

# Fertigungsprozess und Ermüdungsfestigkeit von automatisiert gefertigten Hohlprofilknoten für Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen

Peter Schaumann, Michael Rethmeier, Karsten Schürmann, Andreas Pittner

Die Entwicklung in der Offshore-Windenergie hin zu größeren, leistungstärkeren Anlagentypen sowie die zeitgleich zunehmenden Wassertiefen der projektierten Windparks stellt u. a. Designer und Fertiger der Gründungsstrukturen von Windenergieanlagen vor wachsende Herausforderungen. Neben dem Gründungskonzept mittels XL-Monopiles rückt auch die Jacketgründung, wegen der Kombination aus dem vergleichsweise geringen Materialverbrauch bei gleichzeitig hoher Steifigkeit, in den Fokus. Der Fertigungsaufwand der Jackets ist verglichen mit Monopiles groß; kann jedoch durch die Kombination aus Standardrohren mit automatisiert gefertigten Jacketknoten reduziert werden. Vor diesem Hintergrund befasst sich dieser Beitrag zum einen mit dem automatisierten Fertigen von X-förmigen Hohlprofilknoten für Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen sowie der Digitalisierung relevanter Fertigungsparameter. Des Weiteren werden Schwingversuche zum Quantifizieren der Ermüdungsfestigkeit robotergeschweißter Hohlprofilknoten vorgestellt.

## Einleitung

Begründet durch die deutsche Strategie, Offshore-Windparks möglichst entfernt der Küstenlinie zu projektieren, weisen die Windparks in der Ausschließlichen Wirtschaftszone Deutschlands zum größten Teil Wassertiefen um und über 35 m auf. Für diese Standorte kommen als Gründungsstruktur neben (XL-) Monopiles auch aufgelöste Tragstrukturen wie Jackets in Betracht, vgl. Abbildung 1. Beispielsweise wurden in der Ostsee im Windpark Wikinger bis Ende 2018 70 Windenergieanlagen der 5 MW-Klasse auf Jackets in einer Wassertiefe von 37 – 43 m installiert und in Betrieb genommen [1].



Abbildung 1: Offshore Windenergieanlage mit Jacketgründungsstruktur aus dem Windpark alha ventus

Jacket-Gründungsstrukturen werden als räumlich aufgelöste Hohlprofilkonstruktionen angelehnt an den Bau von Öl- und Gasplattformen ausgeführt und zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit bei geringem Materialeinsatz aus [2]. Die räumliche Struktur der Jackets wird dabei mit den typischen Anschlussvarianten Doppel-K-, X- und Doppel-Y-Knoten erzeugt.

Gerade für Jackets ist das Optimierungspotential für Fertigung und Design nahezu ungenutzt. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Optimierung ist das Herauslösen der Jackenknoten aus der Gesamtkonstruktion sowie der Einsatz von Standardhohlprofilen. Dieses Baukastenprinzip ermöglicht eine automatisierte Fertigung der Jacketknoten, die die Wettbewerbsfähigkeit der Jackets vor allem vor dem Hintergrund der großen Stückzahlen, wie sie für Offshore-Windparks erforderlich sind, erhöht, vgl. [3]. Zusätzlich ermöglicht die automatisierte Fertigung der Jacketknoten das Legen einer zusätzlichen inneren Wurzellage, wodurch ermüdungskritische Wurzelfehler vermieden werden können.

Neben dem verbesserten seriellen Fertigungsprozess zeigen die automatisiert geschweißten Rohrknöten großes Potenzial in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit, bspw. durch die im Vergleich zu manuell geschweißten Knöten weiche und gleichmäßige Schweißnahtgeometrie ohne scharfe Kerben. Diese Vorteile können jedoch im Rahmen des Designprozesses aufgrund der in den Normen und Richtlinien fehlenden Wöhlerlinien für automatisiert gefertigte Hohlprofilknöten nicht berücksichtigt werden. Deshalb wurde in dem gemeinsamen FOSTA-Forschungsprojekt (AiF) „FATInWeld“ des Instituts für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zum einen ein automatisierter Fertigungsprozess für Hohlprofilknöten entwickelt. Zum anderen wurden die Einflüsse aus der Fertigungsautomatisierung und dem Innenschweißen auf die Ermüdungsfestigkeit über Schwingversuche quantifiziert.

### **Automatisiertes Schweißen von Hohlprofilknöten**

Ein primäres Ziel des Forschungsvorhabens war die vollständige Erfassung relevanter Prozesskenngrößen entlang der schweißtechnischen Fertigungskette. Wie in Abbildung 2 dargestellt, ist die automatisierte Fertigung durch eine durchgängige digitale Erfassung und Verknüpfung der Datensätze auf Basis eines Metadatenschemas in Form einer relationalen Datenbank gekennzeichnet. Prozessseitig werden die Charakteristika des eingesetzten MSG-Pulsprozesses erfasst. Dies beinhaltet die Aufnahme des transienten Strom-Spannungsverhaltens, des Drahtvorschubs und des Schutzgasvolumenstromes sowie HDR-Kameraaufnahmen zur Analyse der Schmelzbaddynamik. Weitere Metadaten zur Beschreibung des Schweißverfahrens bzw. Maschinen- und Sensoreinstellungen werden in der Datenbank hinterlegt und dem Bauteil eindeutig zugeordnet. Durch die semantische Beschreibung der Datensätze können diese gezielt aggregiert werden. Die dadurch ermöglichte Analyse historischer Produktionsdaten stellt ein großes Potenzial zur Ableitung adaptiver Prozessführungsstrategien sowie einer digitalisierten Qualitätsüberwachung dar.

Neben der prozessorientierten Sensorik wurde ein weiterer Schwerpunkt auf die Erfassung von Fertigungsrandbedingungen gelegt. Eine wesentliche Einflussgröße auf das Schweißergebnis ist hierbei die lokale Fugengeometrie, welche entlang der Schweißtrajektorie variiert. Diese Variation ist neben normativen Randbedingungen bzgl. der Nahtvorbereitung (Variation des

Nahtöffnungswinkels in Abhängigkeit des Dihedralwinkels) vor allem durch Geometrietoleranzen der Halbzeuge geprägt. In diesem Zusammenhang wurde für jeden Knoten die lokale Fugen- sowie Schweißnahtgeometrie mit einem Lasertriangulationssensor erfasst. Die Zuordnung der Profildaten bezüglich einer korrespondierenden Position entlang der Schweißtrajektorie ermöglicht die komplette dreidimensionale Abbildung der Ist-Geometrie des Hohlprofilknotens, auf deren Basis die Prozessführung abgeleitet wird. In Abbildung 3 sind exemplarisch für die Sattelposition ( $270^\circ$ ) die Profildaten für die zwei Versuchsreihen (32 Rohrknotten) überlagert dargestellt. Die maximale Breite des Streubandes beträgt lediglich 0,8 mm, wodurch die hohe Reproduzierbarkeit der lokalen Schweißnahtgeometrie aufgezeigt werden kann.

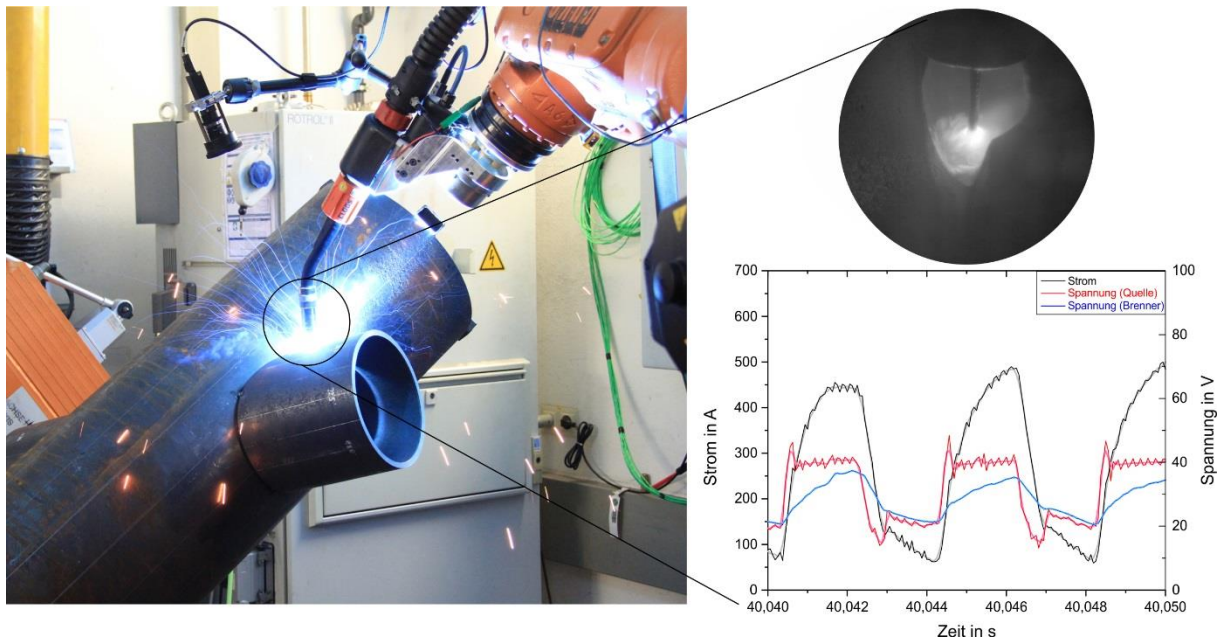


Abbildung 2: Erfassung von Prozesskenngrößen und Fertigungsrandbedingungen während des automatisierten Schweißens von Hohlprofilknotten

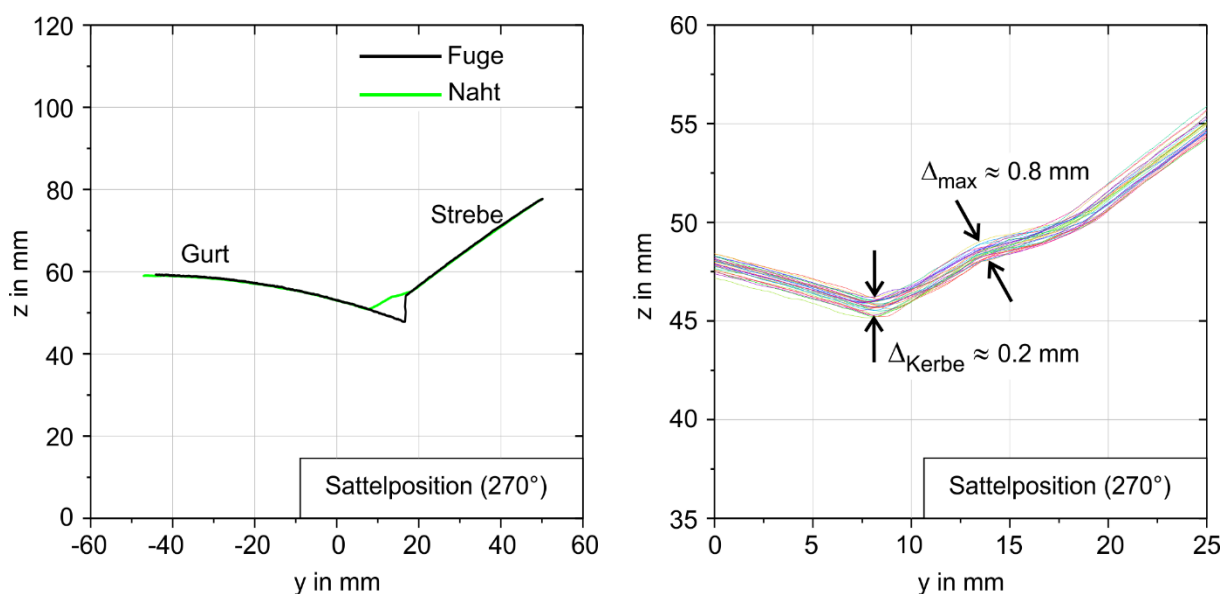


Abbildung 3: Lokale Nahtgeometrie an der Sattelposition ( $270^\circ$ ) überlagert für 32 geschweißte Hohlprofilknotten

## Versuchsaufbau der axialen Schwingversuche

Die Einflüsse aus Fertigungsautomatisierung und Innenschweißen auf die Ermüdungsfestigkeit der Hohlprofilknoten für Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen wurden anhand aufwendiger Ermüdungsversuche experimentell quantifiziert. Hierfür wurden insgesamt 2 Serien mit jeweils 16 X-Knoten getestet, wobei die X-Knoten der ersten Serie einseitig von außen geschweißt worden sind. Die X-Knoten der zweiten Serie wurden mit einer zusätzlichen Wurzellage doppelseitig geschweißt.

Die axialen Ermüdungsversuche wurden am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover mit einem servohydraulischen 1 MN (dynamisch) Prüfzylinder durchgeführt, vgl. Abbildung 4. Die Versuche wurden kraft geregelt mit einer Prüffrequenz von 5 Hz und einem Spannungsverhältnis der Unter- zu Oberspannung von  $R = 0,1$  durchgeführt.

Als Versagenkriterium der Ermüdungsversuche ist mit Bezug auf die maßgebenden normativen Regelungen der DNVGL-RP-C203 [4] und der DIN EN ISO 19902 [5] der Wanddurchriss festgelegt worden, welcher über eine Innenluftdruckprüfung detektiert worden ist. Zusätzlich zu der Druckluftmessung sind zwei eigenständigen ARAMIS 3D 12 M Systeme am Prüfraum befestigt worden. Mit diesen photogrammetrischen Systemen wurde die Entwicklung der einsetzenden bzw. fortschreitenden Ermüdungsschädigung optisch aufgezeichnet, wodurch die Historie der Ermüdungsschädigung in den Hot-Spots digitalisiert wurde. Der genaue Ablauf der ARAMIS-Messungen wird in [6] detailliert beschrieben

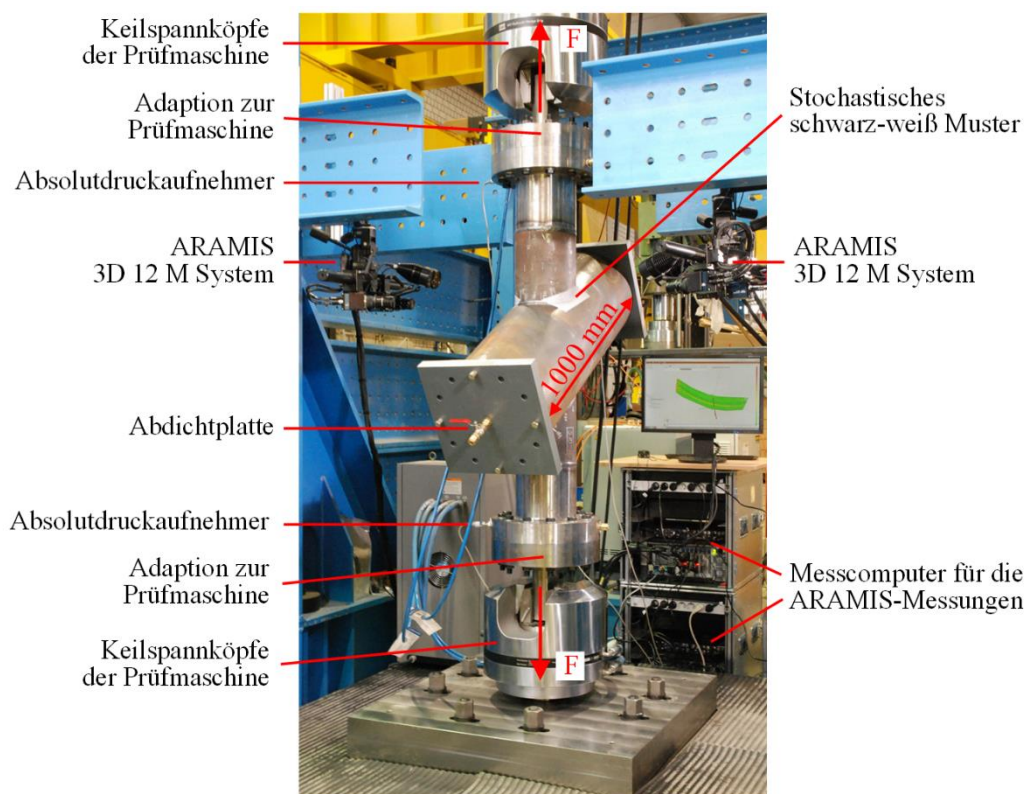


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die axialen Ermüdungsversuche an den automatisiert gefertigten X-förmigen Hohlprofilknoten

## Ermüdungsverhalten der automatisiert gefertigten Hohlprofilknoten

Die Entwicklung der Ermüdungsschädigung ist in Abbildung 5 dargestellt. In den Ergebnissen der ARAMIS-Messung ist deutlich zu erkennen, dass für den vorliegenden X-Knoten erste schädigungsbedingte Dehnungs-Hot-Spots nach ca. 50% der Lebensdauer bis zum Wanddurchriss in der Kerbe am Gurt aufgetreten sind, vgl. Abbildung 5 b). Die einzelnen, verteilten Dehnungs-Hot-Spots vergrößerten und vereinigten sich im Verlauf des Versuchs, sodass nach ca. 70 % Lebensdauer bis zum Wanddurchriss ein erster ca. 30 mm langer Anriss in der Kerbe zum Gurt visuell detektiert werden konnte vgl. Abbildung 5 c). Dieser Riss ist anschließend entlang der gurtseitigen Kerbe gewachsen, bis der Wanddurchriss durch Druckabfall detektiert werden konnte. In der strebenseitigen Kerbe konnte keine Ermüdungsschädigung festgestellt werden. Ein vergleichbarer Ermüdungsprozess konnte auch bei den weiteren Ermüdungsversuchen festgestellt werden.

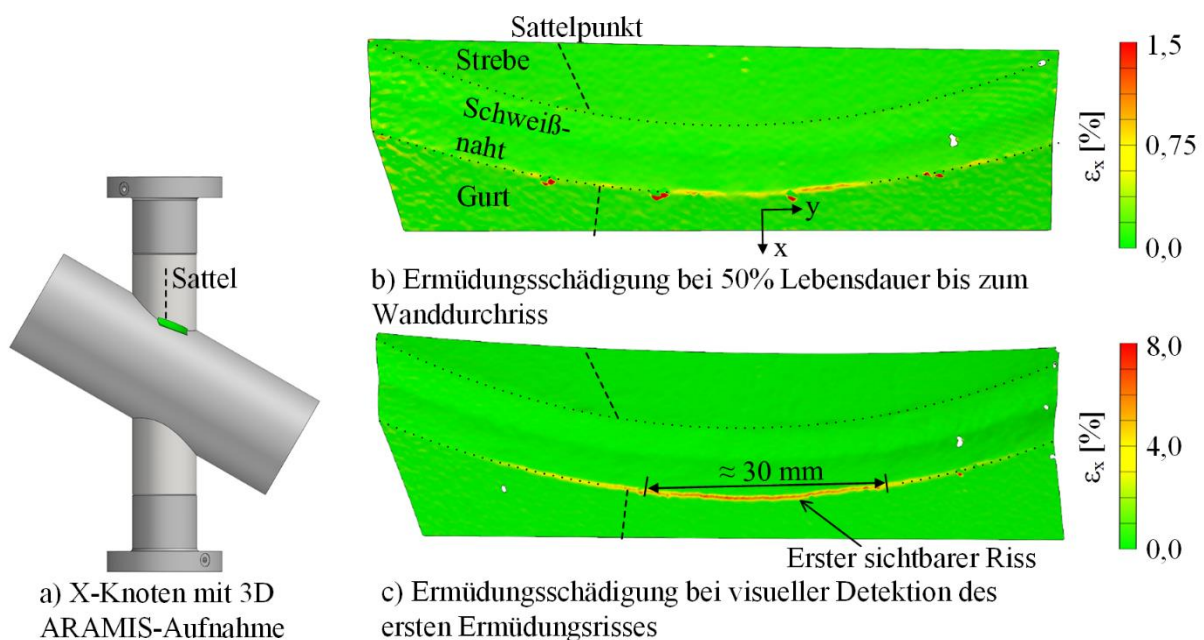


Abbildung 5: ARAMIS Aufnahme der fortschreitenden Ermüdungsschädigung der automatisiert gefertigten Hohlprofilknoten

## Ermüdungsfestigkeit automatisiert gefertigter Hohlprofilknoten

Nach aktuellem Stand der Technik wird die Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilknoten für Offshore-Jackets auf Basis des Strukturspannungskonzeptes unter Berücksichtigung von Strukturspannungswöhlerlinien bestimmt, vgl. [4], [5]. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Ermüdungsversuche beider Versuchsserien unter Berücksichtigung der maßgebenden Strukturspannung an der ermüdungskritischen Kerbe zum Gurt ausgewertet. Der hierfür benötigte Spannungskonzentrationsfaktor (SCF) wurde unter Berücksichtigung der realen Schweißnahtgeometrie auf Basis der Anforderungen der DNVGL-RP-C203 [4] numerisch bestimmt (vgl. [7], [8]) und berechnet sich für beide geprüften X-Knotenvarianten zu

$$\begin{aligned} \text{SCF}_{G, \text{einseitig}} &= 4,36 \\ \text{SCF}_{G, \text{doppelseitig}} &= 4,41 \end{aligned} \tag{3.1}$$

In Abbildung 6 werden die aus den Ergebnissen der Ermüdungsversuche an den ein- und beidseitig geschweißten X-Knoten resultierenden Strukturspannungswöhlerlinien dargestellt, die gemäß des Vorgehens der Hintergrunddokumentation zum Eurocode 3 Teil 1 - 9 [9] berechnet worden sind.

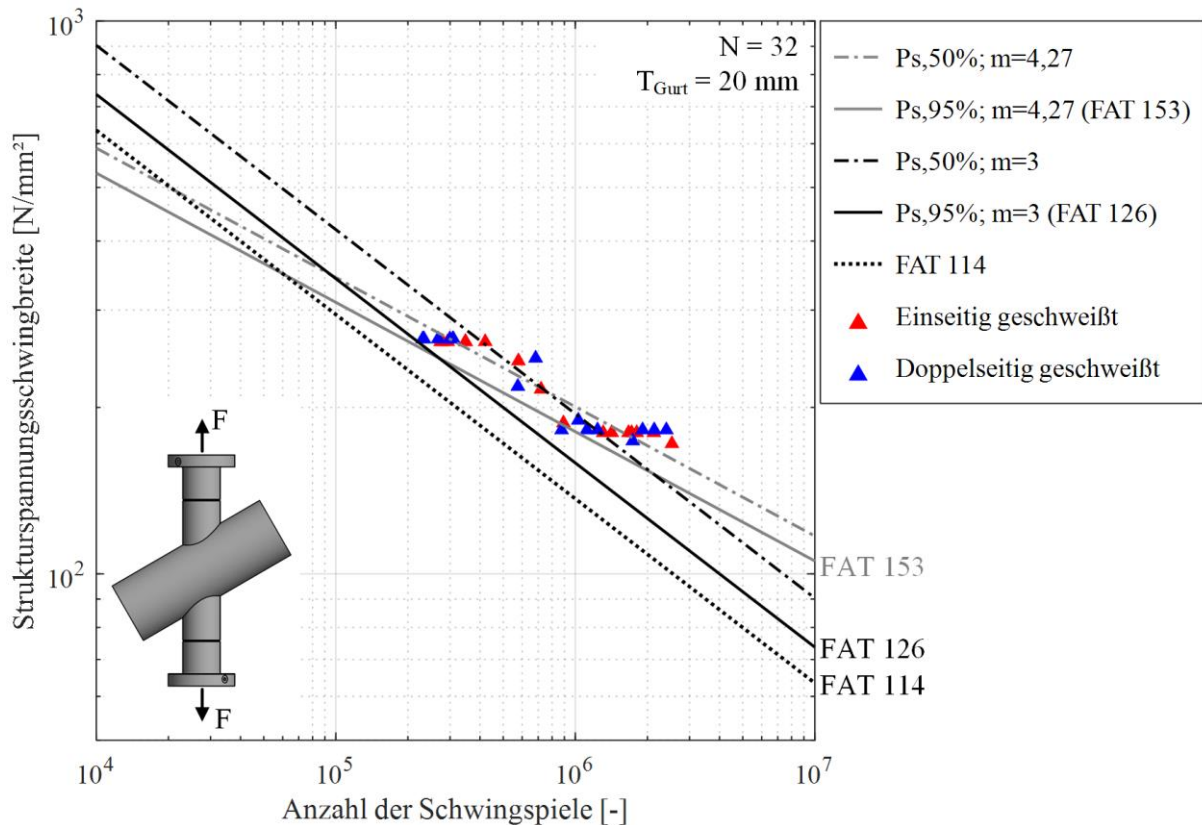


Abbildung 6: Strukturspannungswöhlerlinien für die ein- und doppelseitig automatisch geschweißten X-Knoten

Für die kombinierte Auswertung beider Versuchsserien der automatisch geschweißten X-Knoten ergibt sich aus den insgesamt 32 durchgeführten Ermüdungsversuchen (95% Überlebenswahrscheinlichkeit) eine Bemessungswöhlerlinie mit einer charakteristischen Schwingbreite von  $\Delta\sigma_C = 153 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (FAT 153). Die natürliche Neigung dieser Wöhlerlinie ist mit  $m = 4,27$  deutlich flacher als die sonst üblicherweise bei Wöhlerlinien von geschweißten Stahlbauteilen angesetzte Neigung von  $m = 3$ . Bei einer als fest angenommenen Steigung der Strukturspannungswöhlerlinie von  $m = 3$  ergibt sich eine 95%-Bemessungswöhlerlinie mit einer charakteristischen Schwingbreite von  $\Delta\sigma_C = 126 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (FAT 126). Diese charakteristische Schwingbreite für die automatisch gefertigten X-Knoten ist im Vergleich zu der aktuell gültigen Bemessungswöhlerlinie für geschweißte Hohlprofilknoten mit einer charakteristischen Schwingbreite von  $\Delta\sigma_{C, \text{DNVGL}} = 114 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (FAT 114) um 10 % erhöht.

### Zusammenfassung

Mit Blick auf die manuelle Fertigung von Jacket-Gründungsstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen bietet die Kombination aus dem Einsatz von Standardhohlprofilen sowie einer automatisierten Fertigung der Hohlprofilknoten großes Optimierungspotential. Anhand des Bei-

spiels eines X-förmigen Hohlprofilknotens wurde die schweißtechnische Prozesskette der automatisierten Fertigung sowie Digitalisierungsmöglichkeiten der relevanten Fertigungsparameter zur Qualitätskontrolle und Nachverfolgbarkeit dargestellt. Hierbei können jeder Position entlang der Schweißtrajektorie eindeutig neben Prozesskenngrößen auch die lokale Schweißnahtgeometrie zugeordnet werden. Die automatisierte Fertigungsstrategie zeichnet sich hierbei durch eine sehr gute Reproduzierbarkeit der erhaltenen Schweißnahtgeometrien unter Berücksichtigung von toleranzbehafteten Halbzeugen aus. Dies stellt die Grundlage für die Ableitung von Korrelationen zwischen Prozess sowie Schweißnahteigenschaften in Bezug zur Kerbgeometrie dar. Der Einfluss des Schweißprozesses auf die Ermüdungsfestigkeit ist somit quantifizierbar und Optimierungspotenziale automatisierter Schweißverfahren gezielt einsetzbar.

Zusätzlich zur automatisierten Fertigung der Hohlprofilknoten wurden innerhalb des Forschungsvorhabens „FATInWeld“ 32 axiale Ermüdungsversuche an den robotergeschweißten X-Knoten durchgeführt, um die Ermüdungsfestigkeit zu quantifizieren. Hierbei ergab sich für die automatisiert geschweißten X-Knoten eine verbesserte 95 % Strukturspannungswöhlerlinie mit einer charakteristischen Schwingbreite von  $\Delta\sigma_C = 126 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (FAT 126) im Vergleich zu der aktuellen, normativ geregelten Wöhlerlinie FAT 114.

### Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19104 N / P 1178 "Quantifizierung der Einflüsse aus Fertigungsautomatisierung und Innenschweißen auf die Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilknoten für Offshore-Windenergieanlagen (FATInWeld)" der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführt. Die in dem Projekt erarbeiteten Forschungsergebnisse sind umfassend im zugehörigen Abschlussbericht dargestellt. Dieser Abschlussbericht ist bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) erhältlich.



Forschungsvereinigung  
Stahlanwendung e. V.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Literatur

- [1] <https://www.windbranche.de/news/nachrichten/artikel-35559-offshore-windpark-wikinger-vor-rgen-feierlich-eingeweiht> (Stand: 25.11.2019).
- [2] *Seidel, M.*: Substructures for offshore wind turbines Current trends and developments. Festschrift Peter Schaumann, S. 363 – 368, Hannover, 2014.
- [3] *Michels, G.; Brauser, S.*: Salzgitter Supply Chain Concept for Industrial Assembling of Offshore-Wind-Jackets. Conference Proceedings der International Wind Engineering Conference Hannover, Hannover, 2014.
- [4] *DNVGL-RP-C203*: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. DNV GL AS, April 2016.
- [5] *DIN EN ISO 19902*: Erdöl- und Erdgasindustrie - Gegründete Stahlplattformen. Berlin: Beuth Verlag, Januar 2014.
- [6] *Schaumann, P.; Schürmann, K.; Pittner, A.; Rethmeier, M.* (2019): Automatically Welded Tubular X-Joints - Welding Procedure and Prediction of the Technical Fatigue Crack Location, Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2019), Honolulu, Hawaii, USA, 16-21 June 2019, pp. 4098-4105.
- [7] *Schaumann, P.; Rethmeier, M.; Schürmann, K.; Pittner, A.; Dänekas, C.; Schippereit, C.*: Automatisierte Fertigung von Hohlprofilknoten für Jacket-Gründungsstrukturen - Darstellung der schweißtechnischen Prozesskette sowie Berücksichtigung der Prozessparameter beim Ermüdungsnachweis. Stahlbau, Vol. 87, Heft 9, Ernst & Sohn, Berlin, S. 897–909, 2018.
- [8] *Schaumann, P.; Schürmann, K.*: New proposal to express notch stress approach results by equivalent SCFs. International Journal of Fatigue, Vol. 119, pp. 11–19, 2019.
- [9] *ECCS Technical Committee 6 – Fatigue and Fracture*: Background Documentation 9.01a – Background information on fatigue design rules – Statistical evaluation, 3rd Draft, 30/01/2018.

### Autoren dieser Veröffentlichung:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Institut für Stahlbau, ForWind Hannover, Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 9A, 30167 Hannover  
E-Mail: [schaumann@stahl.uni-hannover.de](mailto:schaumann@stahl.uni-hannover.de)

Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier  
Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung (BAM)  
Fachbereich 9.3, Schweißtechnische Fertigungsverfahren  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
E-Mail: [michael.rethmeier@bam.de](mailto:michael.rethmeier@bam.de)

Karsten Schürmann, M. Sc.  
Institut für Stahlbau, ForWind Hannover, Leibniz Universität Hannover



Appelstraße 9A, 30167 Hannover  
E-Mail: schuermann@stahl.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Andreas Pittner  
Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung (BAM)  
Fachbereich 9.3, Schweißtechnische Fertigungsverfahren  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
E-Mail: andreas.pittner@bam.de