

Herausgegeben von Ralf Ruhnau  
Begründet von Günter Zimmermann

Horst Bellmer

# Schäden an Tragstrukturen für Windenergieanlagen

Fraunhofer IRB  Verlag

Horst Bellmer

## Schäden an Tragstrukturen für Windenergieanlagen



# Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Dr.-Ing. Ralf Ruhnau

Begründet von Professor Günter Zimmermann

Band 47

## Schäden an Tragstrukturen für Windenergieanlagen

Von

Prof. Dipl.-Ing. Horst Bellmer

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im  
Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9603-9

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9604-6

Redaktion: Manuela Wallißen

Herstellung: Gabriele Wicker

Layout, Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Satz: Manuela Gantner – Punkt, STRICH.

Druck: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH & Co. KG, Stuttgart

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V.  
wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten  
Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die  
über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung  
des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen,  
Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu  
der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetz-  
gebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI,  
VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtig-  
keit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen  
Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuzie-  
hen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2016

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-25 00

Telefax +49 7 11 970-25 08

[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen

Bücher über Bauschäden erfordern anders als klassische Baufachbücher eine spezielle Darstellung der Konstruktionen unter dem Gesichtspunkt der Bauschäden und ihrer Vermeidung. Solche Darstellungen sind für den Planer wichtige Hinweise, etwa vergleichbar mit Verkehrsschildern, die den Autofahrer vor Gefahrstellen im Straßenverkehr warnen.

Die Fachbuchreihe **SCHADENFREIES BAUEN** stellt in vielen Einzelbänden zu bestimmten Bauteilen oder Problemstellungen das gesamte Gebiet der Bauschäden dar. Erfahrene Bausachverständige beschreiben den Stand der Technik zum jeweiligen Thema, zeigen anhand von Schadensfällen typische Fehler auf, die bei der Planung und Ausführung auftreten können, und geben abschließend Hinweise zu deren Sanierung und Vermeidung.

Für die tägliche Arbeit bietet darüber hinaus die Volltextdatenbank **SCHADIS** die Möglichkeit, die gesamte Fachbuchreihe als elektronische Bibliothek auf DVD oder online zu nutzen. Die Suchfunktionen der Datenbank ermöglichen den raschen Zugriff auf relevante Buchkapitel und Abbildungen zu jeder Fragestellung ([www.irb.fraunhofer.de/schadis](http://www.irb.fraunhofer.de/schadis)).

## Der Herausgeber der Reihe:

Dr.-Ing. Ralf Ruhnau ist ö. b. u. v. Sachverständiger für Betontechnologie, insbesondere für Feuchteschäden und Korrosionsschutz. Als Partner der Ingenieurgemeinschaft CRP GmbH Berlin und in Fachvorträgen befasst er sich neben der Bauphysik und der Fassadenplanung vor allem mit Bausubstanzbeurteilungen. Er war mehrere Jahre als Mitherausgeber der Reihe aktiv und betreut sie seit 2008 alleinverantwortlich.

## Der Begründer der Reihe:

Professor Günter Zimmermann war von 1968 bis 1997 ö. b. u. v. Sachverständiger für Baumängel und Bauschäden im Hochbau. Er zeichnete 33 Jahre für die **BAUSCHÄDEN-SAMMLUNG** im Deutschen Architektenblatt verantwortlich. 1992 rief er mit dem Fraunhofer IRB Verlag die Reihe **SCHADENFREIES BAUEN** ins Leben, die er anschließend mehr als 15 Jahre als Herausgeber betreute. Er ist der Fachwelt durch seine Gutachten, Vortrags- und Seminartätigkeiten und durch viele Veröffentlichungen bekannt.

## Vorwort des Herausgebers

In Deutschland drehen sich über 25 000 Windenergieanlagen und die Zahl nimmt weiterhin zu. Im Rahmen des Repowerings werden inzwischen hunderte Anlagen abgebaut und durch neue, größere und leistungsfähigere ersetzt. Bei einem derart großen Bauvolumen bleiben Schäden, die auf Planungs- oder Baumängel zurückzuführen sind, naturgemäß nicht aus, wenn auch der in der Regel großen Serie baugleicher Anlagen geschuldet, Planungs- und Serienfertigung besonders sorgfältig erfolgen (sollten).

Dementsprechend war es folgerichtig, in der Reihe SCHADENFREIES BAUEN auch einen Band über Schäden an Tragstrukturen für Windenergieanlagen herauszugeben.

Mit Prof. Horst Bellmer konnte ich einen Autor für diesen Band gewinnen, der als Pionier der ersten Stunde die Planung und Berechnung von Tragkonstruktionen für Windenergieanlagen von Beginn an, also seit mittlerweile mehr als 25 Jahren, begleitet hat und damit auch »Schwachstellen« und »Schadenspotenziale« bestens kennt.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Bellmer dafür, dass er in dem vorliegenden Band die Leser an seiner großen Erfahrung teilhaben lässt und damit dazu beiträgt, Schäden zu vermeiden.

Berlin, im Januar 2016

Ralf Ruhнау

## Vorwort des Autors

Im Jahr 1988 wurde ich von einem Mitarbeiter einer Stahlbaufirma aus Wilhelmshaven gefragt, ob unser Büro die statisch-konstruktive Bearbeitung für drei Türme aus Stahl durchführen könne. Das Besondere an den Türmen sei allerdings, dass man sie zwar mit einem Schornstein vergleichen könne, dass aber auf dem oberen Ende noch eine Windenergieanlage befestigt werden solle. So etwas hatten wir bis dahin noch nicht gemacht, ja noch nicht einmal davon gehört. Aber warum eigentlich nicht? Ich habe eine vorsichtige Schätzung der voraussichtlichen Honorarkosten für die Firma zusammengestellt und bin dann in Urlaub gefahren. Wochen oder gar Monate später – das Projekt war eigentlich bereits in Vergessenheit geraten – rief der Mitarbeiter der Firma wieder an: Jetzt ginge es los, der Auftrag für die drei Türme sei erteilt.

Nach einer Auftragsbesprechung in Wilhelmshaven habe ich mich an die Arbeit gemacht. Ich sah mich vor die Aufgabe gestellt, nicht nur die normale statische Berechnung durchzuführen, sondern zusätzlich die erste und zweite Biegeeigenfrequenz und die erste Torsionseigenfrequenz zu bestimmen. (Bei Letzterer weiß ich bis heute noch nicht recht, warum und wozu!) Ich nahm Verbindung zur TU Braunschweig auf, an der ich studiert hatte, und bat (das Institut mit dem gut ausgestatteten Rechenzentrum) um Unterstützung durch eine Vergleichsrechnung. Eigentlich sollten die geforderten Nachweise nur eine Bestätigung für die bereits vom Hersteller der Windenergieanlagen (MBB) – und damit Auftraggeber für die Türme – selbst durchgeführte Frequenzberechnung sein. Umso größer war die Überraschung, dass die TU Braunschweig davon erheblich abweichende Ergebnisse erzielte. Was nun? Auf der einen Seite der sehr kompetente Auftraggeber, auf der anderen Seite die renommierte TU Braunschweig. Wer von den beiden hat richtig gerechnet? Immerhin fühlte ich mich in der Lage, die erste Eigenfrequenz selbst zu bestimmen. Mein Ergebnis passte exakt zu den Zahlen aus Braunschweig. Nun musste ich diese »Alarmmeldung« weitergeben – an einem Freitagnachmittag (wie viele wichtige Meldungen bei diesem Projekt, so scheint es mir). Im Ergebnis wurden die Türme etwa 30 % schwerer, um die Vorgaben der Frequenzberechnung einzuhalten, und als Konsequenz musste die gesamte statische Berechnung neu erstellt werden.

Dies war meine erste Begegnung mit einer für Bauingenieure zunächst völlig neuen Welt, der Windenergietechnik. Nicht nur statische Probleme der Trag-sicherheit waren zu lösen, sondern auch dynamische Anforderungen mussten erfüllt werden. Und als Drittes musste noch der Nachweis im Grenzzustand

der Ermüdung geführt werden. Dieser letzte Punkt war zwar nicht ganz unbekannt, denn zumindest im Kranbau und verwandten Disziplinen, teilweise auch im Brückenbau, musste man auch zu der Zeit schon Ermüdungsnachweise führen. Allerdings beschränkte sich hier der Nachweis auf zwei Millionen Lastwechsel, bei Windenergieanlagen sind jedoch noch drei Zehnerpotenzen mehr zu berücksichtigen.

Inzwischen sind wir fast drei Jahrzehnte weiter, es werden nicht mehr einzelne Anlagen gebaut, sondern die Serienfertigung ist die Regel. Gab es zu Anfang kaum verbindliche Vorschriften, was dazu führte, dass wir uns zunächst eigene Regeln aus bestehenden anderen Normen und Vorschriften zusammengestellt haben, so hat sich dies deutlich geändert. Dennoch birgt die Windenergietechnik als innovatives und anspruchsvolles Aufgabengebiet ein nicht zu unterschätzendes Risiko, Fehler in der Planung, Ausführung, Produktion oder Montage zu machen, was aufgrund der Serienfertigung zu großen Schäden führen kann.

Ich habe über 25 Jahre hinweg Probleme und Schäden bei Windenergieanlagen beobachtet und bewertet. Ich hoffe, dass die folgende Zusammenstellung anderen Ingenieuren hilft, ähnliche Fehler zu vermeiden, und dass meine Erfahrungen der Weiterentwicklung der Windenergietechnik dienen, einer Technologie, die schonend mit den Ressourcen unserer Erde umgeht.

Bremen, im Januar 2016

Horst Bellmer

## Geleitwort

Ein altes Sprichwort sagt: »Aus Schaden wird man klug.« Das ist wohl wahr. Häufig neigen die am Bau Beteiligten jedoch dazu, über Schäden lieber nicht zu sprechen. Die Gründe dafür sind verständlich. Wer redet schon gerne über Mängel in seiner Planung oder Ausführung. Im Hinblick auf zukünftige Bauprojekte möchte natürlich jeder gerne sagen können, er hätte alles richtig gemacht. Auch als Prüflingenieur oder Sachverständiger ist es regelmäßig geboten, über aufgetretene Mängel Stillschweigen zu bewahren. Daher ist es nicht verwunderlich, wenn ein Kollege, wie hier Professor Horst Bellmer, erst am Ende seiner aktiven Laufbahn den Mut und die Muße aufbringt, über Erfahrungen aus Schäden zu berichten, die in der Bautechnik der Windenergie in den letzten drei Jahrzehnten aufgetreten sind.

Die Realität zeigt, dass, wenn neue Bautechniken entwickelt oder neuartige Bauprojekte ausgeführt werden, erst die Anwendung und manchmal damit verbundene Schäden auf Umwegen zu dem gewünschten Ziel führen. Gerade der junge und höchst innovative Bereich der Windenergie ist ein Bereich, in dem in vergleichsweise kurzen Zeiträumen viele Neuerungen entwickelt wurden. Als Beispiel sei hier die Fertigteilmtechnologie genannt, mit der heute vorgespannte Stahlbetontürme errichtet werden. Segmente mit trockenen Fugen und externer Vorspannung wären vor wenigen Jahren noch undenkbar gewesen, oder Ringflanschverbindungen bei Stahltürmen mit großen HV-Schrauben bis zu M72. Schrauben dieser Größe sind erst vor Kurzem auf den Markt gekommen.

Professor Horst Bellmer hat an diesen Entwicklungen als Tragwerksplaner, Prüflingenieur und Sachverständiger maßgeblich mitgewirkt. Ich hatte die Ehre und die Freude, die ersten Projekte im Bereich der Windenergie – nämlich die drei einflügeligen Monopterus-Anlagen und den AEOLUS in Wilhelms- haven – gemeinsam mit Professor Bellmer zu bearbeiten. Weitere Projekte sowohl in Stahlbau- wie auch in Spannbetonweise folgten, wobei die Rollen als Tragwerksplaner und Prüflingenieur wechselten.

Horst Bellmer hat an der Technischen Universität Braunschweig Bauingenieurwesen studiert (Dipl.-Ing., 1972). Danach war er zunächst Mitarbeiter und dann Partner in der Ingenieurgesellschaft Luttmann in Bremen. Im Jahre 1985 wurde er als Prüflingenieur für Baustatik in den Fachrichtungen Metallbau und Massivbau anerkannt. 1991 wurde er zum öffentlich bestellten Sachverständigen für Baustatik und Baukonstruktion bestellt. Nebenberuflich engagierte er sich seit 1990 als Lehrbeauftragter der Hochschule Bremen und

wurde 1997 zum Honorarprofessor ernannt. Die Deutsche Bahn erkannte ihn 1998 als Prüfenieur für Eisenbahn-Brücken und -Ingenieurbauwerke an. 1999 firmierte sein Ingenieurbüro in die Prof. Bellmer Ingenieurgruppe GmbH um. Seit 2014 befindet sich Horst Bellmer im wohlverdienten »Unruhestand« und ist heute noch als Beratender Ingenieur und Gutachter in Verbindung mit seinem ehemaligen Büro, der heutigen pb+ Ingenieurgruppe AG in Bremen, aktiv. Zusammen mit seiner lieben Frau ist Horst Bellmer darüber hinaus in wohltätigen und sozialen Projekten engagiert.

Horst Bellmer hat die Erkenntnisse als Hochschullehrer und als Referent an angehende und praktizierende Ingenieure vermittelt. Die Erfahrungen aus Schäden an Tragstrukturen von Windenergieanlagen teilt er nun in diesem Buch mit seinen Lesern.

Lieber Horst, dafür im Namen deiner Leser und auch von mir herzlichen Dank.

Hannover, im Januar 2016

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Leibniz Universität Hannover

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Vorbemerkung</b>   | <b>15</b> |
| 1.1      | Umweltpolitische Bedeutung der Windenergie                        | 17        |
| 1.2      | Wirtschaftliche Bedeutung der Windenergie                         | 17        |
| <b>2</b> | <b>Übersicht über die Konstruktionsformen</b>                     | <b>19</b> |
| 2.1      | Stahlkonstruktionen   | 19        |
| 2.1.1    | Gittermast  | 19        |
| 2.1.2    | Stahlrohrturm   | 19        |
| 2.1.3    | Dreibein  | 21        |
| 2.2      | Betonkonstruktionen   | 21        |
| 2.2.1    | Vorgefertigte Maste (Schleuderbetonmaste)                         | 21        |
| 2.2.2    | Ortbetontürme   | 21        |
| 2.2.3    | Vorgespannte Betontürme aus Fertigteilen                          | 23        |
| 2.2.4    | Hybridtürme   | 25        |
| <b>3</b> | <b>Vorschriften, Lastannahmen und Berechnung</b>                  | <b>27</b> |
| 3.1      | Beanspruchungen   | 27        |
| 3.1.1    | Eigenlasten   | 28        |
| 3.1.2    | Windlasten  | 28        |
| 3.1.3    | Temperaturänderungen  | 29        |
| 3.1.4    | Dynamische Einwirkungen   | 30        |
| 3.1.5    | Beanspruchungskollektive für die<br>Betriebs sicherheitsnachweise | 30        |
| 3.1.6    | Einwirkungen aus Transport und Montage                            | 31        |
| 3.1.7    | Erdbeben  | 32        |
| 3.1.8    | Funktionskräfte   | 32        |
| 3.2      | Berechnung  | 32        |
| 3.2.1    | Stahlbaukonstruktionen  | 33        |
| 3.2.2    | Betonkonstruktionen   | 35        |
| 3.2.3    | Fundamente  | 42        |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4     | <b>Allgemeine Probleme bei Gründungen</b>                      | 45 |
| 4.1   | Beispiel für einen Planungsfehler                              | 45 |
| 4.2   | Probleme infolge einer Fehleinschätzung des Baugrunds          | 47 |
| 4.3   | Aufgetretene Probleme bei Flachgründungen                      | 47 |
| 4.4   | Aufgetretene Probleme bei Tiefgründungen                       | 48 |
| 4.4.1 | Beispiel 1: Pfähle zu kurz                                     | 48 |
| 4.4.2 | Beispiel 2: Baugrund versagt beim Betonieren                   | 49 |
| 4.4.3 | Beispiel 3: Baugrund versagt infolge Geländebruchs             | 51 |
| 5     | <b>Schwere Ausführungsfehler am Fundamentanschluss</b>         | 53 |
| 5.1   | Ein Unglücksfall, der letztlich ein Glücksfall war             | 55 |
| 5.2   | Problem 1: fehlender Betonanschluss                            | 60 |
| 5.3   | Problem 2: fehlender Beton                                     | 61 |
| 5.4   | Zusammenfassung  | 64 |
| 6     | <b>Probleme beim Anschluss des Stahlturms an das Fundament</b> | 65 |
| 6.1   | Einbau eines Ankerkorbs  | 66 |
| 6.2   | Verankerung des Stahlturms auf einem Betonsockel               | 69 |
| 6.3   | Verankerung des Stahlturms mit einem Fundamenteinbauteil       | 74 |
| 6.4   | Fundamenteinbauteil mit zwei Ankerplatten                      | 76 |
| 6.4.1 | Rechenmodell   | 76 |
| 6.4.2 | Schadensverlauf  | 82 |
| 6.4.3 | Sanierungs- und Vorsorgemaßnahmen                              | 83 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7     | Einzelprobleme                                    | 87  |
| 7.1   | Schäden an Ortbetontürmen                         | 87  |
| 7.1.1 | Schäden im Bereich der Betondeckung               | 87  |
| 7.1.2 | Schäden infolge fehlender Betonfestigkeit         | 90  |
| 7.1.3 | Schäden infolge problematischer Zuschlagstoffe    | 93  |
| 7.2   | Eigenfrequenzproblem bei einem Schleuderbetonmast | 95  |
| 7.3   | Schäden an Fertigteiltürmen                       | 96  |
| 7.3.1 | Ausfall der Sicherheitssysteme                    | 96  |
| 7.3.2 | Ein Rotorblatt macht sich selbstständig           | 101 |
| 7.3.3 | Auffälligkeiten                                   | 102 |
| 7.4   | Diverse Probleme beim Fundamentbau                | 105 |
| 7.4.1 | Zu enge Bewehrung im Anschluss Fundament/Turm     | 105 |
| 7.4.2 | Öffnungen im Einbauteil                           | 106 |
| 7.5   | Eine Nearshore-Gründung aus Stahl                 | 107 |
| 7.6   | Stahlkonstruktionen                               | 111 |
| 7.6.1 | Risse über einer Tür                              | 111 |
| 7.6.2 | Hängende Treppen                                  | 112 |
| 7.7   | Ein Tiefgründungsfundament                        | 113 |
| 8     | Zusammenfassung                                   | 117 |
| 9     | Zukunftsperspektiven                              | 119 |
|       | Literaturverzeichnis                              | 121 |
|       | Stichwortverzeichnis                              | 123 |

