

# **Tragverhalten und Ermüdungsfestigkeit von Sandwichtürmen für Windenergieanlagen**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Christian Keindorf  
geboren am 02.08.1976 in Stendal

Hannover 2009

## **Prüfungskommission**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer  
Prüfungsmittglied: Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus  
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes

Tag der mündlichen Prüfung: 03.07.2009

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Heft 25

**Christian Keindorf**

**Tragverhalten und Ermüdungsfestigkeit von  
Sandwichtürmen für Windenergieanlagen**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

### **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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2009

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Institut für Stahlbau

Appelstr. 9A

30167 Hannover

<http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8791-7

ISSN 1617-8327

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)

## Vorwort

Im November 2004 erhielt ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover die Gelegenheit, eine Entwurfsstudie über Sandwichtürme für Windenergieanlagen anzufertigen. Diese neue Turmvariante wissenschaftlich als Gesamtkonzept zu untersuchen, war meine Motivation für die vorliegende Dissertation. Die Finanzierung der Forschungsarbeiten erfolgte teilweise durch das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderte Projekt GROW sowie durch begleitende Unterstützungen aus der Industrie. Hierfür sei herzlich gedankt.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann, bin ich für seine Betreuung und wertvollen Anregungen zur Dissertation zu besonderem Dank verpflichtet. Sein Vertrauen und der durch ihn geschaffene Freiraum für meine Forschungstätigkeit haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummerhofer ganz herzlich. Er motivierte mich bereits während meiner Studienzeit an der TU Braunschweig durch seine interessanten Vorlesungen für konstruktive Aufgaben im Bereich des Stahlbaus.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil Raimund Rolfes sei für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss und sein großes Interesse an der Arbeit herzlich gedankt. Des Weiteren gilt mein aufrichtiger Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus für seine wohlwollende Unterstützung sowie Bereitschaft, als Prüfer zur Verfügung zu stehen.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Stahlbau danke ich für die gute Zusammenarbeit und Diskussionsbereitschaft. Insbesondere die fachlichen Anregungen von Dr.-Ing. Cord Böker, Dr.-Ing. Patric Kleineidam, Dipl.-Ing. Stephan Lochte-Holtgreven, Dipl.-Ing. Tim Rutkowski, Dr.-Ing. Marc Seidel und Dipl.-Ing. Fabian Wilke waren mir eine große Hilfe.

Mein herzlicher Dank gilt auch allen Technikern der Versuchshalle und MPA Bau Hannover für ihre Hilfsbereitschaft bei der Durchführung von Experimenten. Vor allem dem „Sandwich-Team“ mit Karl-Heinz Hentschel, Björn Vortmann, Albert Jacob und Dipl.-Ing. Christian Fricke, die im erheblichen Maße mit ihrem Engagement die erfolgreiche Durchführung von vielen Versuchsreihen erst ermöglicht haben, bin ich zu großem Dank verpflichtet.

Im erweiterten Themenfeld dieser Dissertation sind mehrere Diplom-, Master- und Studienarbeiten entstanden. Den jeweiligen Verfassern danke ich für ihren Arbeitseinsatz und die wertvollen Anregungen. Mein besonderer Dank gilt den Absolventinnen und Absolventen der Leibniz Universität Hannover, die mich zugleich als wissenschaftliche Hilfskraft unterstützt haben. Dazu gehören Frau Dipl.-Ing. Mareike Micklely und Frau Dipl.-Ing. Sonja Zacke sowie die Herren Dipl.-Ing. Nils Engelke, Dipl.-Ing. Björn Helfers, Dipl.-Ing. Thomas Kirsch, Dipl.-Ing. Thomas Klaiber, Dipl.-Ing. Hergen Knorr und Dipl.-Ing. Michael Lange.

Zudem möchte ich allen weiteren wissenschaftlichen Hilfskräften Dank sagen, die sowohl bei den experimentellen als auch numerischen Untersuchungen ihren Beitrag geleistet haben.

Mein besonderer Dank richtet sich auch an meine Familie, insbesondere an meine Eltern, die mir den privaten Freiraum für diese Arbeit geschaffen haben und mir jederzeit moralisch zur Seite standen. Nicht zuletzt gebührt mein innigster Dank meiner Freundin Peggy für ihre Geduld und ihr Verständnis während dieser Zeit.



Für die Kooperation und Unterstützung während meiner Forschungsarbeiten danke ich den folgenden Unternehmen und Institutionen:

BASF SE, Ludwigshafen

BRUGG Rohrsysteme GmbH, Wunstorf

CADFEM GmbH, Burgdorf

Densit A/S, Aalborg, Denmark

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover

Eiffel Deutschland Stahltechnologie GmbH, Duisburg

Elastogran GmbH, Lemförde

Eurosonix, Ehingen/Donau

FRAMEWORK, Bremen

Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg

GOM – Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Braunschweig

HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt

Institut für Bauphysik, Leibniz Universität Hannover

Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover

Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

Institut für Statik und Dynamik, Leibniz Universität Hannover

Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

Intelligent Engineering, Ottawa, Canada

Materialprüfanstalt für das Bauwesen, MPA Bau, Hannover

MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG, Bottrop

Mechanische Bearbeitung Horl, Wunstorf

MeKo Laserstrahl-Materialbearbeitung, Sarstedt

MTS Systems GmbH, Berlin

Multibrid Entwicklungsgesellschaft mbH, Bremerhaven

Oevermann GmbH & Co. KG, Münster

PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH & Co. KG, Essen

PITEC GmbH, Heudorf

REpower Systems AG, Osnabrück

RSI GmbH, Oberursel

SIAG Schaaf Industrie AG, Dernbach

SIAG Tube & Tower GmbH, Leipzig

Sika Deutschland GmbH, Stuttgart

SLV Hannover, Hannover

V & M DEUTSCHLAND GmbH, Düsseldorf

Warnow Design GmbH, Rostock



## Kurzfassung

Die Leistung und Größe von Windenergieanlagen ist in den letzten Jahren immer weiter angestiegen. Damit erhöhen sich zwangsläufig auch die Anforderungen an die Turmkonstruktionen, die bislang als Stahlrohr-, Spannbeton- oder Fachwerkturm zur Ausführung kommen. Als Alternative dazu werden in dieser Arbeit mehrere Varianten von Sandwichtürmen untersucht, mit denen die Schalenstabilität und Tragfähigkeit gesteigert werden können. Eine Sandwichturmsektion besteht dabei grundsätzlich aus einem stählernen Innen- und Außenrohr, die durch einen dazwischen liegenden Verbundwerkstoff vollflächig ausgesteift werden. Als Verbundwerkstoffe können pumpfähige Elastomere, Epoxidharze und Vergussmörtel zum Einsatz kommen, die vom Turmfuß aufsteigend in den Ringspalt gefüllt werden. Neben der Steifigkeit und Druckfestigkeit der Füllmaterialien ist deren Verbundfestigkeit von essentieller Bedeutung für das Tragverhalten des Sandwichquerschnitts, der ohne zusätzliche Verbundmittel auskommen soll.

Für die neuen Sandwichturmsektionen wurden analytisch die Querschnittstragfähigkeiten für Axial- und Biegebeanspruchungen bestimmt. Die elastische Momententragfähigkeit erhöht sich um bis zu 30% gegenüber einer Stahlurmsektion mit gleichem Stahleinsatz, weil sich das Füllmaterial in der Kernschicht am Lastabtrag auf der Biegedruckseite beteiligt. Ferner wurde die Schalenstabilität mit der Theorie für laminierte Kreiszyinderschalen untersucht. In Ergänzung fanden Beulversuche an Sandwichzylindern und begleitende numerische Beulanalysen statt, um ein Nachweiskonzept für das Schalenbeulen vorschlagen zu können. Die Schalenstabilität konnte bei entsprechend großer Dicke und Steifigkeit der Kernschicht soweit gesteigert werden, dass die Streckgrenzen des Innen- und Außenrohrs voll ausgenutzt werden. Damit ist prinzipiell auch der Einsatz von höherfesten Stählen für Türme von Windenergieanlagen denkbar. Zum Beispiel kann die Stahltonnage durch die Verwendung eines S460 um 50% gegenüber einer Variante mit einem S235 reduziert werden. Im Vergleich zu einer Stahlurmsektion sind dann trotz des zusätzlichen Kernschichtmaterials noch Einsparungen beim Gesamtgewicht möglich.

Aufgrund der geringeren Blechdicken sind keine Streckgrenzenabminderungen mehr erforderlich. Außerdem wirkt sich der Blechdickeneffekt positiv auf die Ermüdungsfestigkeit aus, weshalb ein Sandwichturm mit einem S355 eine geringere Auslastung beim Ermüdungsnachweis aufweist als ein vergleichbarer Stahlurm. Obwohl bei den Sandwichvarianten mit dem S460 höhere Spannungsschwingbreiten auftreten, ist eine Kerbfallklasse 100 ausreichend, die mit effizienten Schweißnahtnachbehandlungsmethoden noch weiter gesteigert werden kann.

Favorisiert wird eine Kombination als Stahl-Sandwichturm. Der Sandwichquerschnitt ist dabei nur im unteren Turmbereich vorgesehen, in dem hohe Schalenstabilitäten und große Blechdicken erforderlich sind. Mit dem Einsatz von zwei dünneren sowie höherfesten Stahlrohren reduziert sich die Netto-Schweißzeit auf 15%, wodurch der Mehraufwand bei den anderen Fertigungsschritten teilweise kompensiert wird. Für die Turmsektionen mit  $D > 4.3$  m wird ein Fertigungskonzept mit längsorientierten Teilschalen entwickelt, womit nicht nur das Transportproblem über Land gelöst, sondern auch die Anzahl der ermüdungskritischen Rundnähte minimiert wird. Ferner wird eine neue Verbindungstechnik zwischen den Turmsektionen vorgestellt, die ohne ermüdungskritische Ringflansche und wartungsintensive Schrauben auskommt. Der so genannte Sandwich Joint gehört zu den zweischnittigen Rohr-in-Rohr-Verbindungen, bei denen die Kräfte über eine gewisse Überlapplänge weitergeleitet werden. Die Trag- und Ermüdungsfestigkeit des Sandwich Joints lässt sich durch die Anordnung von Schubrippen entlang den Rohrmantelflächen signifikant steigern. Letztendlich werden auch Montagetechniken entwickelt, die das Aufstellen der Sandwichtürme auf der Baustelle ermöglichen.

## Abstract

The performance and the dimensions of wind energy converters have been increased significantly within the last few years. Thus, the requirements on tower constructions will also increase following the development of bigger turbines. Usually tubular steel and prestressed concrete towers are chosen as support structures for wind energy converters. The structural design of tubular steel towers is driven mainly by ultimate and fatigue limit state. Especially the shell buckling leads to large dimensions and thicknesses for the steel sections. Therefore, a new kind of tower, the so called sandwich tower, has been developed as an alternative solution with the aim of increasing the shell stability. The sandwich tower consists of an inner and outer steel shell which are bonded together with a core material between them. That works as a full space stiffener. Different composites like elastomer, epoxy resin, or grout are investigated as pumpable materials. Besides the stiffness and compressive strength, the bonding strength of the composites is essential for the bearing behaviour and stability of the whole sandwich cross section.

The cross section of the sandwich shell has a 30% higher moment capacity compared to a steel section with the same steel tonnage, because the core material contributes on the compression side of the bending moment. With a composite shell theory the stability of such double-skin shell constructions was estimated analytically. The main objective for the developed design concept was to find the best combination of steel faces with a core material in the ultimate limit state. Furthermore, buckling tests on sandwich cylinders have been carried out to analyse the influence of different core materials. The sandwich cylinders have a higher shell stability, which was also attested by numerical buckling analyses. The buckling load could be increased over the elastic limit of the inner and outer steel face. Thus, the use of high-strength steels for sandwich towers is theoretically possible, so that 50% of steel tonnage can be saved by using a steel grade S460 instead of a S235. In this way the overall weight of a sandwich section is lower than that of a comparable steel section despite of the additional mass due to the core material.

Because of the thinner shells no reduction of the yield stress is necessary. Furthermore, the thinness effect has a positive influence on the fatigue resistance of the welds. Thus, a sandwich tower with S355 has a higher fatigue limit than a steel tower with the same steel grade. Although the stress ranges are higher for a sandwich tower with S460 the fatigue class FAT 100 can be satisfied the fatigue design. In addition, effective methods for post weld treatment can be used to increase the fatigue resistance significantly.

As a result of the investigations a combination as steel-sandwich tower is favoured where the sandwich is only planned for the lower tower section to get higher stability simultaneously with thinner shells. Therefore, the effective welding time can be decreased to 15% when the shells are made of high strength steels. The saved welding time compensates partially the additional time for the other fabrication processes. Especially for tower sections with  $D > 4.3$  m a new fabrication concept with longitudinal partial shells is developed to offer the transportation onshore and to minimize the number of critical circumferential welds. Furthermore, a new kind of connection between the tower sections is presented without ring flanges and bolts. The so called sandwich joint belongs to category of doubled overlap tube-in-tube-connections which can transmit the forces and moments along an overlapped length. Thus, the composite material works also as a component for transmission of forces between the sections. The ultimate and fatigue limit state of the sandwich joint can be increased significantly with shear keys along the skin surface of the shells. Finally, some erection techniques are investigated for the assembly of sandwich towers at onshore and offshore locations.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1.	PROBLEMSTELLUNG .....	1
1.2.	MOTIVATION DER ARBEIT .....	1
1.3.	AUFBAU DER ARBEIT .....	3
<b>2.</b>	<b>STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG</b> .....	<b>5</b>
2.1.	BEMESSUNG VON TURMKONSTRUKTIONEN FÜR WINDENERGIEANLAGEN .....	8
2.1.1.	Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	10
2.1.2.	Grenzzustand der Ermüdung .....	14
2.1.3.	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	21
2.2.	VERBINDUNGSTECHNIKEN FÜR TRAGSTRUKTUREN VON WINDENERGIEANLAGEN .....	22
2.3.	FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN .....	24
<b>3.</b>	<b>KONZEPTE UND WERKSTOFFE FÜR HYBRIDE TURMKONSTRUKTIONEN</b> .....	<b>27</b>
3.1.	ALLGEMEINES .....	27
3.2.	BERECHNUNGSGRUNDLAGEN .....	28
3.2.1.	Koordinatensysteme .....	29
3.2.2.	Materialkennwerte und Werkstoffgesetze für Stahl .....	29
3.2.3.	Vergleich zwischen stählernen Turmsektionen unterschiedlicher Stahlgüte .....	30
3.3.	EIN NEUES TURMKONZEPT .....	31
3.4.	MATERIALKENNWERTE UND WERKSTOFFGESETZE DER FÜLLMATERIALIEN .....	32
3.4.1.	Beton (Concrete) .....	34
3.4.1.1.	Spannungs-Dehnungsbeziehung .....	35
3.4.1.2.	Verbundverhalten .....	36
3.4.2.	Vergussmörtel (Grout) .....	39
3.4.2.1.	Spannungs-Dehnungsbeziehung .....	39
3.4.2.2.	Verbundverhalten .....	40
3.4.3.	Elastomer (Polyurethan) .....	44
3.4.3.1.	Spannungs-Dehnungsbeziehung .....	44
3.4.3.2.	Verbundverhalten .....	45
3.4.4.	Gegenüberstellung der Füllmaterialien .....	48
3.5.	EIGENFREQUENZEN DER NEUEN SANDWICHTURMVARIANTEN .....	49
<b>4.</b>	<b>TRAGFÄHIGKEIT VON SANDWICHTURMSEKTIONEN</b> .....	<b>53</b>
4.1.	ALLGEMEINES .....	53
4.2.	QUERSCHNITTSTRAGFÄHIGKEIT .....	53
4.2.1.	Axiale Druckbeanspruchung .....	54
4.2.2.	Axiale Zugbeanspruchung .....	59

4.2.3.	Biegebeanspruchung .....	59
4.2.3.1.	Plastische Momententragfähigkeit .....	61
4.2.3.2.	Elastische Momententragfähigkeit .....	63
4.2.3.3.	Verbundverhalten unter Biegebeanspruchung .....	66
4.2.4.	Torsionsbeanspruchung .....	68
4.3.	ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM SCHALENBEULEN .....	69
4.3.1.	Stählerne Kreiszyinderschalen .....	69
4.3.2.	Doppelwandige Kreiszyinderschalen .....	70
4.3.3.	Lineare Beulanalysen (LA) .....	72
4.3.4.	Bemessungsvorschlag für den Beulnachweis .....	76
4.3.4.1.	Beulnachweis für Axialdruck .....	76
4.3.4.2.	Beulnachweis für Biegung .....	79
4.3.4.3.	Beulnachweis für Torsion .....	82
4.4.	MASSENBALANZEN .....	84
4.5.	LOKALE INSTABILITÄTEN .....	89
4.5.1.	Fließen oder Bruch der Deckbleche .....	90
4.5.2.	Schubversagen des Kerns .....	90
4.5.3.	Knittern der Deckbleche .....	91
4.5.4.	Globales Beulen .....	91
4.5.5.	Schubbeulen .....	91
4.5.6.	Lokales bzw. interzelluläres Beulen .....	91
4.5.7.	Versagen infolge seitlicher Stoßbelastung .....	92
4.6.	BEULVERSUCHE MIT SANDWICHZYLINDERN UNTER AXIALDRUCK .....	92
4.6.1.	Versuchsaufbau .....	93
4.6.2.	Prüfkörper .....	93
4.6.3.	Injektion der Füllmaterialien .....	95
4.6.4.	Messtechnik .....	96
4.6.5.	Traglastkurven .....	97
4.6.6.	Überprüfung der mittragenden Wirkung von Kernschichten .....	99
4.6.7.	Optische 3D-Verformungsanalyse .....	100
4.6.8.	Knittern als lokales Versagenskriterium (face wrinkling) .....	102
4.7.	NUMERISCHE SIMULATION ZUR SCHALENSTABILITÄT VON SANDWICHZYLINDERN ..	107
4.7.1.	Geometrisch und materiell nichtlineare Beulanalysen mit Imperfektionen .....	107
4.7.2.	Numerische Analyse des lokalen Knittereffekts .....	112
<b>5.</b>	<b>ERMÜDUNGSFESTIGKEIT VON SANDWICHTURMSEKTIONEN .....</b>	<b>118</b>
5.1.	ALLGEMEINES .....	118
5.2.	ERMÜDUNGSFESTIGKEIT DER DECKBLECHE UND SCHWEIßVERBINDUNGEN .....	119
5.2.1.	Ermüdung infolge des Anlagenbetriebs .....	120

5.2.2.	Ermüdung infolge des Seegangs .....	122
5.2.3.	Ermüdungsnachweis für die Kombination Anlagenbetrieb+Seegang .....	124
5.3.	STEIGERUNG DER ERMÜDUNGSFESTIGKEIT BEI SCHWEIßVERBINDUNGEN.....	125
5.3.1.	Diskussion des Blechdickeneffekts .....	126
5.3.1.1.	Schwingversuche mit $t = 4$ mm .....	128
5.3.1.2.	Schwingversuche mit $t = 90$ mm .....	132
5.3.1.3.	Vergleich der Schwingversuche .....	134
5.3.1.4.	Neubewertung der Ermüdungsnachweise mit dem „thinness effect“ .....	136
5.3.2.	Alternative Schweißverfahren.....	136
5.3.3.	Einsatz von neu entwickelten höherfesten Stahlsorten .....	137
5.3.4.	Methoden zur Schweißnahtnachbehandlung .....	138
5.3.5.	Schwingversuche mit nachbehandelten Schweißproben .....	142
5.3.6.	Schweißsimulationen gekoppelt mit einem Nachbehandlungsprozess .....	145
5.3.6.1.	Entwickelte Berechnungsumgebung HANWELD .....	145
5.3.6.2.	Numerisches Modell.....	147
5.3.6.3.	Verifikation der Schweißsimulation anhand von Schweißversuchen.....	149
5.3.6.4.	Kontaktsimulation für das hochfrequente Hämmern.....	155
5.3.6.5.	Lokale Ermüdungsberechnungen für die Stumpfnah .....	159
5.4.	ERMÜDUNGSFESTIGKEIT DER FÜLLMATERIALIEN .....	167
5.4.1.	Traglast- und Ermüdungsversuche mit Füllmaterialien .....	171
5.4.1.1.	Traglastversuche.....	172
5.4.1.2.	Ermüdungsversuche .....	173
<b>6.</b>	<b>GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT VON SANDWICHTURMSEKTIONEN.....</b>	<b>178</b>
6.1.	SCHIEFSTELLUNGEN .....	178
6.2.	VERFORMUNGEN .....	178
6.3.	SCHWINGUNGSVERHALTEN .....	180
6.3.1.	Resonanztests von BASF .....	181
6.3.2.	Einbau von Schwingungsdämpfern .....	184
6.4.	RISSBREITENBEGRENZUNG .....	184
6.5.	UNRUNDHEITEN UND VORBEULTIEFEN .....	185
<b>7.</b>	<b>FERTIGUNGSTECHNIK.....</b>	<b>187</b>
7.1.	TURMSEKTIONEN MIT $D < 4.3$ M .....	187
7.1.1.	Umfangsorientierte Fertigung der Turmsektionen (F.1 bis F.5).....	188
7.1.2.	Ineinanderschieben von Innen- und Außenrohr (F.6).....	192
7.1.3.	Injektion des Füllmaterials (F.7) .....	193
7.1.3.1.	Injektionstechnik für Elastomere .....	194
7.1.3.2.	Injektionstechnik für Vergussmörtel .....	196

7.2.	TURMSEKTIONEN MIT $D > 4.3$ M .....	196
7.2.1.	Längsorientierte Fertigung der Sektionen .....	196
<b>8.</b>	<b>VERBINDUNGSTECHNIK .....</b>	<b>202</b>
8.1.	TRAGVERHALTEN DES SANDWICH JOINTS.....	204
8.2.	ERMÜDUNGSFESTIGKEIT VON ROHR-IN-ROHR-VERBINDUNGEN.....	213
8.3.	VARIANTEN DES NEUEN SANDWICH JOINTS FÜR TURMKONSTRUKTIONEN.....	216
<b>9.</b>	<b>MONTAGETECHNIK.....</b>	<b>218</b>
9.1.	MONTAGE DER TURMSEKTIONEN VOR ORT.....	218
9.1.1.	Turmsektionen mit $D \leq 4.3$ m .....	218
9.1.2.	Turmsektionen mit $D > 4.3$ m .....	218
9.2.	INJEKTIONSVORGÄNGE DIREKT VOR ORT.....	220
9.3.	MONTAGEABLAUF BEIM SANDWICH JOINT.....	222
<b>10.</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND BEMESSUNGSEMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>224</b>
10.1.	KONZEPTE UND WERKSTOFFE FÜR HYBRIDE TURMKONSTRUKTIONEN.....	224
10.2.	TRAGFÄHIGKEIT .....	225
10.3.	ERMÜDUNGSFESTIGKEIT.....	226
10.4.	GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT.....	227
10.5.	FERTIGUNGSTECHNIK.....	227
10.6.	VERBINDUNGSTECHNIK.....	228
10.7.	MONTAGETECHNIK.....	229
<b>11.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>230</b>
11.1.	ZUSAMMENFASSUNG .....	230
11.2.	AUSBLICK .....	234
<b>12.</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>235</b>
12.1.	NORMEN UND RICHTLINIEN.....	235
12.2.	HANDBÜCHER, KONFERENZBEITRÄGE, FORSCHUNGSBERICHTE UND AUFSÄTZE... 236	236
12.3.	DISSERTATIONEN UND HABILITATIONEN.....	241
12.4.	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN ZUM THEMA DER ARBEIT .....	243
12.5.	DIPLOM- UND MASTERARBEITEN .....	244
12.6.	PATENTSCHRIFTEN .....	245
12.7.	PROGRAMMSYSTEME UND SOFTWARETOOLS .....	245
<b>13.</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>246</b>
13.1.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	246
13.2.	TABELLENVERZEICHNIS .....	253
<b>ANHANG</b>	<b>.....</b>	<b>A-1</b>

## Nomenklatur

Nicht aufgeführte Bezeichnungen werden im Text erläutert.

### Große lateinische Buchstaben

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
A	m <sup>2</sup>	Fläche
A <sub>-1</sub> ; A <sub>0</sub> ; A <sub>+1</sub>	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche Innenrohr (-1), Kernschicht (0) und Außenrohr (+1)
C <sub>x</sub> ; C <sub>φ</sub> ; C <sub>τ</sub>	-	Beulbeiwerte
D	m	Durchmesser
D <sub>-1</sub> ; D <sub>0</sub> ; D <sub>+1</sub>	m	Durchmesser Innenrohr (-1), Kernschicht (0) und Außenrohr (+1)
E	MPa	Elastizitätsmodul
F <sub>x</sub> ; F <sub>y</sub> ; F <sub>z</sub>	N	Normalkraft in x-, y- und z-Richtung
ΔF	N	Doppelkraftamplitude
G	MPa	Schubmodul
H	m	Höhe, Turmhöhe bzw. Zylinderhöhe
I	m <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment
K <sub>t</sub>	-	Kerbformzahl
L	m	Länge bzw. Sektionslänge
M <sub>x</sub> ; M <sub>y</sub> ; M <sub>z</sub>	Nm	Moment um die x-, y- und z-Achse
M <sub>el</sub> ; M <sub>pl</sub>	Nm	Elastisches bzw. plastisches Biegemoment
N	-	Schwingspielzahl
N <sub>f</sub>	-	Bruchschwingspielzahl
N <sub>pl</sub>	N	Plastische Normalkrafttragfähigkeit
P <sub>Ü</sub>	%	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	-	Spannungsverhältnis zwischen Ober- und Unterspannung
T	°C	Temperatur
ΔT	°C	Temperaturdifferenz
U	%	Unrundheit
V	m <sup>3</sup>	Volumen
W <sub>el</sub> ; W <sub>pl</sub>	m <sup>3</sup>	Elastisches bzw. plastisches Widerstandsmoment

### Kleine lateinische Buchstaben

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
a	mm	Risslänge
b	m	Blecbreite
f	Hz	Frequenz
f <sub>bond,k</sub>	MPa	charakteristische Haftzugfestigkeit
f <sub>c,k</sub>	MPa	charakteristische einaxiale Druckfestigkeit
f <sub>t</sub>	-	Blechdickenkorrekturfaktor
f <sub>u,k</sub>	MPa	charakteristische Zugfestigkeit
f <sub>y,k</sub>	MPa	charakteristische Streckgrenze
h	mm	Schubrippenhöhe
l	m	Länge

m	-	Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve
m	-	Anzahl der Halbwellen in Axialrichtung
n	-	Anzahl der Vollwellen in Umfangsrichtung
r	m	Radius
s	mm	vertikaler Schubrippenabstand
t	s	Zeit
t	mm	Blechdicke
$t_{ref}$	mm	Referenzblechdicke
$t_{ST}$	mm	Blechdicke der Stahlurmsektion
$t_{I1}$	mm	Blechdicke vom Innenrohr
$t_0$	mm	Kernschichtdicke
$t_{+1}$	mm	Blechdicke vom Außenrohr
u	mm	Weg, Verschiebung bzw. Stauchung
v	m/s	Geschwindigkeit
x; y; z	-	Achsrichtungen im kartesischen Koordinatensystem

### Griechische Buchstaben

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$\alpha$	°	Winkel
$\alpha_c$	-	Abminderungsfaktor für die Dauerhaftigkeit von Beton
$\delta$	-	Querschnittsparameter
$\varepsilon_x; \varepsilon_y; \varepsilon_z$	$\mu\text{m/m}$	Dehnung
$\varphi$	°	Reibungswinkel
$\gamma$	-	Sicherheitsbeiwert
$\kappa_1; \kappa_2$	-	Abminderungsfaktoren für Beulkurven
$\Lambda$	-	logarithmisches Dämpfungsdekrement
$\bar{\lambda}_S$	-	bezogener Schlankheitsgrad
$\mu$	-	Reibbeiwert
$\nu$	-	Querdehnzahl (Poissonzahl)
$\theta$	°	Winkel in Umfangsrichtung
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z$	MPa	Normalspannung in x-, y- und z-Richtung
$\sigma_N; \sigma_S; \sigma_K$	MPa	Nenn-, Struktur-, Kerbspannung
$\sigma_m; \sigma_o; \sigma_u$	MPa	Mittel-, Ober-, Unterspannung
$\Delta\sigma$	MPa	Doppelspannungsamplitude bzw. Normalspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_{eq}$	MPa	Schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite
$\sigma_{xSi}$	MPa	ideale Beulspannung für Druckbeanspruchung in Axialrichtung
$\sigma_{xS,R,k}$	MPa	reale Beulspannung für Druckbeanspruchung in Axialrichtung
$\tau$	MPa	Schubspannung
$\tau_{bond,k}$	MPa	charakteristische Haftscherfestigkeit
$\tau_{Si}$	MPa	ideale Beulspannung für Schubbeanspruchung
$\Delta\tau$	MPa	Doppelspannungsamplitude bzw. Schubspannungsschwingbreite

**Abkürzungen**

API	American Petroleum Institute
DASt	Deutscher Ausschuss für Stahlbau
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
DNV	Det Norske Veritas
EC	Eurocode
ED	Einschaltdauer
EF	Eigenfrequenz
EN	Europäische Normung
FAT	Kerbfallklasse im Maschinenbau
FLS	Fatigue Limit State
FEM	Finite-Element-Methode
GCF	Giga Cycle Fatigue
GL	Germanischer Lloyd
GM	Grundmaterial
HCF	High Cycle Fatigue
HUS	Servohydraulische Prüfmaschine
IIW	International Institute of Welding
LA	Lineare Beulanalyse
LCF	Low Cycle Fatigue
LEBM	Linear-Elastische Bruchmechanik
LN	Längsnaht
LUH	Leibniz Universität Hannover
LW	Lastwechsel
MAG	Metall-Aktivgas-Schweißen
MS	Mit Schubrippen
MPA	Materialprüfanstalt
MW	Megawatt
OS	Ohne Schubrippen
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
PIT	Pneumatic Impact Treatment
RB	Randbedingung
RN	Rundnaht
SCF	Spannungskonzentrationsfaktor
SCS	Steel-Concrete-Steel als Sandwichurmsektion
SES	Steel-Elastomer-Steel als Sandwichurmsektion
SGS	Steel-Grout-Steel als Sandwichurmsektion
ST	Stahlurmsektion
UIT	Ultrasonic Impact Treatment
ULS	Ultimate Limit State
UP	Unterpulverschweißen
WEA	Windenergieanlage
ZFP	Zerstörungsfreie Prüfung