

Stahlanwendungsforschung in der Windenergie

Peter Schaumann, Natalie Stranghöner, Wilko Flügge

Einleitung

Strom aus Wind ist die stärkste Säule für den Wandel in ein nachhaltiges elektrisches Energieerzeugungssystem in Deutschland. Für den Bau von Windenergieanlagen ist Stahl ein unverzichtbarer Werkstoff, der einen signifikanten Gewichtsanteil an der Gesamtanlage hat. In der Offshore-Windenergie beträgt dieser Anteil über 85%, wobei eine Anlage ein Gesamtgewicht von etwa 1500 to hat. Es ist daher nachvollziehbar, dass die stahlerzeugende und die stahlverarbeitende Industrie ein vitales Interesse an der Forschung und Entwicklung in diesem vergleichsweise jungen Technikbereich hat. Das gilt für stählerne Tragstrukturen, für Komponenten der Maschine, für verschiedenste Arten von Verbindungsmitteln und anderen Bauteilen. Übergeordnetes Ziel von Forschung und Entwicklung ist die Verringerung der Energieerzeugungskosten. Das betrifft sowohl die Investitions- wie die Betriebskosten für die Windenergieparks.

Die Stahlanwendungsforschung hat in jüngerer Zeit auf dem Gebiet der Windenergie insbesondere neue Entwicklungen im Bereich der Schweißverfahren, der Schweißnahtnachbehandlung und der Verschraubungstechnik hervorgebracht und damit wertvolle Beiträge zum Wandel des Energieversorgungssystems geleistet.



Bild 1 Offshore Windpark Riffgat mit Monopile-Tragstrukturen ©Siemens

Fügetechnik - Schweißen

Für nachhaltige Kostensenkungen werden technische Verbesserungen über die gesamte Produktentstehungsphase sowie den Lebenszyklus sein [1]. Aus schweißtechnischer Sicht beinhaltet die Wertschöpfungskette für Offshore-Windenergieanlagen wesentliche Bereiche der Anlagenfertigung, die sich in den Bereichen Fügeverfahren, Vor- und Nachbehandlung und –bearbeitung sowie Rahmenbedingungen wie Automatisierung und Qualitätssicherung darstellen. In späteren Lebenszyklusbereichen wie Operation & Maintenance kommen schweißtechnische Aufgaben bei Reparaturen im Über- und Unterwasserbereich dazu. So kann die schweißtechnische Installation nachträglich anzubringender Unterwasserelemente an Offshoregründungsstrukturen (z.B. Sonare für den U-Boot-Verkehr, Messtechnik, ggf. Opferanoden) erhebliche Aufwände bedingen.

Ein wesentliches derzeitiges Hemmnis für einen beschleunigten Ausbau der Offshore-Windenergie stellt der Mangel an Gründungen für größere Wassertiefen dar [1], [2]. Der Monopile mit Transition-Piece als einfachste und am weitesten verbreitete Gründung wird derzeit in Wassertiefen bis maximal 30 m eingesetzt, größere Durchmesser bis 10 m und verbesserte Rammtechniken versprechen zeitnah Einsatziefen bis 40 m Wassertiefe. Diese Rohrkonstruktionen mit Massen bis 1500t werden in annähernder Fließfertigung hauptsächlich mittels Mehrdraht-UP-Schweißen gefügt und können dadurch geringe Durchlaufzeiten erzielen (Durchlaufzeit ≤ 2 Tage / Monopile). Für größere Wassertiefen werden derzeit aufgelöste Gründungsstrukturen (sog. Jackets) verwendet, welche aufgrund der Größe, Konstruktion und Fertigungstoleranzen weitgehend aufwendig teilmechanisiert mit MSG-Verfahren geschweißt werden, aber auch eine Gewichtersparnis bis zu 40 % im Vergleich zum Monopile generieren können. Perspektivisch stellen schwimmende Plattformen zwar ein vielversprechendes Gründungskonzept dar, momentan ist allerdings eine Umsetzung in Deutschland nicht in Sicht. Die schweißtechnischen Aufgaben ähneln allerdings thematisch den Monopile- und Jacketstrukturen.

In jedem Fall bestehen sehr hohe Anforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Gründungsstruktur, insbesondere der Schweißverbindungen hinsichtlich der Festigkeit und (Tieftemperatur-) Zähigkeit. Die Einhaltung dieser Eigenschaften steht oft im Gegensatz zu den notwendigen niedrigen Durchlaufzeiten, welche oftmals nur über größere Energieeinbringungen / Abschmelzleistungen erreicht werden können.

Aufbauend auf die Gründung stellt der Stahlrohrturm das Turmkonzept mit der weitesten Verbreitung dar und ist nach derzeitigem Stand alternativlos in der Offshore-Windenergiegewinnung. Für beide Anwendungsfälle (Offshore & Onshore) werden Stahlplatten i.a. aus S355 mit bis zu 120 mm Dicke zu Rohrsegmenten umgeformt und ebenfalls mit UP-Mehrdrahtverfahren inklusive der Flanschverbindung verschweißt.

Neben möglichen schweißtechnischen Baustellenmontagekonzepten für die Onshore-Anwendung werden neue fügetechnische Lösungen für eine beschleunigte Turmproduktion bei gleichbleibender / verbesserter Qualität benötigt. Dies betrifft auch den vielfach angestrebten Ansatz der Blechdickenreduktion durch den Einsatz hochfester Stähle (z.B. S690 QL), wodurch ebenfalls eine Reduktion der Durchlaufzeit erreicht werden kann. Ausreichende Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit der Kriterien Beulen, Knicken und Schwingverhalten stellen für Turmhöhen von 120m und mehr die schweißtechnischen Aufgabenstellungen dar. In diesem Zusammenhang werden verstärkt kerbfallreduzierende Einbauteile und Versteifungselemente aus Bemessungs- und Fertigungssicht thematisiert.

Die Werkstoffauswahl spielt in der Phase der Bemessung / Konstruktion eine gewichtige Rolle, um später in der Fertigung von Gründungsstruktur / Turm erhebliche Kostenoptimierungen vor allem hinsichtlich der anwendbaren Schweißtechnologien, der Vor- / Nachwärmprozesse, der Zusatz- und Hilfsstoffe, der Fertigungszeiten nebst Automatisierungspotential und Sensorik- /Steuerungskonzepte beim Mehrlagenschweißen und der Vor- und Nacharbeitsaufwände generieren zu können.

Neben derzeit angewandeter Schweißtechnologie werden aktuell Prozesserweiterungen bzw. –Substitutionsmöglichkeiten untersucht. Dazu zählen im Wesentlichen folgende Verfahren:

- MSG-Mehrdraht-(Engspalt) Schweißen (vollmechanisch / automatisiert)
- Unterpulverschweißen mit \geq drei abschmelzenden Elektroden
- Unterpulverschweißen mit Heiß- / Kalt- / Metallpulverzufuhr
- Strahlschweißverfahren (Elektronenstrahl- / Vakuum-Laserstrahlschweißen)
- Hybridschweißverfahren
- Elektrogas-/ Elektroschlackeschweißen am Rohr und Längsstößen

Die Nebenzeiten erzeugenden Vor- und Nachbearbeitung der Baugruppen am Rande des Fertigungshauptprozesses „Schweißen“ der Stahlstrukturen umfassen einen wesentlichen Teil der Gesamtfertigungszeit und müssen im Rahmen der o.g. Schweißverfahren berücksichtigt werden, dazu zählen primär:

- Blechzuschnitt / Verfahren
- Schweißnahtvorbereitung (z.B. Fräsen) / Spaltmaße / Toleranzen
- blechdicken- / materialabhängiges Vorwärmen
- Wasserstoffarmglühen (Soaken)
- Schleifen / Glätten der Naht
- Konservierung (inkl. Vorbereitung)
- produktionsbegleitende Qualitätssprüfung (ZfP: PT, UT, VT)

Fügetechnik - Schrauben

Windenergieanlagen weisen eine Vielzahl an geschraubten Verbindungen auf, die eine Montage am Aufstellungsort – Onshore und Offshore – auch unter widrigen

Umgebungsbedingungen vereinfachen bzw. erst ermöglichen. Im Haupttragwerk der Windenergieanlagen werden hierzu bevorzugt Schraubengarnituren bestehend aus HV-Schrauben bis zu einem Durchmesser von M72 mit zugehörigen Muttern nach DIN EN 14399-4 [3] sowie Scheiben nach DIN EN 14399-6 [4] (M12 bis M36) bzw. DASt-Richtlinie 021 [5] (M39 bis M72) verwendet, die aus Gründen der Sicherstellung der Tragfähigkeit vorgespannt werden. Aufgrund der hohen dynamischen Beanspruchungen der geschraubten Verbindungen bewirkt die Vorspannung der hauptsächlich auf Zug und Biegung (Ringflanschverbindungen) aber auch auf Abscheren beanspruchten geschraubten Verbindungen, dass die Verbindungen überdrückt werden, eine klaffende Fuge vermieden wird und die HV-Schrauben selber nur einen Bruchteil der Ermüdungsbeanspruchung erfahren.

Zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit von großen Schrauben wurde das IGF-Forschungsvorhaben „Experimentelle und rechnerische Bewertung der Betriebsfestigkeit von Schrauben großer Abmessung im Stahlbau unter Berücksichtigung von Randschichteinflüssen“ [6]; Bild 2. Hier wird der mindernde Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit quantifiziert. Gleichwohl werden die jetzigen Kerbfallklassen nach Eurocode 3 für die Zugschwellbeanspruchung bestätigt.

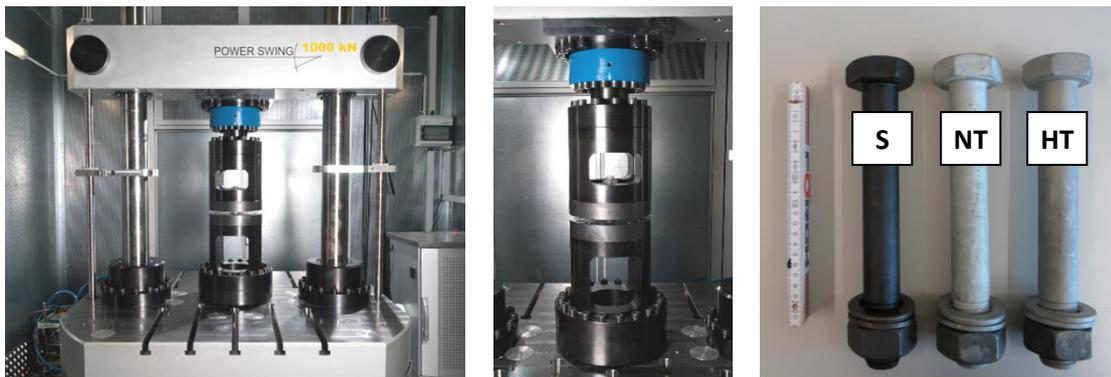


Bild 2 Versuchsaufbau in Resonanzprüfmaschine und Probekörper für HV-Garnituren M36 [6]; S=schwarz, NT=normaltemperaturverzinkt, HT=hochtemperaturverzinkt

Ergänzt werden diese Untersuchungen durch weitere Ermüdungsversuche, die im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 16752 N (FOSTA P1014) „Sprödbbruch von hochfesten Schrauben großer Abmessungen bei tiefen Temperaturen“ [7] an HV-Schrauben M36 und M64 durchgeführt wurden. Diese Versuche wurden mit einer höheren Mittellast in Höhe des Vorspannkraftniveaus $F_{p,c}$ durchgeführt. Bild 3 zeigt eine Zusammenstellung aller Ermüdungsversuche aus den beiden Forschungsvorhaben [6] und [7]. Trotz unterschiedlich hoher Mittellast, zeigen die Versuchsergebnisse eine gute Übereinstimmung bzw. vergleichbare Ergebnisse.

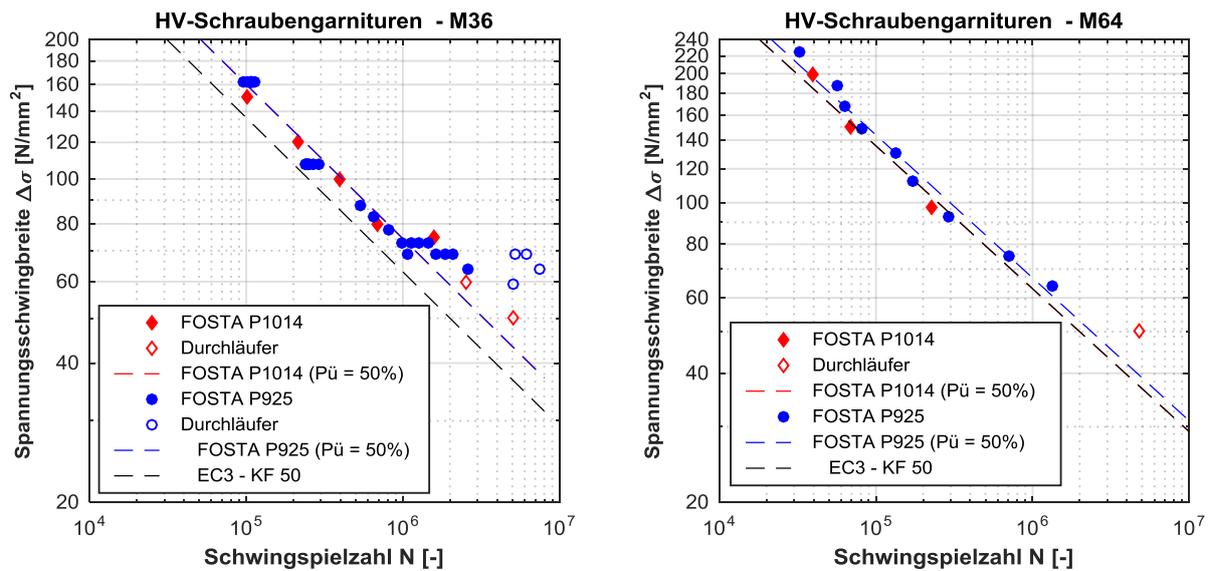


Bild 3 Wöhler-Linien für HV-Schrauben großer Abmessungen

Schraubverbindungen werden vorgespannt, um die Beanspruchbarkeit und/oder die Steifigkeit der Verbindung zu erhöhen. So wird die Ermüdungsfestigkeit in zugbeanspruchten Verbindungen durch das Vorspannen deutlich gesteigert. In gleitfest vorgespannten Scherverbindungen werden zusätzlich der auftretende Schlupf und die Verformungen minimiert. Im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 18711 BG, (FOSTA P1091) „Vorspannkraftverluste ermüdungsbeanspruchter vorgespannter Schraubverbindungen“ wurden Vorspannkraftverluste mit Hilfe von Setz-/Relaxationsversuchen sowie quasi-statischen und Ermüdungsversuchen für vorgespannte zugbeanspruchte und gleitfeste geschraubte Verbindungen jeweils getrennt nach ihrer Ursache erfasst und auf die geplante Lebensdauer von 50 Jahren extrapoliert, siehe exemplarisch die resultierenden mittleren Vorspannkraftverluste infolge Setzen/Relaxation ($\Delta F_{V, \text{setz, mittel}}$) und Ermüdung ($\Delta F_{V, \text{dyn, mittel}}$) von auf Zug beanspruchten vorgespannten Verbindungen mit $l_k/d = 2$ für verschiedene Verbindungsmittel/Anziehverfahren in Bild 4 [8], [9]. Hiernach resultieren im ungünstigsten Fall für eine gestrahlte und mit Zinkphosphat-Grundanstrich versehene Oberfläche einer zugbeanspruchten geschraubten Verbindung, die mit dem Kombinierten Verfahren auf die Vorspannkraft $F_{p,C}$ angezogen wurde, unter Berücksichtigung einer maximalen Ermüdungsbeanspruchung maximal 11,7 % Vorspannkraftverluste auf eine Lebensdauer von 50 Jahren.

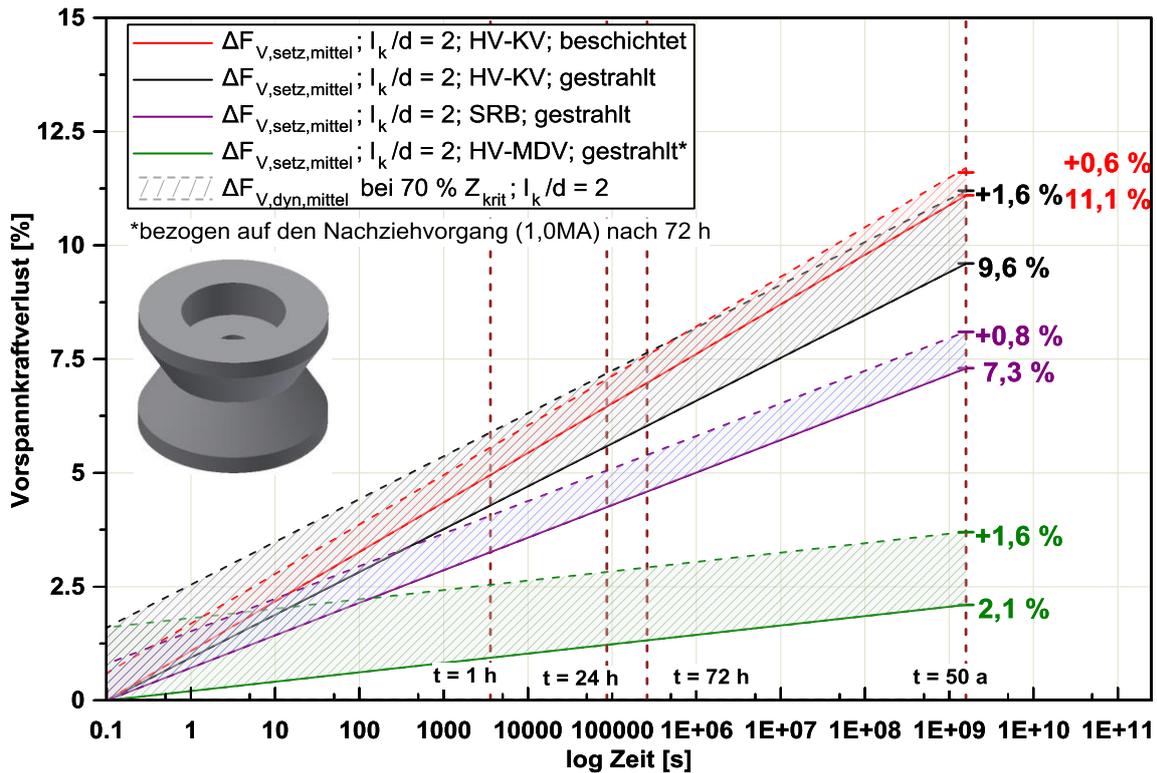


Bild 4 Vorspankraftverluste infolge Setzen/Relaxation und Ermüdung von auf Zug beanspruchten vorgespannten Verbindungen mit $l_k/d = 2$ [8], [9] für verschiedene Verbindungsmittel/Anziehverfahren (HV: HV-System, KV: Kombiniertes Verfahren, MDV: modifiziertes Drehmoment-Vorspannverfahren, SRB: Schließringbolzen)

Die Bestimmung der Haftreibungszahlen für gleitfeste vorgespannte Verbindungen erfolgt nach DIN EN 1090-2, Anhang G [10]. Gemäß der Prüfprozedur werden die Haftreibungszahlen unter Laborbedingungen bestimmt, wodurch in der Praxis auftretende fertigungs- und montagebedingte Imperfektionen sowie betriebsbedingte Einflüsse nicht berücksichtigt werden. Zur Erfassung und Bewertung solch praxisüblicher Effekte wie, siehe Bild 5, auf das Tragverhalten von gleitfesten vorgespannten Verbindungen wird derzeit das IGF-Forschungsvorhaben 19749 BG (FOSTA P1266) „Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten geschraubter gleitfester Verbindungen im Stahlbau“ [11] durchgeführt. Ziel des Vorhabens wird es sein, die angesprochenen Einflüsse systematisch zu untersuchen und damit die Tragsicherheit von GV-Verbindungen über ihre Lebensdauer sicher gewährleisten und unnötige Reparaturen und Kosten vermeiden zu können.

schädigungsmechanisch basierten Konzeptes (Beremin-Konzept) durchgeführt. Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass bei der Verwendung der derzeit eingesetzten Schraubenstähle im Einsatzbereich bis -50 °C (34CrNiMo6) bzw. -70 °C (36CrB4) für HV-Schrauben großer Abmessungen keine Sprödbruchgefahr besteht [13], [14].



Bild 6 Versuchsaufbau für Bauteilversuche an Schraubengarnituren M36 bei tiefen Temperaturen

Stahlsortenauswahl

Die richtige Stahlsortenauswahl zur Vermeidung von Sprödbruch ist für den Anwendungsbereich des Hoch- und Brückenbaus seit langem in DIN EN 1993-1-10 [12] geregelt und in der Praxis etabliert. Diese Regelungen können jedoch auf Grund der veränderten maritimen Rahmenbedingungen nicht direkt für Offshore-Bauwerke aus Stahl und hier vor allem Monopile-Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen übernommen werden. Im Rahmen der Erstellung der neuen DIN 18088 Teil 3 [18] wurde an der Technischen Hochschule Mittelhessen ein von der Stahlindustrie direkt gefördertes Projekt durchgeführt, in dem die Abweichungen zwischen Bauteilen im Brückenbau und bei Offshore-Gründungsstrukturen untersucht wurden, um auf dieser Basis Bemessungsvorschläge für die im maritimen Bereich maximal zulässigen Erzeugnisdicken zu geben [15].

Als Ergebnis dieses Vergleichs konnte Tabelle 2.1 aus DIN EN 1993-1-10:2010-12 für die Anwendung bei Offshore-Bauwerken durch ein zusätzliches Sicherheitsterm ΔT_R erweitert werden, sodass das bekannte Nachweisverfahren gegen Sprödbruch für die maritime Anwendung nur geringfügig verändert worden ist. Neben diesem zusätzlichen Sicherheitsterm müssen jedoch einige Einschränkungen berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich um eine Begrenzung der maximalen Erzeugnisdicke auf 140 mm sowie das Einhalten der Kerbfallklasse 71 oder höher. Außerdem muss sichergestellt sein, dass nennenswerte Kaltumformungen bzw. Dehnraten ausgeschlossen werden können. Für eine weitergehende Verallgemeinerung des Ansatzes ist ein neues Forschungsvorhaben bei der FOSTA in Vorbereitung.

Nachhaltigkeitsbewertung der Tragstrukturen

Das Thema Nachhaltigkeit hat in den vergangenen Jahren weltweit einen zunehmenden Stellenwert erfahren. Nachhaltige Systeme, die weder negative ökologische noch ökonomische Auswirkungen haben und kein negatives Erbe für zukünftige Generationen sind, werden bevorzugt eingesetzt. Insbesondere im Bereich der Energieversorgung auf Basis regenerativer Energien erfährt die Sicherstellung einer nachhaltigen Energiegewinnung eine wichtige Bedeutung.

Zur Sicherstellung eines nachhaltigkeitsorientierten Ausbaus der Erneuerbarer Energien wie der On- und Offshore Windenergie liegt es nahe, Nachhaltigkeitsaspekte bereits bei der Planung, Fertigung und Ausführung der zugehörigen Stahlkonstruktionen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der FOSTA Anwendungsforschung eine Bewertungsmethodik entwickelt, welche eine Nachhaltigkeitsbewertung von Stahlkonstruktionen ermöglicht.

Im Rahmen der Forschungsvorhabens „Nachhaltige Stahlkonstruktionen für Erneuerbare Energien“ (NaStafEE) wurden 35 Kriterien ausgearbeitet, welche die drei Säulen der Nachhaltigkeit – Ökologie, Ökonomie und Soziologie, erweitert um technische und prozessbezogene Aspekte – beinhalten [15], [17]. Dieses Bewertungssystem ermöglicht einen unabhängigen Vergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten Erneuerbarer Energien aus Stahl unter Einbeziehung nachhaltigkeitsbezogener Aspekte, wobei die einfache Anwendbarkeit durch das Erstellen einer vereinfachten Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus der Anlagen sichergestellt ist. Die entwickelte Bewertungsmethodik dient somit als Entscheidungshilfe für oder gegen bestimmte Ausführungsvarianten der verschiedenen Erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung der Anforderungen an eine nachhaltige Bauweise und leistet somit einen wichtigen Beitrag zum Sicherstellen einer nachhaltigen Energiegewinnung durch regenerative Energien.

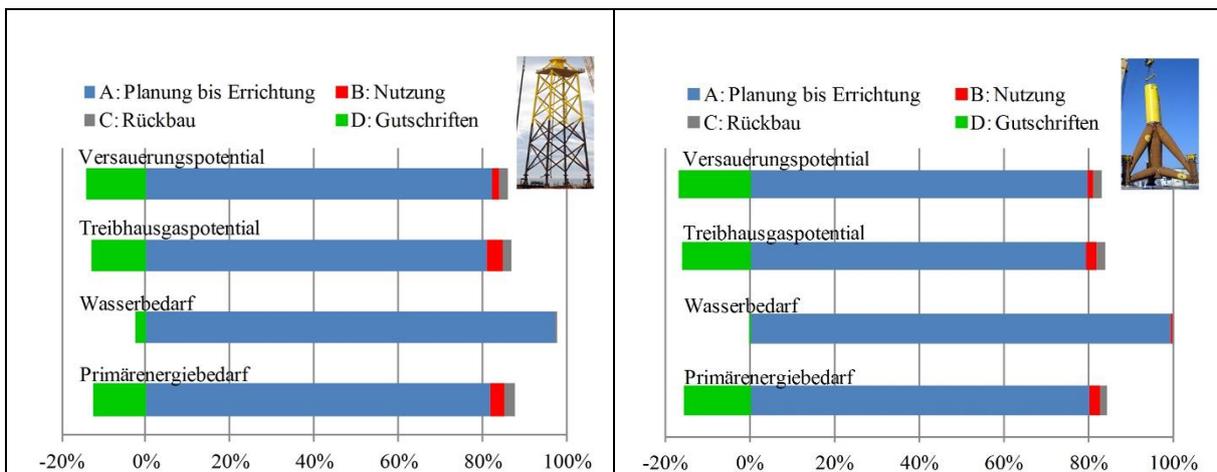


Bild 7 Ökologische Ergebnisse am Beispiel von vier Kriterien für die Lebenszyklusphasen A bis D eines Jackets (links) und eines Tripods (rechts)

Zusammenfassung

Die besonderen Herausforderungen in der Windenergie liegen in der hochdynamischen Belastung der Komponenten und in der stetig steigenden Anlagenhöhe und -größe, die in dieser Zeit die 10 MW Grenze pro Turbine erreicht. Bei Offshore Windenergieanlagen kommen die äußerst widrigen Umgebungsbedingungen hinzu. Das Design muss höchste Anforderungen an Tragsicherheit, Ermüdungsfestigkeit, Funktionsfähigkeit und Robustheit gewährleisten. Dabei sind die fluktuierenden Beanspruchungen aus Wind und Betrieb zu berücksichtigen; offshore gesellen sich dazu Beanspruchungen aus Seegang, Strömung und in der Ostsee Eisgang. Diese besonderen Anforderungen definieren die aktuellen Forschungsthemen im Bereich der Stahlanwendungsforschung für die Windenergie.

Es liegt auf der Hand, dass, wenn es um den Konstruktionswerkstoff Stahl geht, strukturmechanische Problemstellungen dominieren. Eine besondere Herausforderung ist die Werkstoffermüdung. Für Schraub-, Schweiß- und Hybridverbindungen gilt es zuverlässige und gleichzeitig wirtschaftliche Lösungen zu entwickeln, die den hohen zyklischen Beanspruchungen und Lastwechselzahlen bei zunehmenden Bauteildicken gewachsen sind. Um der Besonderheit der Serienfertigung gerecht zu werden, sind automatisierte Fertigungsprozesse anzustreben, die die Möglichkeiten der Digitalisierung ausschöpfen. Für den Offshorebereich zählt der Korrosionsschutz und die Installationstechnik zu den besonderen Themen. Ferner ist die Werkstoffwahl von Relevanz. Für die Betriebszeit der Anlagen sind Monitoringsysteme zu entwickeln, die einen sicheren Anlagenbetrieb gewährleisten und frühzeitige Schadensdetektion ermöglichen, um den Aufwand für Instandsetzungen zu minimieren.

Eine Auswahl von Forschungsprojekten im Bereich der Windenergie aus der jüngeren Zeit, die von der FOSTA unterstützt wurden, werden in diesem Beitrag skizziert.

Die Autoren gratulieren der FOSTA zum 50. Geburtstag und wünschen weiterhin viel Erfolg.

Literatur

- [1] REN21: Renewables 2015 Status Report. Paris, Frankreich : Renewables Energy Policy Network for the 21th Century, 2015.
- [2] International Energy Agency: Technology Roadmap - Wind Energy. Paris, Frankreich : IEA, 2013.
- [3] DIN EN 14399-4:2015-04: Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau – Teil 4: System HV – Garnituren aus Sechskantschrauben und –muttern; Deutsche Fassung EN 14399-4:2015.

- [4] DIN EN 14399-6:2015-04: Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau – Teil 6: Flache Scheiben mit Fase; Deutsche Fassung EN 14399-6:2015.
- [5] DASt-Richtlinie 021:2013-09: Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M39 bis M72 entsprechend DIN EN 14399-4, DIN EN 14399-6.
- [6] *Oechsner, M., Beyer, J., Simonsen, F., Schaumann, P., Eichstädt, R.:* Experimentelle und rechnerische Bewertung der Betriebsfestigkeit von Schrauben großer Abmessung im Stahlbau unter Berücksichtigung von Randschichteinflüssen. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben Nr. 486, FOSTA Projekt-Nr. P925, 2016
- [7] *Stranghöner, N., Lorenz, C., Feldmann, M., Citarelli, S., Bleck, W., Münstermann, S., Brinnel, V.:* Sprödbruch von hochfesten Schrauben großer Abmessungen bei tiefen Temperaturen. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 16752 N, FOSTA Projekt-Nr. P1014, Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [8] *Stranghöner, N., Makevičius, L., Henkel, K.-M., Glienke, R., Dörre, M.:* Vorspannkraftverluste ermüdungsbeanspruchter vorgespannter Schraubverbindungen. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 18711 BG, FOSTA Projekt-Nr. P1091, Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [9] *Makevičius, L., Stranghöner, N.:* Vorspannkraftverluste ermüdungsbeanspruchter vorgespannter Schraubverbindungen, 21. DASt-Forschungskolloquium, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Kaiserslautern, 6.-7. März 2018, S. 65-69.
- [10] DIN EN 1090-2:2011-10: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008+A1:2011.
- [11] *Stranghöner, N., Lorenz, C., Flügge, W., Glienke, R., Schwarz, M.:* Einfluss von fertigungs- und montagebedingten Imperfektionen auf das Tragverhalten geschraubter gleitfester Verbindungen im Stahlbau, Laufendes IGF-Forschungsvorhaben 19749 BG, FOSTA Projekt-Nr. P1266 (01.11.2017 – 30.04.2020).
- [12] DIN EN 1993-1-10:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009.
- [13] *Stranghöner, N., Lorenz, C., Feldmann, M., Citarelli, S., Bleck, W., Münstermann, S., Brinnel, V.:* Sprödbruch von hochfesten Schrauben großer Abmessungen bei tiefen Temperaturen. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 16752 N, FOSTA Projekt-Nr. P1014, Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [14] *Stranghöner, N., Lorenz, C., Feldmann, M., Citarelli, S., Bleck, W., Münstermann, S., Brinnel, V.:* Sprödbruchverhalten hochfester Schrauben

großer Abmessungen bei tiefen Temperaturen, Stahlbau 87 (2018), Heft 1, S. 17-29.

- [15] *Kühn, B.; Krieglstein, T.:* Richtige Stahlsortenauswahl zur Vermeidung von Sprödbruch in Offshore-Gründungsbauteilen, Konstruktiver Ingenieurbau (2017), Heft 10, Bundesanzeiger Verlag, Köln, S. 31-36.
- [16] *Schaumann, P.; Bechtel, A.; Wagner, H.-J.; Baack, C.; Lohmann, J.; Stranghöner, N.; Berg, J.:* Zur Nachhaltigkeitsbewertung von Stahlkonstruktionen für regenerative Energien, Stahlbau 80 (2011), Heft 10, Ernst & Sohn, Berlin, S. 711-719
- [17] *Stranghöner, N.; Berg, J.; Gorbachov, A.; Schaumann, P.; Bechtel, A.; Eichstädt, R.; Wagner, H.-J.; Baack, C.; Lohmann, J.:* Nachhaltigkeitsbewertung stählerner Tragkonstruktionen Erneuerbarer Energien, Stahlbau 82 (2013), Heft 1, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 42-48
- [18] DIN 18088-3:2017-12, Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 3: Stahlbauten
- [19] *Gericke, A., Glienke, R., Henkel, K.-H., Ripsch, B., Wegener, F.:* Alternative thermische Fügekonzepte zur Reduktion der Kerbwirkung bei stahlbaulichen Anwendungen, Beitrag im Tagungsband, DVS Congress 2017
- [20] *Günther, H.-P., Glienke, R., Gericke, A. und Marten, F.:* MSG-Lötverbindungen - Untersuchungen zur Tragfähigkeit und zum Ermüdungsverhalten, Beitrag in Festschrift zum 60. Geburtstag von Frau Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann, August 2017

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. **Schaumann**, Peter; Institut für Stahlbau, ForWind, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. habil. **Stranghöner**, Natalie; Institut für Metall- und Leichtbau, Universität Duisburg-Essen

Prof. Dr.-Ing. **Flügge**, Wilko; Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Universität Rostock