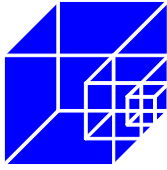


WEITERENTWICKLUNG DES BEULNACHWEISES VON WEA-TÜRMEN MIT ELASTO-PLASTISCHEN FEM-ANALYSEN



P. Schaumann¹, M. Seidel¹, L. Meesenburg²

¹ Universität Hannover, Institut für Stahlbau, Appelstr. 9A, 30167 Hannover
Tel.: 0511/762-3781, Internet: <http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

² AN Windenergie GmbH, Waterbergstraße 11, 28237 Bremen
Tel.: 0421/69458-0



Zusammenfassung

Auch bei Windenergieanlagen der neuen Generation dominiert die Ausführungsvariante mit stählernem Vollwandturm. Dabei werden Entwurf und Dimensionierung ganz wesentlich vom Tragsicherheitsnachweis gegen Schalenbeulen bestimmt. In diesem Beitrag werden die derzeit angewendeten Berechnungsverfahren neueren Methoden gegenübergestellt. Die Vorteile, die sich dadurch für Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ergeben, werden herausgestellt und es werden die Einflüsse von Konstruktionsdetails beschrieben.

1 Einleitung

Für Türme von Windenergieanlagen sind im Rahmen der Genehmigungsplanung folgende Nachweise zu erbringen [1]:

- Standsicherheitsnachweis
- Betriebsfestigkeitsnachweise
- Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Der Standsicherheitsnachweis beinhaltet den Beulsicherheitsnachweis. Dieser wird i.a. nach DIN 18800 Teil 4 [2] erbracht.

Erfahrungen in der Genehmigungspraxis haben gezeigt, daß die traditionelle Nachweisführung verbesserungsfähig war. Daher hat AN Windenergie GmbH, Bremen, ein Forschungsprojekt initiiert, um Grundlagen für einen sicheren und wirtschaftlichen Nachweis gegen Schalenbeulen zu legen. Das Forschungsprojekt beinhaltete den Vergleich vorhandener Normen untereinander sowie den Vergleich mit Nachweisverfahren auf Basis der FE-Methode.

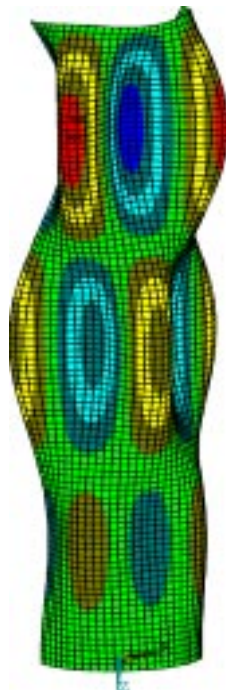


Abb. 1: Beulfigur einer Kreiszylinderschale unter Axialdruck

2 Vergleich verschiedener nationaler und europäischer Bemessungsverfahren

Den etablierten Nachweiskonzepten ist gemeinsam, daß sie auf der Auswertung von Versuchen basieren und daraus abgeleitete Abminderungsfaktoren verwenden. Die ideale Beulspannung wird für die Grundfälle Axialdruck, Umfangsdruck und Schub mit Näherungsformeln bestimmt, die auf die klassische

lineare Schalenbeultheorie nach Flügge zurückgehen. Andere Fälle müssen auf diese Grundfälle zurückgeführt werden.

2.1 DIN 18800 Teil 4 [2]

Der Nachweis nach DIN 18800 gliedert sich in folgende Schritte (Bezeichnungen siehe [2]):

1. Bestimmung der idealen Beulspannung $\sigma_{x,si}$
2. Berechnung des bezogenen Schalenschlankheitsgrades $\bar{\lambda}_s = \sqrt{f_{y,k} / \sigma_{si}}$
3. Ermittlung des Abminderungsfaktors κ
4. Ermittlung der Grenzbeulspannung:

$$\sigma_{xS,R,d} = \kappa \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

Da nur der Grundfall Axialdruck geregelt ist, konnte bisher der überwiegende Biegeanteil, wie er bei Windenergieanlagen auftritt, nicht gebührend berücksichtigt werden. Nach neuesten Forschungsergebnissen [3] wird vorgeschlagen, die ideale Beulspannung bei Biegedruck gegenüber dem reinen Axialdruck zu erhöhen [4].

Gegenüber DIN 18800-4 fallen die Nachweise durch die Berücksichtigung dieser Modifikation gerade bei langen Schalenabschnitten günstiger aus.

Türöffnungen können nach DIN 18800-4 nicht nachgewiesen werden. Ebenso gibt es keine Angaben über den Einfluß von Ringsteifen.

2.2 Eurocode 3 Teil 1-6 [5]

Die Nachweisführung nach Eurocode 3 ist im Prinzip mit der nach DIN 18800-4 identisch. Bezüglich der Abminderungsfaktoren gibt es Unterschiede:

- die Abminderungsfaktoren sind von der Herstellungsgenauigkeit abhängig. Es wird unterschieden in drei Qualitätsstufen („Quality Classes“). Wenn höhere Fertigungsstandards nachgewiesen werden können, dürfen günstigere Abminderungsfaktoren verwendet werden;

- die Abminderungsfaktoren für Axialdruck sind nicht nur vom Schalenschlankheitsgrad abhängig, sondern auch vom Radius/Wanddicken-Verhältnis (r/t -Verhältnis) der Schale.

In Abb. 2 ist ersichtlich, daß die Abminderungsfaktoren nach Eurocode 3 im Schlankheitsbereich der Windenergieanlagen über dem Abminderungsfaktor κ_2 der DIN 18800-4 liegen.

Zudem ist der Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialeite konstant mit $\gamma_M = 1,1$ anzusetzen; nach DIN 18800-4 ist bei sehr imperfektionsanfälligen Beulfällen ein größeres γ_M zu verwenden.

Die Nachweise nach EC3 fallen dadurch etwas günstiger aus als nach DIN 18800-4.

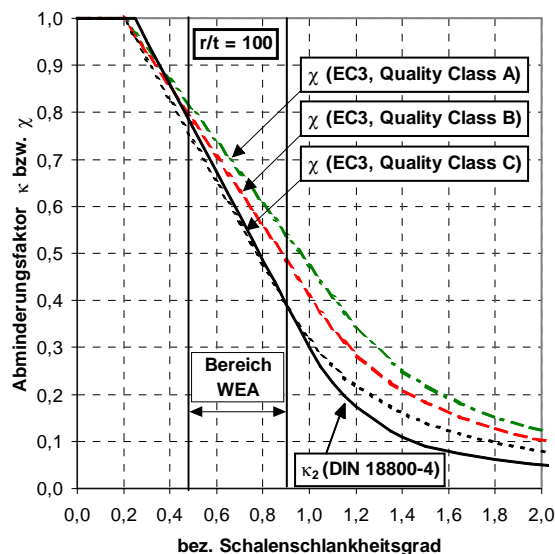


Abb. 2: Abminderungsfaktoren für Axialdruck nach DIN 18800-4 und Eurocode 3

Nach Ansicht der Verfasser spricht nichts dagegen, die Regelung für das Biegebeulen nach [4] sinngemäß auch in den Nachweis nach Eurocode 3 einzuführen.

2.3 ECCS-Recommendations [6]

Das Nachweisverfahren nach den ECCS-Recommendations unterscheidet sich von den Verfahren nach DIN und Eurocode. Die Eingangswerte sind allerdings prinzipiell gleich.

Durch eine sehr konservative Interaktionsformel fallen die Nachweise in Bereichen, in denen der Schub nicht vernachlässigbar ist (normalerweise also am Turmkopf) ungünstiger aus als nach DIN 18800-4 und Eurocode 3. Gegenüber letztgenannten ist allerdings in den ECCS-Recommendations die Besserstellung der Biegung gegenüber dem Axialdruck in der Norm verankert. Im Bereich des Turmfusses erhält man mit den ECCS-Recommendations ähnliche Ergebnisse wie mit DIN 18800-4 und EC 3, wenn bei letztgenannten die Modifizierung des Bemessungsverfahrens im Hinblick auf das Biegebeulen angewendet wird.

2.4 Danish Standard DS 449 [7]

Im Nachweisverfahren der DS 449 ist eine Schubbeanspruchung nicht geregelt. Ein Vergleich mit den anderen Nachweisverfahren ist somit nicht möglich.

3 Nachweise mit Hilfe von Finite-Element-Berechnungen

Im Entwurf der Richtlinie 017 des Deutschen Ausschusses für Stahlbau (DASt) [8] sind drei verschiedene Konzepte für den Nachweis mit Hilfe numerisch ermittelter Beulwiderstände angeboten, die sich im Grad des numerischen Aufwandes unterscheiden.

3.1 Konzept 1

Nach Konzept 1 werden der ideale Beulwiderstand (Verzweigungslast, Abb. 1) und der plastische Bezugswiderstand der Schale numerisch, d.h. mit Hilfe von FE-Berechnungen, ermittelt. Das Nachweisverfahren wird ansonsten analog zur DIN 18800-4 durchgeführt.

3.2 Konzept 2

Nach Konzept 2 wird zusätzlich der ideal-elastisch-plastische Beulwiderstand der geometrisch perfekten Schale numerisch ermittelt; die Berechnung ist im Gegensatz zu Konzept 1 geometrisch nichtlinear durchzuführen. Die Abminderung, die infolge von Plastizierungen eintritt, ist bei diesem Konzept also bereits in der numerischen Berechnung erfaßt. Der reale Beulwiderstand wird mit einem speziellen Abminderungsfaktor α ermittelt, der nur den Einfluß der Imperfektionen beinhaltet. Dieser Faktor wurde aus dem Abminderungsfaktor κ_2 der DIN 18800-4 durch Eliminieren des implizit enthaltenen „plastischen Anteils“ am Beispiel der axialgedrückten Kreiszylinderschale hergeleitet.

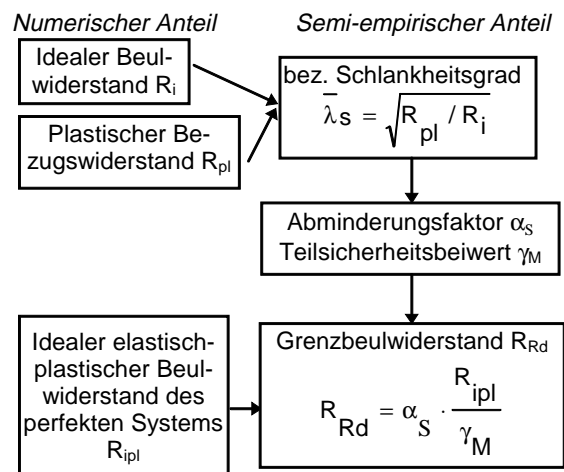


Abb. 3: Ablaufschema Konzept 2

3.2.1 Konzept 3

Nach Konzept 3 werden imperfektionsbehaftete Modelle berechnet. Die in das Rechenmodell eingeführten Imperfektionen sind Ersatzimperfektionen,

die die Einflüsse von geometrischen und strukturellen Imperfektionen abdecken sollen.

Die Schwierigkeit liegt darin, die maßgebende (ungünstigste) Imperfektion mit der dazugehörigen Imperfektionsamplitude zu finden. Die derzeit vorhandene Rechenleistung begrenzt hier die Möglichkeiten, da verschiedene Varianten gerechnet werden müssen, so daß der Aufwand extrem hoch wird [10]. Je nach Imperfektionsform müßte zudem die Elementierung des FE-Modells geändert werden, damit in Bereichen von Spannungskonzentrationen ein ausreichend feines Netz gewährleistet werden kann. Das könnte mit aufwendigen Methoden der Netzadaption geschehen.

Dieses Problem ist noch nicht gelöst, so daß die Verfasser von einer Anwendung dieses Konzeptes für Bemessungszwecke derzeit noch abraten.

3.3 Vergleich mit DIN 18800 und Eurocode

Die Nachweise nach Konzept 2 liegen generell etwas günstiger als die Nachweise nach DIN 18800 und EC3. Wenn die Modifizierung für das Biegebeulen verwendet wird, findet man in den ungestörten Bereichen eine gute Übereinstimmung zwischen DIN 18800-4, Eurocode 3 und DAST-Richtlinie 017.

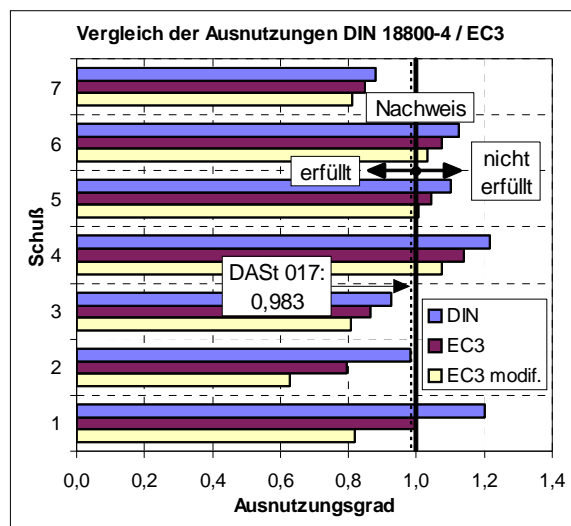


Abb. 4: Vergleich DIN 18800-4, EC 3 (ohne und mit Modifizierung für das Biegebeulen) sowie DAST-Richtlinie 017, Konzept 2 (nur ein Wert für den gesamten Turm!)

3.4 Empfehlung für die Berechnung nach DAST-Richtlinie 017, Kapitel 6

Die DAST-Richtlinie 017 erlaubt die sichere und wirtschaftliche Bemessung der Türme von Windenergieanlagen gegen Schalenbeulen, wenn die richtigen Werte gemeinsam in den Nachweis eingeführt werden. Insbesondere die Verwendung eines falschen plastischen Bezugswiderstandes η_{pl} kann zu unsicheren Bemessungsergebnissen führen. Folgende Nachweisvarianten sind möglich:

1. Nachweis nach Konzept 1 mit dem minimalen η_{pl} aus den Membranschnittgrößen im ungestörten Bereich (i.a. auf der Leeseite des Turmes außerhalb

des Bereiches der Türöffnung) sowie dem minimalen Verzweigungsfaktor η_i . Die Verwendung des minimalen η_{pl} , das i.a. durch lokale Spannungsspitzen entsteht, liegt hier stärker auf der sicheren Seite.

2. Nachweis nach Konzept 2, wobei der minimale Verzweigungsfaktor für den gesamten Turm gemeinsam mit dem η_{pl} an der Versagensstelle (Membranschnittgrößen ohne Berücksichtigung lokaler Störungen) in den Nachweis eingeführt werden. Wenn hier ein durch lokale Spannungsspitzen verursachtes niedrigeres η_{pl} verwendet wird, liegt der Nachweis auf der unsicheren Seite!

4 Detailuntersuchungen

Mit Hilfe des Konzeptes 2 der DAST-Richtlinie 017 wurden spezielle Konstruktionselemente untersucht. Dafür wurden z.T. sehr umfangreiche Parameterstudien durchgeführt.

4.1 Ringsteifen

Ringsteifen, die bestimmten Anforderungen an die Mindeststeifigkeit genügen, begrenzen die Länge eines Zylinderabschnittes und führen bei reinem Axialdruck zu einer Erhöhung der idealen Beulspannung. Die Angaben aus [11] können zu einer zu konservativen Bemessung führen. Eine differenziertere Betrachtung ist nach [12] möglich. Die Angaben, die zur Mindeststeifigkeit in [6] gemacht und in [4] zitiert werden, sind bei den Verhältnissen von Windenergieanlagen nicht zutreffend und sollten nicht angewendet werden.

Bei überwiegender Biegebeanspruchung ist dieser Effekt allerdings nicht zu beobachten. Die Schale beult hier lokal, so daß Ringsteifen keinen Einfluß haben (Abb. 4). Erst bei sehr langen und dünnen Schalen können Ringsteifen wieder notwendig sein, wenn der Brazier-Effekt [14] zu einer Abplattung des Querschnittes führt. Die Verhältnisse bei Windenergieanlagen sind aber i.a. nicht in einem Bereich, in dem diese Versagensform maßgebend wird. Durch die geometrisch nichtlineare Berechnung des Gesamtsystems nach Konzept 2 ist allerdings sichergestellt, daß dieser Effekt berücksichtigt wird.

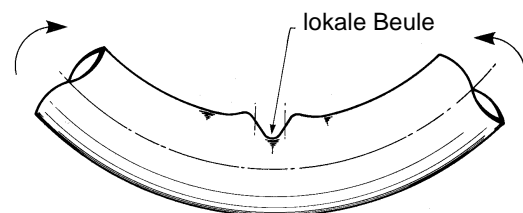


Abb. 5: Lokales Versagen unter reiner Biegebeanspruchung

4.2 Türöffnungen

Für den Nachweis der Türöffnungen gibt es ebenfalls Angaben in der DAST-Richtlinie 017 [8]. An diesen Nachweis ist allerdings die Forderung nach vorgebundenen Längssteifen und evtl. Ringsteifen geknüpft. Für die bei Windenergieanlagen beliebte

„Kragenlösung“ kann dieser Nachweis also schon formal nicht verwendet werden. Die numerischen Berechnungen haben auch gezeigt, daß nach [8] zu günstige Ergebnisse ermittelt werden.

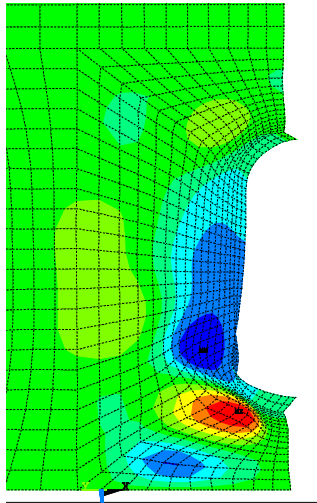


Abb. 6: Beulmuster an der Türöffnung

Der Nachweis mit Hilfe numerisch ermittelter Beulwiderstände stellt für Türöffnungen, die die konstruktiven Anforderungen nach [8] nicht erfüllen, die einzige Möglichkeit zur Nachweisführung dar!

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verwendung von numerisch ermittelten Beulwiderständen führt gegenüber den etablierten Handrechenverfahren bei korrekter Anwendung zu einer Verbesserung des Designs von Türmen für Windenergieanlagen.

Insbesondere werden Details, die mittels Handrechnung nicht erfaßt werden können, einer Berechnung zugänglich, so daß potentielle Schwachstellen der Konstruktion erkannt werden.

Voraussetzung dafür ist, daß die Methoden richtig angewandt werden. Die Erkenntnisse, die dazu in diesem Forschungsvorhaben gewonnen wurden, werden bei der Neufassung der DIBt-Richtlinie berücksichtigt.

Die Autoren danken dem Senat der Stadt Bremen für die Förderung dieses Forschungsvorhabens.

6 Literatur

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik (Berlin): „Richtlinie für Windkraftanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“, Fassung Juni 1993
- [2] DIN 18800 „Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion“, Ausgabe November 1990
- [3] Speicher, G.; Saal, H.: Beulen biegebeanspruchter, langer Kreiszyklinderschalen aus Stahl – Versuch, Theorie und Bemessung. In: *Stahlbau* 67 (1998), Nr. 6, S. 443-451

- [4] Beuth-Kommentare: „Stahlbauten – Erläuterungen zur DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4“; 3. Auflage 1998, Beuth Verlag Berlin
- [5] DIN V ENV 1993-1-6: Eurocode 3: Design of Steel Structures; Part 1-6: General Rules: Supplementary Rules für the Strength and Stability of Shell Structures, August 1997
- [6] Buckling of Steel Shells - European Recommendations; ECCS – Technical Committee 8 – Structural Stability; Technical Working Group 8.4 – Stability of Shells. 4th Edition 1988.
- [7] Dansk Standard 449: Dansk Ingeniørforening's Code of Practice for Pile-Supported Offshore Steel Structures, 1. Edition April 1983
- [8] DAST-Richtlinie 017 Entwurf 1992 „Beulsicherheitsnachweise für Schalen“, Deutscher Ausschuß für Stahlbau; Stahlbau-Verlagsgesellschaft Köln
- [9] Det Norske Veritas (DNV): Classification Notes – Buckling strength analysis of mobile offshore units, Note No. 30.1. Hovik, DNV 1987
- [10] Esslinger, M.: Rechenbeispiele zum Entwurf der DAST-Richtlinie 017, Kapitel 6. In: *Stahlbau* 62 (1993), Nr. 9, S. 269-280
- [11] Esslinger, M.: Über die Endringe von axialgedrückten Kreiszyklinderschalen. In: *Stahlbau* 63 (1994), Nr. 7, S. 200-205 und Nr. 11, S. 361
- [12] Odland, J.: Buckling resistance of unstiffened and stiffened circular cylindrical shell structures. In: Norwegian Maritime Research No. 3, 1978 Vol. 6
- [13] Ellinas, C. P., Supple, W. J., Walker, A. C. (Hrsg.): Buckling of offshore structures - a state-of-the-art-review. London/Toronto/Sydney/New York: Granada 1984
- [14] Lausberg, Helmut H.: Die Biegestabilität langer dünnwandiger kreiszyklinderscher Schalen – Der Brazier-Effekt. Dissertation Universität Stuttgart 1977
- [15] Schaumann, P.: Türme für die Megawatt-Klasse – Eine Herausforderung für den Stahlbau. Beitrag zur DEWEK '96