

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 • E-Mail: info@shaker.de

Ersatzimperfektionen für den numerischen Beulsicherheitsnachweis stählerner Kreiszyinderschalen

von

Marco Gettel

Zusammenfassung:

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 Problembereich 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 Problembereich 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 Imperfektionsformen 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.