten Beulwiderstände mit denen verglichen, die sich mit dem spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis ergeben. Bei den Grundbeulfällen müsste sich bei Anwendung des GMNIA-Konzeptes zwingend der gleiche Beulwiderstand ergeben, da der spannungsbasierte Beulsicherheitsnachweis die untere Hüllkurve an die experimentelle Datenbasis darstellt. Während sich bei Axialdruck und Umfangsdruck bei Anwendung des GMNIA-Verfahrens sowohl zu konservativ als auch unsicher bewertete Geometriebereiche ergeben, erweisen sich die numerisch ermittelten Beulwiderstände bei Torsionsschub als durchweg zu groß.

Um diese unbefriedigende Situation zu verbessern, werden schließlich für die Grundbeulfälle diejenigen Imperfektionsamplituden für die bereits festgelegten Im-

perfektionsformen angegeben, die jeweils zum gleichen Beulwiderstand bei einer GMNIA-Berechnung wie beim spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis führen, also einen konsistenten Übergang zwischen den Bemessungsverfahren sicherstellen. Nach grundlegenden Untersuchungen wurden hierzu vom Autor für die Lastfälle Umfangsdruck und Schub umfangreiche Parameterstudien durchgeführt.

Ausgehend von den für die Grundbeulfälle konsistenten geometrischen Ersatzimperfektionen wird die Anwendung des GMNIA-Konzeptes bei zwei kombinierten Lastfällen, der Kragsschale unter Einzellast- und Windeinwirkung, präsentiert. Hierbei wird zum einen deutlich, dass die für die Grundbeulfälle ermittelten Ersatzimperfektionen bei Verwendung für kombinierte Lastfälle zu mechanisch begründeten Ergebnissen führen. Zum anderen wird gezeigt, dass eine geometrisch und materiell nichtlineare Analyse der perfekten Struktur (GMNA) bei kombinierter Beanspruchung nicht in jedem Fall geeignet ist, die maßgebende Ersatzimperfektionsform zu identifizieren. Bei keinem der beiden untersuchten Lastfälle ist es notwendig, die zu den enthaltenen Grundbeulfällen gehörenden Ersatzimperfektionen gleichzeitig anzuwenden und damit „gemischte“ Imperfektionsformen zu schaffen.

Motiviert durch die unzureichende experimentelle Basis beim Grundbeulfall Umfangsdruck, auf welche das spannungsbasierte Bemessungsverfahren des Eurocode gegründet ist, werden im letzten Teil der Arbeit erste Ergebnisse aus einem Kooperationsprojekt mit der TU Danzig vorgestellt. Hierbei werden zunächst Aspekte der Versuchstechnik sowie der numerischen Modellierung der Experimente beleuchtet. Einen Schwerpunkt bildet die Auswertung der Imperfektions- bzw. Verformungsmessdaten aus dem Versuch und der Übergänge dieser in das numerische Modell. Zudem wird an einem Beispiel die Wirkung der gemessenen Imperfektionsform mit der von Ersatzimperfektionsformen verglichen. Abschließend werden die ersten Ergebnisse aus dem Versuchsprogramm unter verschiedenen Gesichtspunkten dargestellt.

## ABSTRACT

As an alternative to stress design using classical hand calculations to verify buckling failure of steel shells, the new Eurocode 3 [EN 1993-1-6: 2007] also offers global numerical analysis techniques for different modelling levels. The geometrically and materially non-linear analysis of the imperfect structure (GMNIA) is the most complex, but also the most realistic technique. Within the finite element model, equivalent geometric imperfections must represent all possible imperfections that may appear on real shells. Choosing such an equivalent geometric imperfection is the most difficult challenge when using GMNIA.

Introductory, a review is given about the buckling behaviour of circular cylindrical shells with focus on the influence of imperfections. The main part firstly shows that the current regulations of the Eurocode [EN 1993-1-6: 2007] concerning the numerical buckling strength verification of cylindrical steel shells are not capable of ensuring a safe and economic design in all cases. The choice of a proper equivalent geometric imperfection for a geometrically and materially non-linear analysis with imperfections (GMNIA) is the most important task.

Concerning this matter, imperfection shapes used in the past for the analysis of the basic buckling cases as well as for combined load cases are presented and assessed. For each of the basic buckling cases, it is shown that eigenmode-affine imperfections, which have to be used as standard case according to [EN 1993-1-6: 2007], are generally unsuitable. Quasi-collapse-affine imperfections are better suited. These shapes emanate from the failure mode of the perfect shell, but are not confined to it.

At the basic buckling case axial compression, this concept results in a convex ring dent. At constant circumferential compression and shear, a natural longitudinal imperfection is beneficial. Natural imperfections are generated by the imposed displacement of only a few nodes of the FE mesh. The majority of the natural imperfection arises from the natural decay behaviour of a bending disturbance. This shape is easily implementable and unproblematic in an analysis even at large amplitudes. Beside that, the used shapes can be put down to shape deviations resulting from the production process and are, therefore, much more realistic than eigenmode-affine imperfections.

Based on these imperfection shapes, the imperfection amplitudes stated in the Eurocode are tested at the basic buckling cases in order to compare the numerically calculated buckling resistances to the ones resulting from stress design. At the basic buckling cases, the resistances calculated by both concepts must agree, because stress design forms the lower envelope of the experimentally derived data base. For axial and for circumferential compression, the current regulations may lead to an unsafe, but also to an uneconomic design, depending on the geometric parameters. At shear, the imperfection amplitudes given in [EN 1993-1-6: 2007] are throughout too small.

In order to improve this unsatisfactory situation, that imperfection amplitudes are presented which cause the same buckling resistance in GMNIA like in stress design. Thereby, a consistent transition between the buckling strength verification concepts is provided.

Those equivalent geometric imperfections, which are consistent for the basic buckling cases, are tested at two combined load cases: Cantilever shells subjected to a single transverse load at the top and slender wind loaded cylindrical shells. Hereby, mechanically reasonable results are obtained. It is shown that the imperfections belonging to all appearing buckling relevant stresses have to be applied, but combined imperfection shapes for combined load cases are not necessary.

Motivated by the insufficient experimental data, which forms the basis for stress design, at basic buckling case circumferential compression, the first results of a cooperative project with the Technical University of Gdansk (Poland) are presented in the last part. Aspects concerning the experimental setup and the numerical simulation of the experiments are highlighted. Emphasis is placed on the interpretation of the experimental measurement data and the link to the numerical model. The effects of measured imperfections and equivalent geometric imperfections are compared. Finally, the first results of the buckling tests are analysed.

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig. Sie wurde dankenswerterweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen mehrerer Projekte gefördert.

In erster Linie möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Schneider für die unzähligen Anregungen, die Unterstützung und die ausgezeichnete Zusammenarbeit danken. Neben seiner fachlichen Exzellenz auf vielerlei Gebieten haben mich auch stets seine Menschlichkeit und sein Wertesystem zutiefst beeindruckt. Ich hätte mir keinen besseren Nährboden für das Gelingen dieser Arbeit wünschen können.

Danken möchte ich ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Thiele für die Übernahme des Zweitgutachtens. Er hat mich bereits vor Studienbeginn begeistert, später meine fachliche Ausrichtung entscheidend beeinflusst und schließlich durch sein Gutachten meine „Ausbildungsphase“ abgerundet.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Pasternak vom Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus dafür, dass er das externe Gutachten trotz seiner vielfältigen Aufgaben übernommen hat.

Ebenfalls dankbar bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Kaliske, der als Institutsdirektor den Rahmen für meine wissenschaftliche Tätigkeit geboten hat, sowie den weiteren Institutskollegen für das freundschaftliche Klima und die fachliche Unterstützung.

Meinen lieben Eltern möchte ich auf diesem Wege für die genetische, erzieherische sowie finanzielle Grundlage meiner Ausbildung danken.

Besonderer Dank gilt schließlich meiner Frau Silke und meinen Kindern Luisa und Leonard für ihre Liebe, für den Rückhalt, den sie mir jeden Tag geben, sowie für ihr Verständnis für so manche „Ausnahmesituation“ während der Erstellung dieser Arbeit.

Marco Gettel

Leipzig, Oktober 2008



**INHALT**

Nomenklatur .....	I
1 Einführung und Zielsetzung .....	1
2 Wissensstand .....	3
2.1 Experimentelle und theoretische Untersuchungen .....	3
2.1.1 Beulwiderstand stählerner Kreiszyinderschalen .....	3
2.1.2 Imperfektionen stählerner Kreiszyinderschalen .....	7
2.1.3 Analytische Lösungen mit geometrischen Imperfektionen .....	13
2.2 Normative Regelungen des Eurocode .....	15
2.2.1 Allgemeines .....	15
2.2.2 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis (Stress Design) .....	16
2.2.3 Materiell nichtlineare Analyse / lineare Beulanalyse (MNA/LBA) .....	18
2.2.4 Geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperf. (GMNIA) .....	21
2.2.5 Aufmaß vorhandener oder zu erwartender Formabweichungen .....	25
2.3 Geometrische Ersatzimperfektionen .....	29
2.3.1 Allgemeines .....	29
2.3.2 Axialdruck .....	32
2.3.3 Umfangsdruck .....	37
2.3.4 Schub .....	38
2.3.5 Kombinierte Beanspruchung .....	38
3 Konsistente geometrische Ersatzimperfektionen .....	44
3.1 Allgemeines .....	44
3.2 Numerisches Modell .....	46
3.3 Grundbeulfälle .....	49
3.3.1 Axialdruck .....	49
3.3.2 Umfangsdruck .....	62
3.3.3 Schub .....	76
3.4 Kombinierte Beanspruchung .....	82
3.4.1 Kragsschale mit Einzelquerlast .....	82
3.4.2 Schlanke, windbelastete Kreiszyinderschale .....	94
4 Reale Imperfektionen vs. Ersatzimperfektionen beim LF Umfangsdruck ...	100
4.1 Allgemeines .....	100
4.2 Experimentelle Untersuchungen .....	103
4.2.1 Versuchseinrichtung .....	103
4.2.2 Versuchszylinder .....	105
4.2.3 Material .....	105
4.2.4 Durchführung .....	107
4.3 Auswertung der Imperfektionsmessungen .....	108
4.4 Aspekte der Modellierung .....	114
4.5 Gemessene Imperfektionen vs. Ersatzimperfektionen .....	117
4.6 Erste Ergebnisse der Beulversuche .....	124
5 Konsequenzen für die weitere Forschung .....	131
6 Zusammenfassung .....	133
7 Literatur .....	136
Anhang .....	A1



## NOMENKLATUR

Die verwendeten Begriffe und Formelzeichen entsprechen den Definitionen nach [EN 1993-1-6: 2007]. Darüber hinausgehende Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen werden nachfolgend bzw. bei ihrer ersten Verwendung im Text erläutert.

### BEGRIFFE

#### **Dünnwandigkeit:**

Das Verhältnis Radius zu Wanddicke  $r/t$  einer Kreiszyinderschale

#### **eigenformaffine Imperfektion:**

Eine Imperfektionsform, welche durch eine lineare Eigenwertanalyse der Schale unter der maßgebenden Einwirkungskombination gewonnen wird

#### **feste Vorbeule:**

Eine Imperfektionsform, bei der im Gegensatz z.B. zur natürlichen Längsvorbeule der gesamte Formverlauf definiert wird

#### **geometrische Schlankheit:**

Das Verhältnis Länge zu Radius  $l/r$  einer Kreiszyinderschale

#### **Kategorien der Imperfektionsbewertung:**

- |   |   |
|---|---|
| 0 | Imperfektionen nicht dokumentiert oder unbekannt            |
| 1 | verbale Beurteilung   |
| 2 | lediglich Einzelwerte angegeben                             |
| 3 | Imperfektionsverteilung über Prüfkörperoberfläche angegeben |
| 4 | Abhängigkeit zwischen Imperfektion und Traglast formuliert  |

#### **konsistente geometrische Ersatzimperfektion:**

Eine geometrische Ersatzimperfektion, durch deren Anwendung sich bei einer GMNIA die gleichen Beulwiderstände ergeben wie mit dem spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis.

#### **natürliche Längsvorbeule (NLVB):**

Eine Form der geometrischen Ersatzimperfektion, bei der nur die maximale Vorbeultiefe eingepägt wird und sich der restliche Verlauf der Vorbeulform durch das natürliche Abklingverhalten der Schale einstellt.

#### **quasi-kollapsaffine Imperfektion:**

Ein Imperfektionsmuster in Anlehnung an das Versagensmuster einer perfekten Schale.

#### **Ringvorbeule (RVB):**

Eine einwellige, rotationssymmetrische Ersatzimperfektionsform.

FORMELZEICHEN

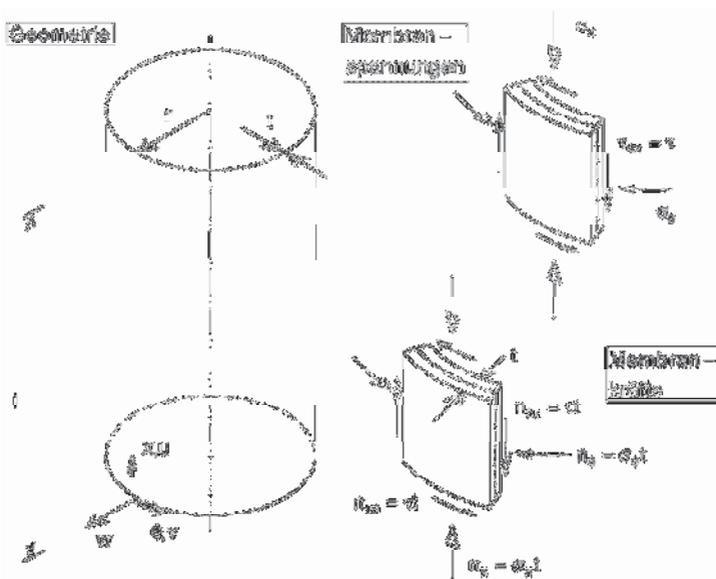


Bild 0-1 Definition von Geometrie-Größen sowie Membranspannungen und -kräften an der Kreiszylinderschale

Lagerungsbedingungen:

Randbedingungstyp	Einfache Bezeichnung	Beschreibung	w	u	$\beta_\phi$
BC1r	eingespannt	radial unverschieblich meridional unverschieblich biegeeingespannt	= 0	= 0	= 0
BC1f		radial unverschieblich meridional unverschieblich biegegelenkig	= 0	= 0	$\neq 0$
BC2r		radial unverschieblich meridional verschieblich biegeeingespannt	= 0	$\neq 0$	= 0
BC2f	gelenkig	radial unverschieblich meridional verschieblich biegegelenkig	= 0	$\neq 0$	$\neq 0$
BC3	frei	radial frei meridional frei biegegelenkig	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$

Tabelle 0-1 Lagerungsbedingungen

*Koordinatensystem:*

$r$	radiale Koordinate, normal zur Rotationsachse
$x$	meridionale/axiale Koordinate
$\theta$	Umfangskoordinate

*Druck*

$p_n$	normal zur Schalenmittelfläche
-------	--------------------------------

*Linienlasten*

$P_x$	Last pro Längeneinheit, in meridionaler Richtung wirkend
$P_\theta$	Last pro Längeneinheit, in Umfangsrichtung wirkend

*Membranschnittgrößen (Membrankräfte; vgl. Bild 0.1):*

$n_x$	Membrankraft in meridionaler Richtung (pro Längeneinheit)
$n_\theta$	Membrankraft in Umfangsrichtung (pro Längeneinheit)
$n_{x\theta}$	Membranschubkraft (pro Längeneinheit)

*Biegeschnittgrößen*

$m_x$	Meridianbiegemoment (pro Längeneinheit)
$m_\theta$	Umfangsbiegemoment (pro Längeneinheit)
$m_{x\theta}$	Drillmoment (pro Längeneinheit)
$q_{xn}$	zur Meridianbiegung gehörende Querkraft (pro Längeneinheit)
$q_{\theta n}$	zur Umfangsbiegung gehörende Querkraft (pro Längeneinheit)

*Spannungen*

$\sigma_x$	Meridianspannung
$\sigma_\theta$	Umfangsspannung
$\tau, \tau_{x\theta}$	Membranschubspannung
$\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$	Querkraftschubspannung – zur Meridianbiegung gehörend, zur Umfangsbiegung gehörend

*Verformungen*

$u$	Meridianverformung
$v$	Umfangsverformung
$w$	Verformung normal zur Schalenmittelfläche
$\beta_\phi$	Verdrehung in Meridianrichtung

*Schalengeometrie*

$l$	Länge
$l_g$	Messlänge zum Aufmaß von Imperfektionen
$l_{g\theta}$	Messlänge zum Aufmaß von Imperfektionen in Umfangsrichtung
$l_{gx}$	Messlänge zum Aufmaß von Imperfektionen in Umfangsrichtung
$r$	Radius der Schalenmittelfläche, normal zur Rotationsachse
$t$	Dicke der Schalenwand

*Toleranzen*

$U_n$	Imperfektionsamplitudenparameter für numerische Berechnungen
$U_0$	Vorbeultoleranzparameter
$\Delta w_0$	Toleranz normal zur Schalenoberfläche

*Materialeigenschaften*

E	Elastizitätsmodul
$E_{SH}$	Verfestigungsmodul ( $E_{SH} = \Delta\sigma_{pl} / \Delta\varepsilon_{pl}$ ) bei bilinearem Materialgesetz
$f_y$	Fließgrenze
$f_u$	Zugfestigkeit
$\nu$	Querdehnzahl

*Parameter bei Beulnachweisen (zugehöriges Verfahren in Klammern):*

C	Koeffizient beim Beulnachweis (SD)
$F_{Ed}$	Einwirkungskombination auf die gesamte Struktur entsprechend einer Bemessungssituation (Bemessungswerte)
$F_{Rd}$	Berechnungswerte der Einwirkungskombination bei maximalem Widerstand der Struktur (Bemessungswerte)
$r_{Rk}$	charakteristisches Referenzwiderstandsverhältnis $F_{Rd} / F_{Ed}$
$r_{Rpl}$	plastisches Referenzwiderstandsverhältnis; Lastfaktor auf Bemessungslast bei einer MNA
$r_{Rcr}$	ideales Beulwiderstandsverhältnis; Lastfaktor auf Bemessungslast bei einer LBA
k	Kalibrierungsfaktor bei nichtlinearen Berechnungen
k	Exponent bei Interaktionsgleichungen bei kombinierter Beanspruchung
$w_0$	Amplitude der geometrischen Ersatzimperfektion in Anlehnung an Vorschriften des Eurocode [EN 1993-1-6: 2005] zum Aufmaß von Vorbeulen
$w_0^*$	Amplitude der geometrischen Ersatzimperfektion, definiert als maximale Verformung gegenüber der perfekten Schale
$\alpha$	elastischer Beulabminderungsfaktor (SD)
$\beta$	Faktor für plastischen Bereich beim Beulsicherheitsnachweis (SD)
$\gamma$	Teilsicherheitsbeiwert
$\eta$	Exponent in der Gleichung für die Beulkurvenform (SD)
$\bar{\lambda}$	bezogener Schalenschlankheitsgrad (SD)
$\bar{\lambda}_{ov}$	bezogener Schlankheitsgrad der gesamten Schale (LBA)
$\bar{\lambda}_0$	vollplastischer Grenزشlankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$ oberhalb dessen die Stabilitätsabminderung beginnt) (SD, LBA)
$\bar{\lambda}_p$	teilplastischer Grenزشlankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$ unterhalb dessen die Plastizität die Stabilität beeinflusst) (SD, LBA)
$\omega$	bezogener Längenparameter einer Kreiszylinderschale (SD)
$\chi$	Abminderungsfaktor für Schalenbeulwiderstand (SD)
$\chi_{ov}$	Beul-Abminderungsfaktor für die gesamte Schale (LBA)
$\Delta w_{0,eq}$	Amplitude der geometrischen Ersatzimperfektion entspr. aktueller Regelung des Eurocode [EN 1993-1-6: 2007] (GMNIA)

*Indizes:*

EN	nach Vorschriften des Eurocode [EN 1993-1-6: 2007] ermittelt
GNA	aus GNA gewonnen
GNIA	aus GNIA gewonnen
GMNA	aus GMNA gewonnen
GMNIA	aus GMNIA gewonnen
LA	aus LA gewonnen
LBA	aus LBA gewonnen
MNA	aus MNA gewonnen

R	Widerstand
SD	aus spannungsbasiertem Beulsicherheitsnachweis (Stress Design)
cons	konsistent
cr	idealer Beulwert
d	Bemessungswert
exp	experimentell ermittelt
k	charakteristischer Wert
pl	plastisch
u	Traglastwert
y	Fließwert

*Vorzeichenvereinbarung:*

Die Vorzeichenvereinbarung für Membranspannungen und Kräfte orientiert sich an der bei Beulsicherheitsnachweisen üblichen Festlegung, dass Druckspannungen positiv und Zugspannungen negativ anzunehmen sind.