

**Anna Gorbachov**



**Beulkorrekturfaktoren für axialgedrückte  
Kreiszyinderschalen aus nichtrostenden Stählen**

# **Beulkorrekturfaktoren für axialgedrückte Kreiszyinderschalen aus nichtrostenden Stählen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften,  
der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Anna Gorbachov, M.Sc.  
aus Oberhausen

Referentin: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Korreferent: Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Eingereicht: 23. April 2020

Mündliche Prüfung: 28. Oktober 2020

Abteilung Bauwissenschaften der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Institut für Metall- und Leichtbau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner



Schriftenreihe Institut für Metall- und Leichtbau  
Universität Duisburg-Essen  
herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Band 7

**Anna Gorbachov**

**Beulkorrekturfaktoren für axialgedrückte  
Kreiszyinderschalen aus nichtrostenden Stählen**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**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.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8111-4

ISSN 1867-6782

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit fand ihren Anfang während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen und wurde im Laufe eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Stipendiums vom Begabtenförderungswerk Ernst Ludwig Ehrlich Studienwerk (ELES) erstellt.

Mein erster und ganz besonderer Dank geht an meine geschätzte Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner für ihr Vertrauen, persönliche Unterstützung, Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Frau Prof. Dr.-Ing. Martine Schnellbach-Held möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Weiterhin geht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Eugen Perau und Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Malkwitz, die meine Disputation als Prüfer begleitet haben.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Metall- und Leichtbau danke ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, stete Hilfsbereitschaft und gute Zusammenarbeit.

Bei meiner Familie, meinen Eltern und insbesondere meinem Mann Roman möchte ich mich herzlich bedanken für die uneingeschränkte, liebevolle und vielseitige Unterstützung, Geduld und Ermutigungen während der Arbeit an meiner Dissertation, ohne die diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre.

Essen, im November 2020

Anna Gorbachov



## Abstract

For design of shell structures significant difference between stainless steels and mild steels exists in the nonlinear range of stress-strain curves of stainless steels before reaching the yield strength  $f_y$ .

The nonlinearity of stainless steels can lead to a reduced buckling load capacity of stainless shells with middle slenderness. In the design according to EN 1993-1-6 it can be considered by replacing the real Young's modulus  $E$  by reduced Young's modulus  $E_{sek}$ . However, this method also reduces the buckling capacity of shells that fail outside the critical range of stress-strain curves of stainless steels and do not require any additional reduction compared to mild steels.

For this reason, *Schmidt* and *Hautala* developed the additional temperature and slenderness dependent correction factors for the design of axially compressed cylindrical shells made of stainless austenitic steels. This represented an alternative to the use of a reduced Young's modulus and were also published in „Buckling of Steel Shells - European Design Recommendations“ from *Rotter* und *Schmidt*.

Nevertheless, the additional correction factors according to *Schmidt* and *Hautala* cannot be used for the design of stainless ferritic and duplex steels due to differing stress-strain curves.

The aim of this work is to check the transferability of the existing additional correction factors for axially compressed shells made of stainless austenitic steels according to *Schmidt* and *Hautala* to stainless ferritic and duplex steels based on experimental and numerical investigations.

Furthermore, the integration of additional correction factors for shells made of stainless steels into the parameter-based design method of EN 1993-1-6 will be investigated.



## Kurzfassung

Ein für die Bemessung von Kreiszyinderschalen maßgebender Unterschied zwischen nichtrostenden Stählen und unlegierten Baustählen besteht im nichtlinearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linien der nichtrostenden Stähle vor dem Erreichen der Streckgrenze  $f_y$ .

Die Nichtlinearität nichtrostender Stähle kann zur reduzierten Beultragfähigkeit mittelschlanker Kreiszyinderschalen führen. Bei der Bemessung nach DIN EN 1993-1-6 kann sie berücksichtigt werden, indem der tatsächliche E-Modul durch reduzierten E-Modul  $E_{sek}$  ersetzt wird. Bei dieser Vorgehensweise wird jedoch auch die Beultragfähigkeit von Schalen reduziert, die außerhalb des kritischen Bereichs der Spannungs-Dehnungs-Linien nichtrostender Stähle versagen und keiner zusätzliche Abminderung gegenüber den unlegierten Stählen bedürfen.

Aus diesem Grund wurden seinerzeit von *Schmidt* und *Hautala* temperatur- und schlankheitsabhängige Beulkorrekturfaktoren für die Bemessung axialgedrückter Kreiszyinderschalen aus austenitischen Stählen entwickelt, die eine Alternative zum Einsatz des reduzierten E-Modul darstellen und den Eingang in die „Buckling of Steel Shells - European Design Recommendations“ von *Rotter* und *Schmidt* gefunden haben.

Die Beulkorrekturfaktoren nach *Schmidt* und *Hautala* können jedoch für die Bemessung unter Einsatz von nichtrostenden ferritischen und Duplex-Stählen aufgrund abweichender Spannungs-Dehnungs-Linien nicht verwendet werden.

Ziel dieser Arbeit ist, die Übertragbarkeit der Beulkorrekturfaktoren für axialgedrückte Kreiszyinderschalen nach *Schmidt* und *Hautala* für nichtrostende austenitische Stähle auf nichtrostende ferritische und Duplex-Stähle anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen zu überprüfen.

Des Weiteren soll die Einbindung von Beulkorrekturfaktoren für nichtrostende Stähle in die heute üblichen, parameterbasierten Nachweisverfahren nach DIN EN 1993-1-6 untersucht werden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Zusammenfassender Überblick .....	3
<b>2 Beulnachweis von Schalenträgwerken .....</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines .....	5
2.1.1 Kreiszyinderschalen aus nichtrostendem Stahl.....	5
2.1.2 Verwendete Normen .....	6
2.2 Beulsicherheitsnachweis nach DIN EN 1993-1-6 .....	7
2.2.1 Allgemeine Beultragfähigkeitskurve nach <i>Schmidt</i> .....	12
2.2.2 Modifizierte Beultragfähigkeitskurve nach <i>Rotter</i> .....	14
2.3 Kreiszyinderschalen aus nichtrostenden Stählen .....	16
2.3.1 Einfluss des nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens auf die Beulanalyse von Kreiszyinderschalen .....	16
2.3.2 Beulkorrekturfaktoren nach <i>Hautala</i> und <i>Schmidt</i> und ihre Auswirkung auf die Bemessung nach DIN EN 1993-1-6.....	19
2.4 Zusammenfassung .....	21
<b>3 Traglastversuche an nichtrostenden ferritischen und Duplex-Stählen .....</b>	<b>23</b>
3.1 Allgemeines .....	23
3.2 Versuchsprogramm .....	23
3.3 Materialuntersuchung .....	25
3.4 Versuchskörper .....	30
3.4.1 Herstellung.....	30
3.4.2 Imperfektionen .....	32
3.5 Versuchsdurchführung .....	43
3.6 Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse .....	46
3.7 Zusammenfassende Erläuterungen.....	54
<b>4 Numerische Vergleichsanalyse zu den Traglastversuchen .....</b>	<b>55</b>
4.1 Allgemeines .....	55
4.2 Finite-Elemente-Modell.....	56
4.3 Studie zur Darstellung von Imperfektionen .....	60
4.3.1 Mögliche Imperfektionsformen .....	60
4.3.2 Numerische Studie zum Einfluss der Imperfektionen.....	63

4.4	Beulkorrekturfaktoren unter Zugrundelegung von gemessenen Materialkennwerten .....	69
4.5	Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen, zusammenfassende Erläuterungen .....	72
<b>5</b>	<b>Numerische Analyse des Axialtragverhaltens von Schalentragwerken aus nichtrostendem Stahl.....</b>	<b>75</b>
5.1	Allgemeines .....	75
5.2	Wahl des geeigneten Materialgesetzes .....	77
5.2.1	Wahre gemessene Spannungs-Dehnungs-Kurven .....	77
5.2.2	Näherung zur Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens nach DIN EN 1993-1-4, Anhang C.....	78
5.2.3	Modifizierte Näherung zur Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens nach <i>Arrayago, Real</i> und <i>Gardner</i> .....	80
5.2.4	Gewähltes Materialverhalten.....	86
5.3	Einfluss der gewählten Imperfektion .....	87
5.4	Streckgrenze als variabler Parameter in <i>FEM</i> .....	90
5.5	Parameterstudie mit <i>NB1</i> .....	98
5.5.1	Duplex 1.4462, $n = 5$ .....	99
5.5.2	Austenit 1.4301, $n = 6$ .....	106
5.5.3	Ferrit 1.4003, $n = 7$ .....	107
5.5.4	Beulkorrekturfaktoren für <i>NB1</i> .....	109
5.6	Parameterstudie mit <i>NB2</i> .....	111
5.6.1	Duplex 1.4462, $n = 8$ .....	112
5.6.2	Austenit 1.4301, $n = 7$ .....	113
5.6.3	Ferrit 1.4301, $n = 14$ .....	114
5.6.4	Beulkorrekturfaktoren für <i>NB2</i> .....	115
5.7	Zusammenfassende Erläuterungen.....	117
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>121</b>
6.1	Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen .....	121
6.2	Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen .....	123
6.3	Ausblick .....	123
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>125</b>
	Normen, Richtlinien und Datenblätter.....	125
	Zitierte Literatur .....	127
	<b>Anhänge .....</b>	<b>133</b>
	Anhang A - Experimentelle Untersuchungen.....	135
	Anhang B - Numerische Studien .....	173

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1.1:</b>	Nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie mit einer bilinearen Näherung und zu der 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ gehörendem Sekantenmodul $E_{sek}$ .	1
<b>Abbildung 2.1:</b>	Fermenter aus nichtrostendem Stahl [links], Zuckerrüben für die Vergärung in Biogasanlagen als Beispiel für Substrat [rechts]	5
<b>Abbildung 2.2:</b>	Allgemeine Beultragfähigkeitskurve für spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis	12
<b>Abbildung 2.3:</b>	Modifizierte Beultragfähigkeitskurve nach J.M. Rotter	15
<b>Abbildung 2.4:</b>	Typische experimentelle Spannungs-Dehnungs-Diagramme von nichtrostenden Stählen: Austenit (1.4571, $t = 1,5$ mm), Ferrit (1.4521, $t = 3$ mm) und Duplex (1.4462, $t = 3$ mm) im Vergleich zum bilinearen Materialverhalten	17
<b>Abbildung 2.5:</b>	Nichtlineares Materialverhalten von nichtrostenden austenitischen Stählen im Vergleich zum bilinearen Materialverhalten von Baustahl	18
<b>Abbildung 3.1:</b>	Versuchskörper vor dem Versuch mit $r \times l \times t$ : 200 x 350 x 0,5 mm aus Ferrit 1.4521; 150 x 350 x 1,0 mm und 150 x 350 x 3,0 mm aus Duplex 1.4462	25
<b>Abbildung 3.2:</b>	Herstellung des Prüfkörpers in einer Schweißvorrichtung, WIG-Schweißen über einem Kupferelement für die Wärmeableitung	30
<b>Abbildung 3.3:</b>	Das Nachwalzen des Versuchskörpers nach dem WIG Schweißen (links) und Imperfektionsmessanlage mit sechs induktiven Wegaufnehmern (rechts)	31
<b>Abbildung 3.4:</b>	Versuchsaufbau mit Kraffteinleitung (links); stählerner Ring mit kreisförmiger Nut zur beidseitigen Einbringung an eine Schale und anschließendem Füllen mit festem Vergusschharz (rechts)	31
<b>Abbildung 3.5:</b>	Typische, schematisch dargestellte Imperfektionsform einer aus einem Feinblech kaltgewalzten und längsgeschweißten Kreiszylinderschale	33
<b>Abbildung 3.6:</b>	Imperfektionsmesssystem mit sechs induktiven Wegaufnehmern (a). Axialgedrückte Kreiszylinderschale in der Prüfmaschine vor (b) und nach (c) dem Versuch	33
<b>Abbildung 3.7:</b>	Systematische Messfehler und Bereinigung der Imperfektionen (nach [HS00])	35
<b>Abbildung 3.8:</b>	Exemplarische Darstellung der gemessenen und bereinigten geometrischen Imperfektionen für die KZS 150-1.0-D1, 3-fach überhöht	36
<b>Abbildung 3.9:</b>	Gemessene geometrische Imperfektionen für die 150-1-D2 Schale aus Duplex-Stahl mit $r / t = 150$ , 3-fach überhöht	37
<b>Abbildung 3.10:</b>	Beulrelevante geometrische Toleranzen nach DIN EN 1993-1-6	38
<b>Abbildung 3.11:</b>	Versuchsaufbau mit eingebautem Versuchskörper	43

<b>Abbildung 3.12:</b>	Versuchskörper nach dem Versuch mit $r \times l \times t$ : 200 x 350 x 0,5 mm aus Ferrit 1.4521; 150 x 350 x 1,0 mm und 150 x 350 x 3,0 mm aus Duplex 1.4462	44
<b>Abbildung 3.13:</b>	Versuchskörper 200-0,6-D1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten zur Darstellung vom Rückgang der elastischen Beulanteilen	45
<b>Abbildung 3.14:</b>	Experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für zwölf Versuchsschalen aus nichtrostendem ferritischem (1.4509, F) und Duplex-(1.4462, D) Stahl	47
<b>Abbildung 3.15:</b>	Bezogene experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für alle Versuchsschalen aus nichtrostendem ferritischem (1.4509) und Duplex-Stahl (1.4462)	49
<b>Abbildung 3.16:</b>	Bezogene experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für sechs Versuchsschalen aus nichtrostendem ferritischem (1.4509, links) und Duplex-(1.4462, rechts) Stahl	50
<b>Abbildung 3.17:</b>	Darstellung der experimentellen Beultragfähigkeiten über das $r/t$ -Verhältnis und die bezogene Schlankheit	51
<b>Abbildung 4.1:</b>	Experimentelle und numerisch mit verschiedenen Randbedingungen (BC1f/BC2f biege gelenkig, BC1r/BC2r biegeeingespannt) berechnete bezogene Last-Verformungs-Diagramme für den Probekörper 150-1-D1 mit $r/t = 150$	58
<b>Abbildung 4.2:</b>	Vergleich des Newton-Raphson-Verfahrens mit dem Bogenlängenverfahren (Arc-Length Method) anhand von <i>GMNIA</i> Berechnungen einer 150-3-D Schale mit <i>HQK A, B und C</i>	59
<b>Abbildung 4.3:</b>	Untersuchte Ersatzimperfectionen: achsensymmetrische Mehrwellenimperfection, achsensymmetrische konkave Einzelringvorbeule und achsensymmetrische konvexe Einzelringvorbeule.	63
<b>Abbildung 4.4:</b>	Vergleich der bezogenen experimentellen Beultragfähigkeiten mit den bezogenen numerischen Beultragfähigkeiten unter Ansatz der Mehrwellenimperfection der <i>HQK A, B, C</i> (a), konkaver Einzelringimperfection der <i>HQK C</i> (b) und tatsächlichen geometrischen Imperfectionen (c)	66
<b>Abbildung 4.5:</b>	Experimentelle und numerisch mit verschiedenen Imperfectionen berechnete bezogene Last-Verformungs-Diagramme für den Probekörper 150-1-D1 mit $r/t = 150$	67
<b>Abbildung 4.6:</b>	Axialgedrückte Kreiszyinderschale a) in der Prüfmaschine vor dem Versuch b) in der Prüfmaschine nach dem Versuch c) nach einer numerischen Simulation mit dem <i>FEM</i> Programm ANSYS	69
<b>Abbildung 4.7:</b>	Beulkorrekturfaktoren $\psi_\lambda$ für nichtrostende Duplex- und ferritische Stähle	71

<b>Abbildung 5.1:</b>	Einfluss der $n$ -Koeffizienten auf das Materialmodell nach DIN EN 1993-1-4, Anhang C am Beispiel von Materialkennwerten von Austenit 1.4301	80
<b>Abbildung 5.2:</b>	Vergleich der Näherungen zur Beschreibungen des nichtlinearen Materialverhaltens nach DIN EN 1993-1-4, Anhang C und nach dem modifizierten Modell nach <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> [BH17] am Beispiel von Duplex 1.4462	83
<b>Abbildung 5.3:</b>	Vergleich der Näherungen zur Beschreibungen des nichtlinearen Materialverhaltens nach DIN EN 1993-1-4, Anhang C und nach dem modifizierten Modell nach <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> [BH17] am Beispiel von Austenit 1.4301.	84
<b>Abbildung 5.4:</b>	Vergleich der Näherungen zur Beschreibungen des nichtlinearen Materialverhaltens nach DIN EN 1993-1-4, Anhang C und nach dem modifizierten Modell nach <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> [BH17] am Beispiel von Ferrit 1.4003.	85
<b>Abbildung 5.5:</b>	Modifizierte Spannungs-Dehnungs-Diagramme nach <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> mit $n = 5$ nach DIN EN 1993-1-4 (EC) und $n = 8$ (modif.) nach [BH17] jeweils mit nominellen $f_y = 500$ N/mm <sup>2</sup> sowie hypothetischen $f = 10$ N/mm <sup>2</sup> und $f_y = 2500$ N/mm <sup>2</sup> Streckgrenzen am Beispiel von Duplex 1.4462.	93
<b>Abbildung 5.6:</b>	Modifizierte, bezogene Spannungs – bezogene Dehnungs - Diagramme mit dem Materialmodell nach <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> mit $n = 5$ nach DIN EN 1993-1-4 (EC) und $n = 8$ (modif.) nach [BH17] jeweils mit nominellen $f_y = 500$ N/mm <sup>2</sup> sowie hypothetischen Streckgrenzen von $f_y = 10$ N/mm <sup>2</sup> und $f_y = 2500$ N/mm <sup>2</sup> am Beispiel von Duplex 1.4462.	94
<b>Abbildung 5.7:</b>	Spannungs-Tangentenmodul-Diagramme (links) und Dehnungs-Tangentenmodul-Diagramme (rechts) mit einer Materialmodelldefinition nach <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> mit $n$ -Faktoren nach DIN EN 1993-1-4 (EC) und modifizierten $n$ -Faktoren (modif.) jeweils mit nominellen $f_y = 500$ N/mm <sup>2</sup> sowie hypothetischen Streckgrenzen von $f_y = 10$ N/mm <sup>2</sup> und $f_y = 2500$ N/mm <sup>2</sup> am Beispiel von Duplex 1.4462.	96
<b>Abbildung 5.8:</b>	Beultragfähigkeitskurve für imperfekte KZS unter Axialdruck berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Duplex 1.4462 mit <i>NB1</i> sowie einem analogen bilinearen Materialverhalten.	100
<b>Abbildung 5.9:</b>	Modifizierte Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck, berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Duplex 1.4462 mit <i>NB1</i> und einem analogen bilinearen Materialverhalten für unlegierte Stähle	101
<b>Abbildung 5.10:</b>	Numerische und analytische Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck.	103
<b>Abbildung 5.11:</b>	Vergleich von experimentellen, numerischen und analytischen Beultraglasten von imperfekten KZS unter Axialdruck.	104

<b>Abbildung 5.12:</b>	Allgemeine (links) und modifizierte (rechts) Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck, berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Austenit 1.4301 mit <i>NB1</i> sowie analogem bilinearen Materialverhalten	107
<b>Abbildung 5.13:</b>	Allgemeine (links) und modifizierte (rechts) Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck, berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Ferrit 1.4003 mit <i>NB1</i> sowie analogem bilinearen Materialverhalten	108
<b>Abbildung 5.14:</b>	Beulkorrekturfaktoren $\Psi\lambda, w/t$ für nichtrostende Stähle mit <i>NB1</i>	110
<b>Abbildung 5.15:</b>	Allgemeine (links) und modifizierte (rechts) Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck, berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Duplex 1.4462 mit <i>NB2</i> sowie einem analogen bilinearen Materialverhalten.	112
<b>Abbildung 5.16:</b>	Allgemeine (links) und modifizierte (rechts) Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck, berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Austenit 1.4301 mit <i>NB1</i> sowie analogem bilinearen Materialverhalten	113
<b>Abbildung 5.17:</b>	Allgemeine (links) und modifizierte (rechts) Beultragfähigkeitskurven für imperfekte KZS unter Axialdruck, berechnet mit multilinearem Materialverhalten von Ferrit 1.4003 mit <i>NB2</i> sowie analogem bilinearen Materialverhalten	114
<b>Abbildung 5.18:</b>	Beulkorrekturfaktoren $\Psi\lambda, w/t$ für nichtrostende Stähle mit <i>NB2</i>	116
<b>Abbildung 5.19:</b>	Vergleich der Beulkorrekturfaktoren $\Psi\lambda, w/t$ für nichtrostende Stähle mit <i>NB2</i> mit den Beulkorrekturfaktoren nach <i>Hautala</i> und <i>Schmidt</i>	118
<b>Abbildung A.1:</b>	Geometrische Abmessungen der Platten für die Schalen 200- 0,6-D1, 200-0,6-D2, 200-0,5-F1, 200-0,5-F2 und Zugproben sowie die Positionierung der Probekörper innerhalb der Blechplatte	135
<b>Abbildung A.2:</b>	Geometrische Abmessungen der Platten für die Schalen 150-1- D1, 150-1-D2, 150-1-F1, 150-1-F2 und Zugproben sowie die Positionierung der Probekörper innerhalb der Blechplatte	136
<b>Abbildung A.3:</b>	Geometrische Abmessungen der Platten für die Schalen 150-3- D1, 150-3-D2, 150-3-F1, 150-3-F2 und Zugproben sowie die Positionierung der Probekörper innerhalb der Blechplatte	137
<b>Abbildung A.4:</b>	Abmessungen von Zugproben $t = 0,5/0,6, 1,0$ und $3,0$ mm nach DIN 50125]	138
<b>Abbildung A.5:</b>	Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-3- D1 mit $r/t = 50$	141
<b>Abbildung A.6:</b>	Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-3- D2 mit $r/t = 50$	141

- Abbildung A.7:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-3-F1 mit  $r/t = 50$  142
- Abbildung A.8:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-3-F2 mit  $r/t = 50$  142
- Abbildung A.9:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-1-D1 mit  $r/t = 150$  143
- Abbildung A.10:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-1-D2 mit  $r/t = 150$  143
- Abbildung A.11:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-1-F1 mit  $r/t = 150$  144
- Abbildung A.12:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 150-1-F2 mit  $r/t = 150$  144
- Abbildung A.13:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 200-0,6-D1 mit  $r/t = 333$  145
- Abbildung A.14:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 200-0,6-D2 mit  $r/t = 333$  145
- Abbildung A.15:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 200-0,5-F1 mit  $r/t = 400$  146
- Abbildung A.16:** Experimentelle und statische Last-Verkürzungs-Kurven (links) und Last-Dehnungs-Kurven (rechts) für den Probekörper 200-0,5-F2 mit  $r/t = 400$  146
- Abbildung A.17:** Experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für Versuchsschalen mit  $r/t = 50$  aus nichtrostendem ferritischem und Duplex-Stahl 147
- Abbildung A.18:** Experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für Versuchsschalen mit  $r/t = 150$  aus nichtrostendem ferritischem und Duplex-Stahl 147
- Abbildung A.19:** Experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für Versuchsschalen aus nichtrostendem ferritischem Stahl mit  $r/t = 400$  und Duplex-Stahl mit  $r/t = 333$  148
- Abbildung A.20:** Bezogene experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für Versuchsschalen mit  $r/t = 50$  aus nichtrostendem ferritischem und Duplex-Stahl 148
- Abbildung A.21:** Bezogene experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für Versuchsschalen mit  $r/t = 150$  aus nichtrostendem ferritischem und Duplex-Stahl 149

<b>Abbildung A.22:</b> Bezogene experimentelle Last-Verformungs-Diagramme für Versuchsschalen aus nichtrostendem ferritischem Stahl mit $r/t = 400$ und Duplex-Stahl mit $r/t = 333$	149
<b>Abbildung A.23:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-3-D1, 3-fach überhöht	150
<b>Abbildung A.24:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-3-D2, 3-fach überhöht	150
<b>Abbildung A.25:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-3-F1, 3-fach überhöht	151
<b>Abbildung A.26:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-3-F2, 3-fach überhöht	151
<b>Abbildung A.27:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-1-D1, 3-fach überhöht	152
<b>Abbildung A.28:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-1-D2, 3-fach überhöht	152
<b>Abbildung A.29:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-1-F1, 3-fach überhöht	153
<b>Abbildung A.30:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-1-F2, 3-fach überhöht	153
<b>Abbildung A.31:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-0,6-D1, 3-fach überhöht	154
<b>Abbildung A.32:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-0,6-D2, 3-fach überhöht	154
<b>Abbildung A.33:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-0,5-F1, 3-fach überhöht	155
<b>Abbildung A.34:</b> Gemessene geometrische Imperfektionen des Probekörpers 150-0,5-F2, 3-fach überhöht	155
<b>Abbildung A.35:</b> Versuchskörper 150-3-D1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht	156
<b>Abbildung A.36:</b> Versuchskörper 150-3-D2 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	156
<b>Abbildung A.37:</b> Versuchskörper 150-3-F1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	157
<b>Abbildung A.38:</b> Versuchskörper 150-3-F2 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	157
<b>Abbildung A.39:</b> Versuchskörper 150-1-D1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	158
<b>Abbildung A.40:</b> Versuchskörper 150-1-D2 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	159
<b>Abbildung A.41:</b> Versuchskörper 150-1-F1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	160
<b>Abbildung A.42:</b> Versuchskörper 150-1-F2 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	161

<b>Abbildung A.43:</b>	Versuchskörper 200-0,5-F1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	162
<b>Abbildung A.44:</b>	Versuchskörper 200-0,5-F2 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	163
<b>Abbildung A.45:</b>	Versuchskörper 200-0,6-D1 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	164
<b>Abbildung A.46:</b>	Versuchskörper 200-0,6-D2 nach dem Versuch; Vorder- und Rückansicht, vor und nach dem Entlasten	165
<b>Abbildung A.47:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-3-D1, 3-fach überhöht	166
<b>Abbildung A.48:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-3-D2, 3-fach überhöht	166
<b>Abbildung A.49:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-3-F1, 3-fach überhöht	167
<b>Abbildung A.50:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-3-F2, 3-fach überhöht	167
<b>Abbildung A.51:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-1-D1, 3-fach überhöht	168
<b>Abbildung A.52:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-1-D2, 3-fach überhöht	168
<b>Abbildung A.53:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-1-F1, 3-fach überhöht	169
<b>Abbildung A.54:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-1-F2, 3-fach überhöht	169
<b>Abbildung A.55:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-0,6-D1, 3-fach überhöht	170
<b>Abbildung A.56:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-0,6-D2, 3-fach überhöht	170
<b>Abbildung A.57:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-0,5-F1, 3-fach überhöht	171
<b>Abbildung A.58:</b>	Beulmuster des Probekörpers 150-0,5-F2, 3-fach überhöht	171
<b>Abbildung B.1:</b>	Spannungs-Tangentenmodul-Diagramme mit Materialmodelldefinition nach DIN EN 1993-1-4 (EC), <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> (modif.) und weiteren $n$ -Koeffizienten mit hypothetischen Streckgrenze von $f_y = 10 \text{ N/mm}^2$ am Beispiel von Duplex 1.4462	173
<b>Abbildung B.2:</b>	Spannungs-Tangentenmodul-Diagramme mit Materialmodelldefinition nach DIN EN 1993-1-4 (EC), <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> (modif.) und weiteren $n$ -Koeffizienten mit nominellen Streckgrenze von $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$ am Beispiel von Duplex 1.4462	174
<b>Abbildung B.3:</b>	Spannungs-Tangentenmodul-Diagramme mit Materialmodelldefinition nach DIN EN 1993-1-4 (EC), <i>Arrayago</i> , <i>Real</i> und <i>Gardner</i> (modif.) und weiteren $n$ -Koeffizienten mit hypothetischen Streckgrenze von $f_y = 2500 \text{ N/mm}^2$ am Beispiel von Duplex 1.4462	175
<b>Abbildung B.4:</b>	Ausdruck einiger Beultragfähigkeitskurven durch Polynomfunktionen sechsten Grades	176
<b>Abbildung B.5:</b>	Graphische Darstellung der Beulkorrekturfaktoren $\psi_{\lambda, w/t}$ für nichtrostende Duplexstähle mit NB2	177
<b>Abbildung B.6:</b>	Graphische Darstellung der Beulkorrekturfaktoren $\psi_{\lambda, w/t}$ für nichtrostende Duplexstähle mit NB2	178

---

<b>Abbildung B.7:</b>	Graphische Darstellung der Beulkorrekturfaktoren $\psi\lambda, w/t$ für nichtrostende austenitische Stähle mit NB2	179
<b>Abbildung B.8:</b>	Graphische Darstellung der Beulkorrekturfaktoren $\psi\lambda, w/t$ für nichtrostende austenitische Stähle mit NB2	180
<b>Abbildung B.9:</b>	Graphische Darstellung der Beulkorrekturfaktoren $\psi\lambda, w/t$ für nichtrostende ferritischen Stähle mit NB2	181
<b>Abbildung B.10:</b>	Graphische Darstellung der Beulkorrekturfaktoren $\psi\lambda, w/t$ für nichtrostende ferritischen Stähle mit NB2	182

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b>	Schlankheits- und temperaturabhängige Beulkorrekturfaktoren nach Hautala und Schmidt [HS98], [HS99] und ECCS-R [RS13] für nichtrostende austenitische Stähle	20
<b>Tabelle 3.1:</b>	Versuchsprogramm für Beulversuche an axialgedrückten Kreiszyinderschalen aus den Stahlsorten 1.4521 und 1.4462	24
<b>Tabelle 3.2:</b>	Ergebnisse der Zugversuche für die Stahlsorte Ferrit 1.4521 (Mittelwerte)	28
<b>Tabelle 3.3:</b>	Ergebnisse der Zugversuche für die Stahlsorte Duplex 1.4462 (Mittelwerte)	29
<b>Tabelle 3.4:</b>	Mittelwerte der Geometrie der Probekörper	32
<b>Tabelle 3.5:</b>	Maximalwerte für die geometrischen Imperfektionen und $HQK$ für Toleranzparameter für Unrundheit $U_r, max$	39
<b>Tabelle 3.6:</b>	Maximalwerte für die geometrischen Imperfektionen und $HQK$ für Toleranzparameter für Vorbeule $U_0, max$	41
<b>Tabelle 3.7:</b>	Maximalwerte für die geometrischen Imperfektionen und $HQK$ für Toleranzparameter für Vorbeule $U_0, max$	42
<b>Tabelle 3.8:</b>	Vergleich der experimentellen Beultragfähigkeiten $FExp$ mit den nach DIN EN 1993-1-6 berechneten Beultragfähigkeiten $FRk$ in Abhängigkeit der Herstelltoleranz-Qualitätsklassen	52
<b>Tabelle 3.9:</b>	Vergleich der experimentellen Beultragfähigkeiten $FExp$ mit den berechneten Beultragfähigkeiten $FRk$ nach DIN EN 1993-1-6 und $FRk, red.$ nach ECCS-R [RS13] in Abhängigkeit der Herstelltoleranz-Qualitätsklassen	53
<b>Tabelle 4.1:</b>	Standardabweichung von den Quotienten der bezogenen experimentellen Beultragfähigkeiten und den bezogenen numerischen Beultragfähigkeiten	65
<b>Tabelle 4.2:</b>	Eingabewerte für die numerische Parameterstudie	70
<b>Tabelle 5.1:</b>	Werte für den Ramberg-Osgood-Koeffizienten $n$ zur Ermittlung der Sekantenmoduln nach DIN EN 1993-1-4, Anhang C	79
<b>Tabelle 5.2:</b>	Werte für den Ramberg-Osgood-Koeffizienten $n$ zur Ermittlung der Sekantenmoduln nach [BH17]	81
<b>Tabelle 5.3:</b>	Materialeigenschaften der für die Parameterstudie eingesetzten nichtrostenden Stähle	87
<b>Tabelle 5.4:</b>	Nachweis des Einflusses der gewählten geometrischen Imperfektion und Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen nach DIN EN 1993-1-6, 8.8.2(24)	89
<b>Tabelle 5.5:</b>	Ausnutzungsgrad und Einfluss der variablen Streckgrenze auf die Traglast im plastischen Bereich	106
<b>Tabelle 5.6:</b>	Zusammenfassende Übersicht der Parameter aus der FE-Studie	119

---

<b>Tabelle 5.7:</b>	Schlankheits- und imperfektionsabhängige Beulkorrekturfaktoren $\Psi(\lambda, wt)$ für nichtrostende Stähle	120
<b>Tabelle A.1:</b>	Gewicht der Ringe	138
<b>Tabelle A.2:</b>	Wanddicke der Kreiszyinderschalen	139
<b>Tabelle A.3:</b>	Länge der Kreiszyinderschalen vor dem Einbringen in die Ringe	140
<b>Tabelle A.4:</b>	Länge der Kreiszyinderschalen nach dem Einbringen in die Ringe	140

## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen

<i>BSN</i>	Beulsicherheitsnachweis
<i>DMS</i>	Dehnungsmessstreifen
<i>EC</i>	Eurocode
<i>FEM</i>	Finite-Elemente-Methode
<i>GMNA</i>	Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung
<i>GMNIA</i>	Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen
<i>GNA</i>	Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung
<i>GNIA</i>	Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen
<i>HQK</i>	Herstelltoleranz-Qualitätsklasse
<i>IML</i>	Institut für Metall- und Leichtbau
<i>KZS</i>	Kreiszyinderschale
<i>LA</i>	Lineare elastische Schalenberechnung
<i>LBA</i>	Lineare elastische Verzweigungs(eigenwert)-Berechnung
<i>MNA</i>	Materiell nichtlineare Berechnung
<i>UDE</i>	Universität Duisburg-Essen
<i>WR</i>	Walzrichtung

### Lateinische Symbole

$A_s$	Bruchdehnung
$C$	Koeffizient beim Beulsicherheitsnachweis
$E_0$	Anfangstangentenmodul
$E_s$	Sekantenmodul
$E$	Elastizitätsmodul
$F_{Ed}$	Einer Bemessungssituation entsprechende Einwirkung auf ein komplettes Tragwerk (Bemessungswert)
$F_{Rd}$	Rechenwert der Einwirkung im Zustand des höchsten Tragwerkswiderstandes (Bemessungswert)
$F_{Rk}$	Charakteristischer Beulwiderstand

---

$F_{Rpl}$	Plastischer Referenzwiderstand
$F_{Cr}$	Idealer elastischer Beulwiderstand
$F_{Exp}$	Experimentell ermittelte Beultragfähigkeit
$F_{FEM}$	Numerisch ermittelte Beultragfähigkeit
$F$	Allgemeine Einwirkung
$h$	Schalenhöhe
$R_{GMNA}$	Bezogener elastisch-plastischer Beulwiderstand, ermittelt mittels einer GMNA-Berechnung der perfekten Schale
$R_{GMNIA}$	Bezogener elastisch-plastischer Beulwiderstand, ermittelt mittels einer GMNIA-Berechnung der imperfekten Schale
$R_{Cr}$	Bezogener idealer Beulwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten, ermittelt mit einer LBA-Berechnung)
$R_d$	Lasterhöhungsfaktor, bezogen auf die Bemessungswerte
$R_k$	Bezogener charakteristischer Beulwiderstand (mit Indizes zur Identifizierung der Grundlage)
$R_{p0,2}$	0,2 % - Dehngrenze
$R_{pl}$	Bezogener plastischer Referenzwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten, ermittelt mit einer MNA-Berechnung)
$U_0$	Toleranzparameter für Vorbeule
$U_e$	Toleranzparameter für unplanmäßige Exzentrizität
$U_n$	Parameter für Imperfektionsamplitude bei numerischen Berechnungen
$U_r$	Toleranzparameter für Unrundheit
$d$	Durchmesser der Schale (bezogen auf die Schalenmittelfläche)
$e$	Unplanmäßige Exzentrizität zwischen den Schalenmittelflächen miteinander verbundener Bleche
$f_{eq}$	Von Mises-Vergleichsfließspannung
$f_u$	Zugfestigkeit
$f_y$	Streckgrenze
$l_g$	Messlänge für die Messung von Imperfektionen

$l_{gx}$	Messlänge für die Messung von Imperfektionen in Meridianrichtung
$l_{g\theta}$	Messlänge für die Messung von Imperfektionen in Umfangsrichtung
$l_{g\omega}$	Messlänge für die Messung von Imperfektionen über die Schweißnähte
$l$	Schalenslänge
$r_{Rd}$	Bezogener Bemessungsbeulwiderstand
$r_{Rk}$	Bezogener charakteristischer Beulwiderstand
$r_{Rpl}$	Bezogener plastischer Referenzwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten, ermittelt mit einer MNA-Berechnung)
$r$	Radius der Schalensmittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse (bezogen auf die Schalensmittelfläche)
$t$	Dicke der Schalenswandung
$w_0$	Vorverformung rechtwinklig zur Schalensmittelfläche
$u, v, w$	Verschiebung in Meridianrichtung $x$ , in Umfangsrichtung $y$ , normal zur Schalensmittelfläche $z$

## Griechische Symbole

$\alpha$	elastischer Beul-Abminderungsfaktor beim Beulsicherheitsnachweis
$\alpha_{xG}$	Geometrischer Abminderungsfaktor
$\alpha_{xI}$	Faktor für Imperfektionsabminderung
$\beta$	Faktor, der den plastischen Bereich beim Beulsicherheitsnachweis definiert
$\gamma$	Teilsicherheitsbeiwert
$\Delta l$	Axiale Verkürzung der Schale im Versuch
$\Delta w_0$	Amplitude der Vorbeule rechtwinklig zur Schalensmittelfläche, bezogen auf die Messlänge
$\eta$	Exponent in der Gleichung für die Beulkurve, der die Form beschreiben kann, Beulkurvenexponent
$\bar{\lambda}$	Bezogener Schalenschlankheitsgrad
$\bar{\lambda}_p$	Teilplastischer Grenzlankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$ , unterhalb dessen die Plastizität die Stabilität beeinflusst)

$\bar{\lambda}_0$	Vollplastischer Grenzschlankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$ , oberhalb dessen der Widerstand aufgrund von Instabilität oder Änderung der Geometrie gemindert wird)
$\nu$	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)
$\sigma$	Spannung
$\sigma_x$	Meridianspannung (bei KZS identisch mit Axialrichtung)
$\sigma_{x,Rcr}$	Ideale elastische Meridianbeulspannung
$\sigma_{x,Rk}$	Charakteristische Meridianbeulspannung
$\sigma_\theta$	Umfangsspannung
$\sigma_{eq}$	Von Miseses-Vergleichsspannung
$\tau$	Membranschubspannung
$\chi$	Elastisch-plastischer Beul-Abminderungsfaktor beim Beulsicherheitsnachweis
$\chi_h$	Härtungsgrenze
$\Psi$	Beulkorrekturfaktor nach <i>Hautala</i> und <i>Schmidt</i>
$\omega$	Bezogener Längenparameter einer KZS

## Indizes

<i>cr</i>	Idealer Beulwert
<i>d</i>	Bemessungswert
<i>F</i>	Einwirkung
<i>k</i>	Charakteristischer Wert
<i>max</i>	Maximalwert
<i>min</i>	Minimalwert
<i>nom</i>	Nennwert
<i>ov</i>	Gesamtschale
<i>pl</i>	Plastischer Wert
<i>R</i>	Widerstand
<i>u</i>	Traglastwert im Versuch, Verschiebung in Meridianrichtung
<i>x</i>	Meridiankoordinate

$\gamma$	Fließwert
$\theta$	Umfangskoordinate