

Experimentelle Untersuchungen an Verbindungstechnologien für Offshore-Windenergieanlagen

Dipl.-Ing. Anne Bechtel *
Dipl.-Ing. Mareike Collmann *
Dipl.-Ing. Alexander Raba *
Dipl.-Ing. Stefanie Steppeler *

* Leibniz Universität Hannover, Institut für Stahlbau, Germany, stahlbau@stahl.uni-hannover.de

Abstract

To improve and optimize the design as well as the construction and fabrication of offshore wind turbines, experimental investigations especially for connections are of great importance. This paper deals with tests conducted to gain further knowledge about the fatigue performance of steel connections such as welds and grouted joints in offshore wind turbines. The focus is set on research tasks concerning the fatigue performance of welded thick steel plates, the very high cycle fatigue performance of butt welds and the fatigue performance of grouted joints in latticed structures with a rather large grout annulus.

Stichwörter: Offshore-Windenergie, Schrauben, Schweißen, Grout-Verbindungen, Ermüdung

1 Einleitung

Die Stabilität und Standsicherheit von Bauteilen, Anlagen oder Bauwerken wird nicht erst durch die Qualität der Fertigung und der hierbei verwendeten Verfahren bestimmt. Wesentlichen Einfluss hat die im Vorfeld getroffene Wahl der Konstruktion, die neben der Gestaltung auch die Bemessung und eine geeignete Werkstoffauswahl umfasst. In Offshore Windenergieanlagen (OWEA) eingesetzte Verbindungstechnologien, siehe Abbildung 1, stellen eine besondere Herausforderung dar. Bedingt durch die wachsenden Dimensionen der Anlagen sind größere Abmessungen und optimierte Fügeprozesse sowie Materialauswahl erforderlich. Neben den klassischen Verbindungstechniken des konstruktiven Stahlbaus, zu denen das Schrauben und Schweißen zählen, werden hybride Grout-Verbindungen verwendet, um die in den Meeresboden gerammten Pfähle mit der Tragstruktur zu verbinden. Verglichen mit den üblichen Abmessungen und dynamischen Beanspruchung des Stahlhochbaus sind aufgrund der erforderlichen Nabenhöhe, der schlanken Struktur und den hochfrequenten Belastungen die Bauteilabmessungen und damit auch die Verbindungsmittel deutlich größer. Über die Betriebszeit von 20 Jahren erfahren die Anlagen durch Wind-, Wellen- und Betriebslasten Beanspruchungen im hoch zyklischen Ermüdungsbereich mit bis zu 10^9 Lastwechseln.

Vor dem Hintergrund des geplanten Ausbaus der Offshore-Windenergie und der hierdurch bedingten großen Stückzahl und anzustrebenden Serienfertigung bieten die Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen ein hohes Optimierungspotential. Daher werden am Institut für Stahlbau unter Leitung von Prof. Schaumann unter anderem folgende Themen in aktuellen Forschungsarbeiten mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen fokussiert: Schweißen dicker Bleche, Auslegung hochdynamisch belasteter Schweißverbindungen sowie Trag- und Ermüdungsverhalten von Grout-Verbindungen. Ringflanschverbindung mit großen Schrauben werden in [1] behandelt.

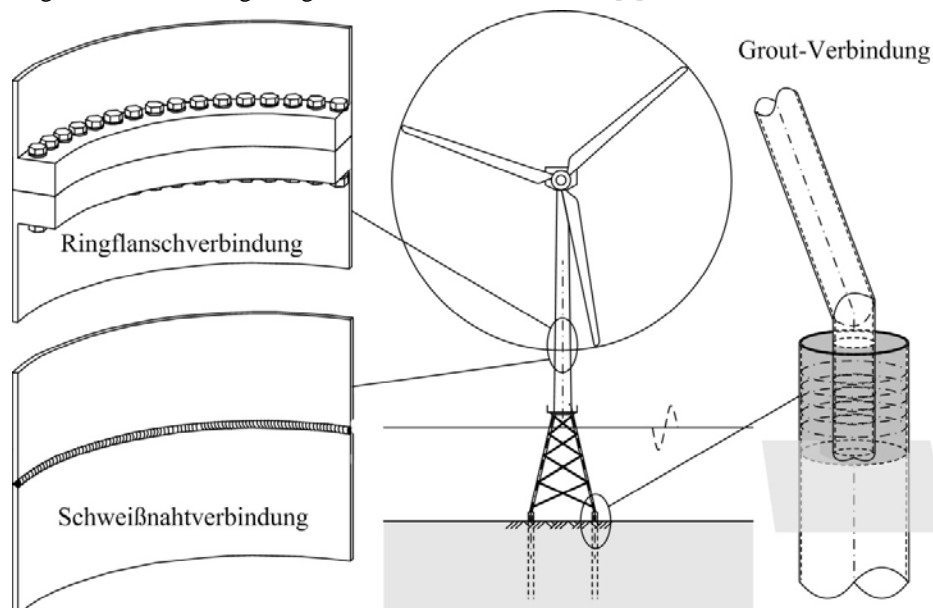


Abbildung 1: Verbindungstechnologien bei Offshore-Windenergieanlagen

2 Verbindungstechnologien

2.1 Schweißen

Seit Jahrzehnten stellen Schweißverbindungen ein wesentliches konstruktives Element beim Fügen metallischer Werkstoffe zu einem Bauteil dar. Anders als Schraub- oder Nietverbindungen, die zu den kraftschlüssigen und lösbaren Verbindungen gehören, zählen sie zu den stoffschlüssigen und damit nicht lösbaren Verbindungen, bei deren Trennung die Fügebauteile zerstört werden. Die Vorteile von Schweißverbindungen liegen in der Gestaltung eines direkten Kraftflusses und der hohen Kraftübertragung, die auch bei geringen Nahtdicken möglich ist. Die konstruktive Freizügigkeit kann damit erhöht und das Gewicht einer Konstruktion deutlich verringert werden. Auch für Reparaturen und Ausbesserungen ist dieses Fügeverfahren sehr gut einsetzbar. Gemäß DIN 1910-100 ist Schweißen ein „Fügeprozess, bei dem zwei oder mehr Teile verbunden werden, wobei eine Kontinuität der Werkstoffe der zu verbindenden Teile hergestellt wird, unter Anwendung von Wärme oder Kraft oder beiden mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff“. Es wird hierbei in Schmelz- und Pressschweißverfahren unterschieden. Schmelzschweißverfahren sind im konstruktiven Stahlbau weit verbreitet. Hierzu zählt insbesondere das Lichtbogenschweißen.

Die Stoffschlüssigkeit geschweißter Verbindungen, die beim Schweißen entstehenden Veränderungen im Gefüge, sowie die oft erheblichen mehrachsigen Spannungszustände erfordern eine dem Schweißverfahren angepasste Konstruktion. Nur unter Beachtung der schweißspezifischen Konstruktionsprinzipien können wirtschaftlich und technisch optimale Schweißkonstruktionen hergestellt werden. Ausreichende Zähigkeitseigenschaften der zu fügenden Werkstoffe sind ebenfalls ausschlaggebend für die Sicherheit geschweißter Bauteile.

2.2 Grout-Verbindungen

Grout-Verbindungen, sogenannte Grouted Joints, sind eine aus der Offshore-Öl- und Gasindustrie bekannte Verbindungstechnologie, die aus einer Rohr-in-Rohr-Steckverbindung besteht, bei welcher der Zwischenraum mit selbstverdichtendem Vergussmaterial gefüllt ist. Grouted Joints werden bei Erdöl- und Erdgasplattformen verwendet, um die Plattform mit den gerammten Gründungspfählen kraftschlüssig zu verbinden. Sie bieten für die hohen, schlanken OWEA den signifikanten Vorteil, dass Rammungenauigkeiten und Pfahlschiefstellungen ausgeglichen werden können. Daher findet diese Technologie in OWEA sowohl für Monopile-Strukturen als auch für aufgelöste Tragstrukturen, wie beispielsweise Jacket oder Tripod, Anwendung. Im Gegensatz zu den überwiegend statischen Belastungen bei Öl- und Gasplattformen ist die Verbindung bei OWEA einer überwiegend dynamischen, zyklischen Beanspruchung resultierend aus Anlagenbetrieb, Wind und Welle ausgesetzt. Demzufolge kommt dem Ermüdungsverhalten der Grout-Verbindung bei OWEA eine besondere Bedeutung zu. Als Folge werden höherfeste Füllmaterialien eingesetzt, die neben der hohen Tragfähigkeit deutlich spröderes Bruchverhalten aufweisen.

Der Einsatz und die Bemessung von Grout-Verbindungen bei Offshore-Öl- und Gasplattformen wurden durch experimentelle Untersuchungen eruiert, welche die Grundlage vorliegender Bemessungsregeln bilden. Nicht zuletzt aufgrund der veränderten Belastungssituation und deutlich größeren Abmessungen können diese Ansätze nur bedingt für die Bemessung von Grout-Verbindungen in OWEA verwendet werden. Für das Einsatzgebiet bei OWEA liegen bis heute keine in Deutschland anerkannten Regeln vor. Derzeit werden Grout-Verbindungen nach den Bemessungsansätzen in den Richtlinien des Det Norske Veritas [2] sowie des Germanischen Lloyd [3] vorgenommen. Für aufgelöste Tragstrukturen wird auf die Richtlinie des Norsok N-004 [4] und die ISO 19902 [5] verwiesen. Diese Ansätze basieren auf den Erkenntnissen der Öl- und Gasindustrie sowie einer geringen Anzahl an Grouted Joint Versuchen für OWEA. Bisherige Bemessungsansätze berücksichtigen das Trag- und Ermüdungsverhalten der Verbindung noch unzureichend und bieten Optimierungspotential. Daher gilt es entsprechende Ansätze für die Bemessung bei OWEA weiterzuentwickeln.

3 Schweißen

3.1 Aktuelle Herausforderungen geschweißter Bauteile

In der Fertigung von Großkomponenten für OWEA steigt der Bedarf an leistungsfähiger und schneller Fügebautechnik, um der erhöhten Nachfrage und der steigenden Bauteilgröße gerecht zu werden. Lange und mehrlagige Schweißnähte beim Fügen dicker Bleche führen die konventionelle Schweißtechnik an die Grenzen einer effizienten und ökonomischen Durchführbarkeit. Sie wird damit zu einer Schlüsseltechnologie im Herstellungsprozess. In aktuellen Forschungsarbeiten des Instituts für Stahlbau wird in Kooperation mit der ausführenden Industrie, Schweißtechnikherstellern sowie weiteren Forschungsinstituten an der Entwicklung alternativer Fügeverfahren gearbeitet. Hier sind insbesondere das Laser-MSG-Hybridschweißen, das Elektronenstrahlschweißen an der Atmosphäre sowie alternative Hybridverfahren zu nennen. Bei hervorragenden Schweißnahteseigenschaften sollen hiermit größere Einschweißstiefen bei reduziertem Nahtvolumen und eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit ermöglicht werden. Vor dem Hintergrund der hohen dynamischen Beanspruchung ist bei einer Beurteilung der Nähte die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit durch Schwingversuche besonders wichtig. Auch deshalb, weil die experimentelle Datenbasis für dickwandige Proben gefügt mit oben genannten alternativen Schweißverfahren als gering einzustufen ist. Nachfolgend werden exemplarisch einige Untersuchungsergebnisse dargestellt.

Neben Problemstellungen, resultierend aus zunehmenden Dimensionen, sind auch Fragestellungen im Hinblick auf eine sichere Betriebszeit von großem Interesse. Die grundlegende Relevanz des Ermüdungsverhalten von Werkstoffen bis in den Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen basiert auf der stetig steigenden Anzahl hochdynamisch beanspruchter Bauteile und Konstruktionen wie beispielsweise Maschinenteile und Eisenbahnräder sowie Brücken und Komponenten von

Windenergieanlagen. Diese sind häufig zyklischen Beanspruchungen von bis 10^9 Lastwechseln und mehr ausgesetzt. Daher kommt dem Ermüdungsverhalten von Konstruktionselementen wie Schweißverbindungen eine besondere Bedeutung zu. Aktuelle Forschungsarbeiten widmen sich der Realisierung von Ermüdungsversuchen bis in den Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen in einem akzeptablen Prüfungszeitraum sowie der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Stumpfnahverbindungen bei sehr hohen Lastwechselzahlen und werden im Folgenden dargestellt.

3.2 Einfluss von Schweißdefekten auf das Ermüdungsverhalten

In dem kürzlich abgeschlossenen Verbundforschungsvorhaben OPTIWELD [4] wurde u.a. das Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre für eine Anwendung im Dickblechbereich an Baustahl der Güte S355J2+N untersucht. Dieses Verfahren ist dem Strahlschweißen zuzuordnen, bei dem sich der für das Schweißen dicker Bleche wichtige Tiefschweißeffekt ausbildet. Durch eine Auskopplung des Elektronenstrahls an die Atmosphäre, kommt es zu einer Streuung der Elektronen und damit zu einer Aufweitung des Strahls. Abhängig vom Arbeitsabstand, der wiederum die Konzentration des Wärmeeintrags auf der Werkstückoberseite beeinflusst, sind mit diesem Verfahren verschiedene Randbedingungen und Nahtquerschnitte realisierbar. Die für Strahlschweißverfahren typischen hohen Abkühlgeschwindigkeiten sind mit diesem Verfahren durch eine Variation der Verfahrensparameter besser einzustellen, [7], [8].

Grundsätzlicher Ansatz des Projektes war, die positiven Eigenschaften des Unterpulververfahrens hinsichtlich der Nahtgeometrie für eine gute Ermüdungsfestigkeit zu erhalten und durch das Strahlschweißverfahren, den I-Stoß-Anteil der Naht zu erhöhen. Damit kann die Anzahl der Lagen gegenüber einer konventionell ausgeführten Naht reduziert werden. Die Nahtvorbereitung, die Schweißfolge sowie die zugehörigen Schriffe sind in Abbildung 2 dargestellt. Für die Variante b) wird die erste Lage Unterpulver geschweißt und dient als Badsicherung für die folgende Lage mit dem Elektronenstrahl. Das Schweißen dieser Lage erfolgt ohne Zusatzmaterial.

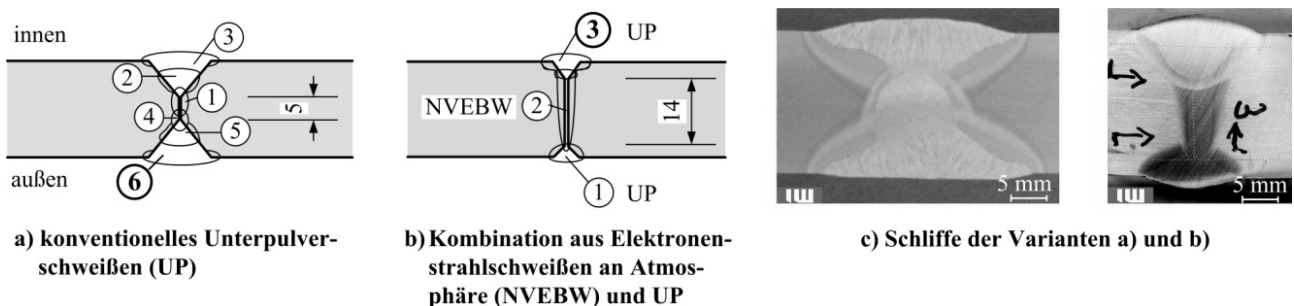


Abbildung 2: Nahtvorbereitung, Schweißfolge und Schriffe, Blechdicke $t = 20$ mm, S355 J2+N

Für eine Blechdicke von $t = 20$ mm kann die Lagenanzahl um 50 % und der Bedarf an Zusatzmaterial deutlich um etwa 80 % reduziert werden. Der Wärmeeintrag wird von durchschnittlich etwa 14 kJ/mm für eine konventionelle UP-Naht auf etwa 4,5 kJ/mm bei einer Kombination mit dem Elektronenstrahl an der Atmosphäre verringert.

Bei einer Überführung des Verfahrens auf größere Schweißnahtlängen ($l = 700$ mm) und Werkstückabmessungen ($b_{\text{ges}} = 500$ mm, $t = 20$ mm) traten in großen Bereichen der Nahtlänge Risse im Nahtquerschnitt auf. Durch Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop konnte der Riss im strahldominierten Querschnitt den Erstarrungsrissen und hier den als Mittelrippendefekt bezeichneten Schweißfehlern zugeordnet werden, [9]. Bei einer Untersuchung der statischen Zugtragfähigkeit zeigten sich keine Einflüsse des Defekts auf die maximal erreichbare Zugfestigkeit. Ein Versagen trat weiterhin im Grundmaterial auf. Für dynamisch hoch beanspruchte Konstruktionen müssen Schweißverbindungen nach den Qualitätsanforderungen der DIN EN ISO 5817 die Bedingungen der Bewertungsgruppe B erfüllen. Die hier auftretenden Defekte sind für Verbindungen dieser Bewertungsgruppe unzulässig. Erwartungsgemäß zeigen die mit konstanter Amplitude durchgeführten Ermüdungsversuche eine deutliche Verringerung der Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zu den konventionell geschweißten UP-Proben (siehe auch Abbildung 3). Zur Bestimmung der Wöhlerlinie im Bereich der Zeitfestigkeit wurden auf jeweils drei bis fünf Beanspruchungshorizonten mehrere, unter gleichen Bedingungen hergestellte Stumpfnahproben geprüft. Die Auswertung der ertragbaren Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ bei einer Schwingzahl von $N = 2$ Mio. Lastwechseln zeigt eine Reduktion der Ermüdungsfestigkeit um etwa 40 %. Die bei defektfreien Nähten beobachtete Rissinitiation am Nahtübergang entfällt. Der bereits im Nahtinnern bestehende Riss schreitet bis zum Versagen der Probe fort. Die Bruchflächen der versagten Proben zeigen deutlich das Ausmaß des Defekts. Mit zerstörungsfreien Prüfmethoden wie Röntgen (sehr aufwendig) oder konventionell eingesetzter Ultraschalltechnik lässt sich der senkrecht in der Naht liegende Defekt detektieren, allerdings nicht dessen Abmessungen bestimmen. Da schon sehr kleine rissähnliche Defekte zu einer Verlagerung des Ermüdungsrisswachstums ins Innere der Probe führen, ist damit eindeutig die Unzulässigkeit dieser Defekte in Verbindungen für dynamisch beanspruchte Konstruktionen begründet.

Um eine Anwendung neuartiger Hochleistungsschweißverfahren in der Praxis zu ermöglichen, ist eine reproduzierbare und defektfreie Ausführung sicherzustellen. Ziel weiterer Forschungsarbeiten wird sein, schon die Wirkung des Schweißens als Prozess zu beschreiben und verstärkt bei der Beurteilung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Nähte zu berücksichtigen.

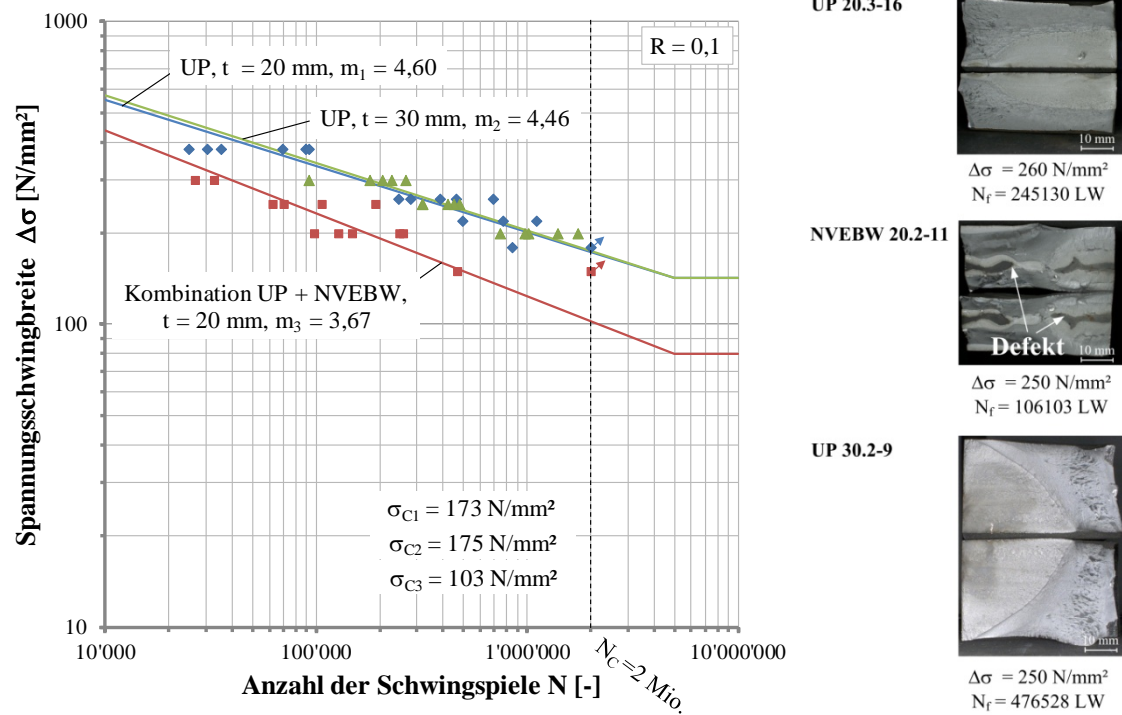


Abbildung 3: Auswertung der Schwingversuche ($\bar{P} = 50\%$) mit variabel angenommener Steigung m sowie Darstellung der Bruchflächen

3.3 Ermüdungsverhalten einer Stumpfnahverbindung bis in den Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen

In gültigen Regelwerken wie dem Eurocode 3 [10] basiert die Bemessung von Stahlkonstruktionen gegen Ermüdung auf experimentell ermittelten Wöhlerlinien. Ab dem Abknickpunkt wird üblicherweise von einer Dauerfestigkeit ausgegangen. Allerdings ist der Verlauf der Ermüdungsfestigkeitskurven in diesem Bereich nicht abschließend geklärt. Die Existenz einer Dauerfestigkeit wird prinzipiell in Frage gestellt [11]. Ermüdungsversuche an Schweißverbindungen mit mehr als 10^7 Lastwechseln sind bisher aufgrund eingeschränkter Möglichkeiten in der Versuchsführung nur begrenzt verfügbar [12].

Das Ermüdungsverhalten von axial beanspruchten Stumpfnahverbindungen aus Stahl wurden bei konstanter Spannungsschwingbreite bis in den Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen untersucht. Hierbei stand die Weiterentwicklung der Prüftechnik, um Ermüdungsversuche in einem akzeptablen Zeitraum zu realisieren, sowie die Ausweitung der experimentellen Untersuchungen, die einen Beitrag zur Klärung der Fragestellung des Vorliegens einer Dauerfestigkeit leisten sollen, im Vordergrund.

Für Ermüdungsversuche bis in den Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen sind Prüfmaschinen mit hohen Prüffrequenzen erforderlich, um einen angemessenen Prüfungszeitraum zu erzielen. In einer hochfrequenten Prüfvorrichtung gemäß [14] wurden Ermüdungsversuche mit etwa 390 Hz bis zu einer Grenzschwingspielzahl von $5 \cdot 10^8$ Lastwechseln realisiert. Die Prüfvorrichtung besteht aus einem Regelkreis, der sich aus Resonanzkörper, Wechselstrommagneten, Dehnungsmessstreifen, Messverstärker, Regelungseinheit und Leistungsverstärker zusammensetzt. Der Aufbau der hochfrequenten Prüfvorrichtung ist in Abbildung 4 (links) dargestellt. Der Resonanzkörper hat die Form eines geschlossenen rechteckigen Rahmens mit verlängerten Längsseiten (Hebelarmen). Die Lagerung des Resonanzkörpers erfolgt reaktionskräftefrei in den Rahmenecken über Passstifte auf einer Grundplatte. Die Wechselstrommagnete sind an den Enden der Hebelarme ebenfalls auf der Grundplatte befestigt.

Das Funktionsprinzip der hochfrequenten Prüfvorrichtung ist in Abbildung 4 (rechts) veranschaulicht. Die Prüfvorrichtung wird elektromagnetisch über die Wechselstrommagnete in der Biegeeigenform des Resonanzkörpers harmonisch angeregt. Die Rahmenecken stellen hierbei die Knotenpunkte der Biegeeigenschwingung des Resonanzkörpers dar. Durch die Anordnung des Probekörpers in der Mitte der Prüfvorrichtung wird dieser rein axial beansprucht. Der Probekörper wird mit Exzenterwellen über Spannklötze gegen den Resonanzkörper verspannt. Auf den Außen- und Innenseiten des Resonanzkörpers sind Dehnungsmessstreifen appliziert. Über den Messverstärker erhält die Regelungseinheit ein elektrisches Signal der Dehnung des Resonanzkörpers. Die elektromagnetische Anregung des Resonanzkörpers erfolgt über Rückkopplung dieses Signals der Eigenschwingung, das der Beanspruchung des Probekörpers proportional ist. Die Kalibrierung des Signals erfolgt über mit Dehnungsmessstreifen versehene Probekörper. Die Regelungseinheit gleicht das gemessene Signal mit dem Sollwert ab und steuert über den Leistungsverstärker die Wechselstrommagnete an. Weitere Details zur Prüfvorrichtung und Einzelheiten zur Regelung können [14] und [15] entnommen werden.

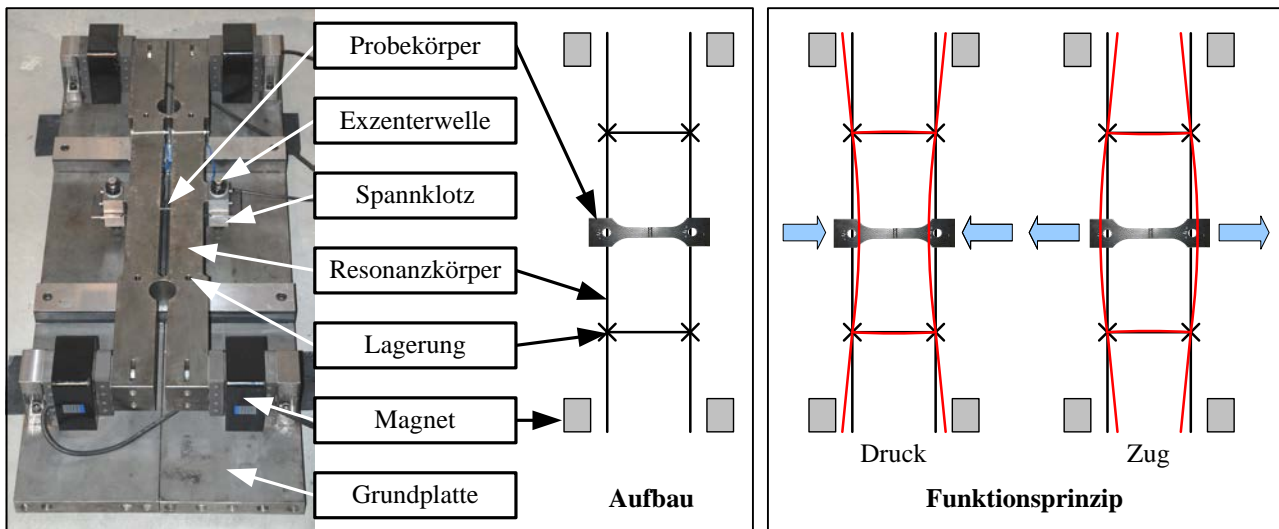


Abbildung 4: Aufbau (links) und Funktionsprinzip (rechts) der hochfrequenten Prüfvorrichtung

Die bauteilähnlichen Probekörper für die Ermüdungsversuche wurden aus im MAG-Schweißverfahren mit einer einlagigen Stumpfnah gefügten Bleche ($t = 4 \text{ mm}$) der Güte S355J2+N gefräst. Die Geometrie der Probekörper ist an die speziellen Randbedingungen der Prüfvorrichtung angepasst, wobei sich die Schweißnaht in Probenmitte befindet. Die Außenabmessungen der Probekörper betragen $300 \times 70 \text{ mm}$, wobei sie im Bereich des Prüfquerschnitts tailliert sind und eine Breite von 25 mm aufweisen. Einzelheiten zur Herstellung der Probekörper sowie der Bewertung der Reproduzierbarkeit können [13] und [16] entnommen werden.

Im Zeitfestigkeits- und Übergangsbereich wurden Schwingversuche an insgesamt 89 Probekörpern in drei Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss von Prüffrequenz und Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen. Versuchsreihe 1 (V1) wurde in einer konventionellen servohydraulischen Prüfmaschine bei 20 Hz als Referenzwöhlerlinie bei einem konstanten Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ ermittelt. Versuchsreihe 2 (V2) und Versuchsreihe 3 (V3) wurden in der vorgestellten Prüfvorrichtung bei etwa 390 Hz mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen ($R = 0,1$ und $R = 0,5$) geprüft. Der Einfluss der Prüffrequenz wird durch den Vergleich von Versuchsreihe 1 und 2 untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 (links) dargestellt. Es zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Prüffrequenz im Zeitfestigkeits- und Übergangsbereich, wobei die Ergebnisse keine einheitliche Aussage zulassen. Der Einfluss der Mittelspannung wird durch den Vergleich von Versuchsreihe 2 und 3 untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 (rechts) dargestellt. Der Einfluss einer erhöhten Mittelspannung ist lediglich im Zeitfestigkeitsbereich in Form einer flacher geneigten Wöhlerlinie zu erkennen. Eine ausführliche Diskussion der Versuchsergebnisse kann [13] und [17] entnommen werden.

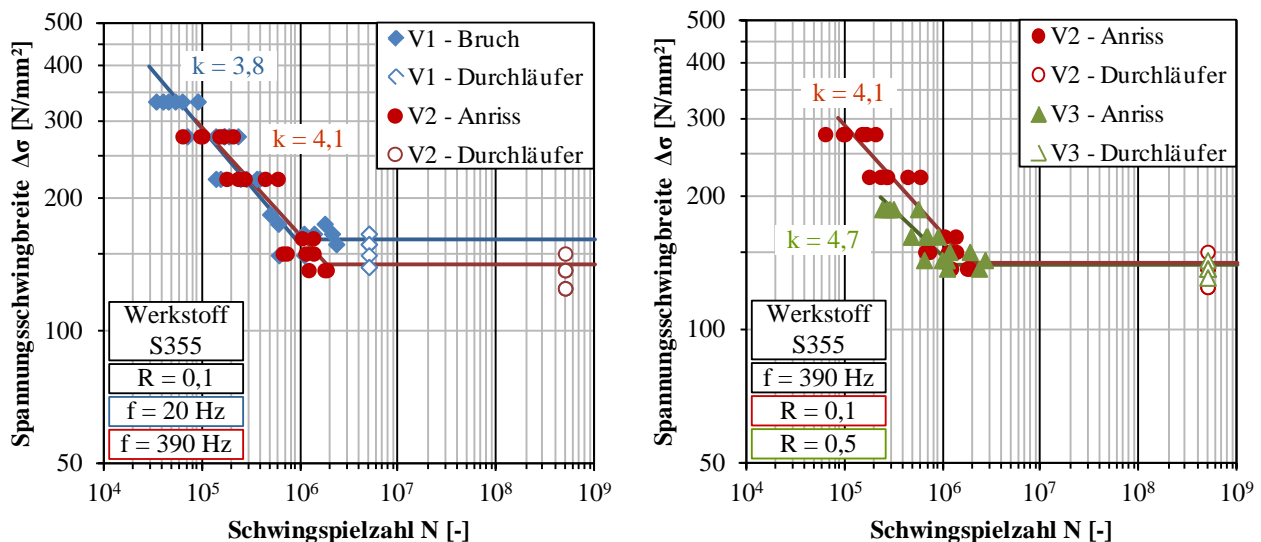


Abbildung 5: Einfluss von Prüffrequenz (links) und Mittelspannung (rechts) auf die Ermüdungsfestigkeit

Abschließend zeigen die Ergebnisse zudem, dass bei der untersuchten Schweißverbindung von einer Dauerfestigkeit auszugehen ist, da weder späte Brüche noch eine Änderung des Schädigungsmechanismus festgestellt wurden. Zudem zeigen Durchläufer in der erneuten Prüfung keine eindeutigen Hinweise auf eine Vorschädigung oder einen Trainingseffekt.

4 Grout-Verbindungen

4.1 Aktuelle Herausforderungen bei Grout-Verbindungen

Ständige und veränderliche Lasten aus Normalkraft, Biegung, Querkraft und Torsion sollen mittels Grout-Verbindung in die Gründungspfähle übertragen werden. Im Gegensatz zu Grout-Verbindungen in Monopile-Tragstrukturen, deren als dominant eingestufte Beanspruchung aus Biegemomenten besteht, werden Grouted Joints in Jackets und Tripods durch eine Interaktion einzelner Schnittgrößen beansprucht, wobei die axiale Wechselbeanspruchung maßgebend ist. Während Grout-Verbindungen bei Monopile-Tragstrukturen Spaltmaße von 150 mm aufweisen, sind bei aufgelösten Konstruktionen wesentlich größere Grout-Spaltmaße zum Ausgleichen der Schiefstellungen erforderlich. Bei derzeit ausgeführten Jackets, siehe Abbildung 1, werden Spaltmaße zwischen Jacketfuß und geramtem Pfahl von bis zu 600 mm mit hochfestem Mörtel gefüllt.

Experimentelle und numerische Untersuchungen an biegebeanspruchten Grout-Verbindungen in Monopiles wurden am Institut für Stahlbau unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann in den Forschungsprojekten ForWind Teilprojekt 5 [18] und GROW [19] durchgeführt: Daraus hervorgehende Ergebnisse sind den Dissertationen von Wilke [20] und Lochte-Holtgreven [21] zu entnehmen. Aufgrund der veränderten Anwendung von Grout-Verbindungen in aufgelösten Tragstrukturen ergaben sich neue Fragestellungen, die im Rahmen des Forschungsprojekts GROWup behandelt werden. So wird beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit der Einsatz hochfester Materialfestigkeiten und die Auswirkungen großer Grout-Spaldicken bislang nur unzureichend berücksichtigt. Aktuelle Weiterentwicklungen dieser Ingenieurmodelle berücksichtigen die Stahlrohrnachgiebigkeiten und sind in [22] dargelegt. Das Langzeitverhalten von großspaltigen wechselbeanspruchten Grout-Verbindungen ist bisher noch unzureichend untersucht worden. Aktuelle Bemessungsrichtlinien geben bislang keine spezifischen Nachweisverfahren vor. Bisher wird der Nachweis gegen Materialermüdung auf Basis von einaxialen Wöhlerlinien für Beton geführt. Dies wird jedoch dem realen Ermüdungsverhalten der Verbindung nicht gerecht. Deshalb wird in GROWup das Materialversagen unter Wechselbeanspruchung und Druckschwellbeanspruchung in kleinmaßstäblichen und großmaßstäblichen Versuchen untersucht. Neben dem Einfluss unterschiedlicher Spannungsverhältnisse ist bislang der Einfluss des Wassers ungeklärt. Bisherige experimentelle Untersuchungen wurden überwiegend unter trockenen Bedingungen durchgeführt. Es wird jedoch vermutet, dass die in Realität vorherrschenden nassen Randbedingungen einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben. Im Folgenden werden die experimentellen Untersuchungen und erste Ergebnisse an vorwiegend axialbeanspruchten dickspaltigen Grouted Joints in aufgelösten Tragstrukturen vorgestellt.

4.2 Kleinmaßstäbliche Versuche

4.2.1 Versuchskörpergeometrien

Bei der Entwicklung der kleinskaligen Versuchskörper stand die Untersuchung des Füllmaterials unter räumlicher Beanspruchung im Vordergrund [20]. Die Geometrie der Stahlrohre wurde so gewählt, dass die Verbindung im Füllmaterial versagt. Dazu mussten Stabilitätsprobleme und ein globales Überschreiten der Streckgrenze ausgeschlossen werden. Die daraus resultierenden geringen Schalenschlankheiten D/t liegen deutlich über denen realer Grout-Verbindungen, so dass nur bedingt von einer Maßstäblichkeit gesprochen werden kann. Dies spiegelt sich auch in der, in Abbildung 6 dargestellten, Unterschreitung der Anwendungsgrenzen üblicher Normen [2] und [5] für die Bemessung von OWEA-Tragstrukturen wieder. Die Beanspruchung des Füllmaterials weißt hingegen, durch die Ausbildung von Druckstreben und die räumliche Umschnürung durch das äußere Stahlrohr, hohe Ähnlichkeit zu realmaßstäblichen Verbindungen auf.

Es wurden zwei grundlegende Versuchskörpergeometrien (KV1 und KV2) in ForWind entwickelt, die im Rahmen von GROWup um eine dritte Geometrie (KV3) ergänzt wurden. Die Geometrien unterscheiden sich hauptsächlich in der Dicke des Groutspaltes t_g (klein: KV1 und KV2, groß: KV3) sowie der Ausbildung der Verbundfuge (ohne Schubrippen: KV1, mit Schubrippen: KV2 und KV3).

Versuchsergebnisse zu den Geometrien KV1 und KV2 unter Einsatz verschiedener Füllmaterialien und trockenen Randbedingungen finden sich unter anderem in [20], [21], [22], [24]. Untersuchungen zu KV3 sind in Vorbereitung. Im Folgenden wird insbesondere auf das Ermüdungsverhalten von KV2 unter anstehendem Wasser eingegangen.

4.2.2 Ermittlung der statische Axialtragfähigkeit

Die statische Axialtragfähigkeit der Verbindung unter Druckbeanspruchung F_{ULS} wird in einem weggesteuerten Versuch ermittelt. Das Verformungsverhalten der Verbindung und die Streuung der Versuchsergebnisse gibt Aufschluss über die Qualität des eingebrachten Füllmaterials. In den späteren Ermüdungsversuchen dient die maximale Tragfähigkeit F_{ULS} als Referenz zur Bestimmung der aufgetragenen Oberlast.

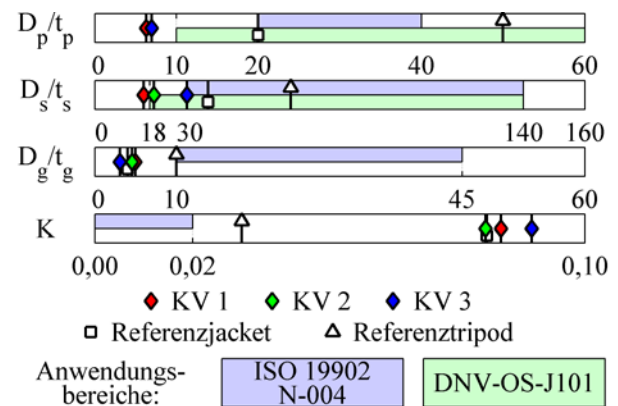


Abbildung 6: Einstufung der Versuchskörpergeometrien in die Anwendungsbereiche üblicher Normen

Abbildung 7 (rechts) zeigt die aus dem beschriebenen Versuchsablauf resultierenden Kraft-Verformungs-Diagramme für drei Versuchskörper (VK) der Geometrie KV 2 mit gleichem Füllmaterial. Es können drei Verformungsbereiche identifiziert werden. In Bereich 1 verhalten sich die Versuchskörper annähernd linear-elastisch. Bei $F_{\text{elas}} \sim 300 \text{ kN}$ ($\sim 55 \% F_{\text{ULS}}$) kommt es zur Ausbildung diskreter Druckstreben im Grout-Material und damit einhergehend zu einer Schädigung infolge von Querkzugspannungen. Die Tragfähigkeit wird im Bereich 2 weiter gesteigert, bis bei $F \sim 550 \text{ kN}$ das Grout-Material auf Druck versagt und die maximale Axialtragfähigkeit der Verbindung F_{ULS} überschritten wird. In Bereich 3 nimmt die Resttragfähigkeit der geschädigten Verbindung kontinuierlich ab.

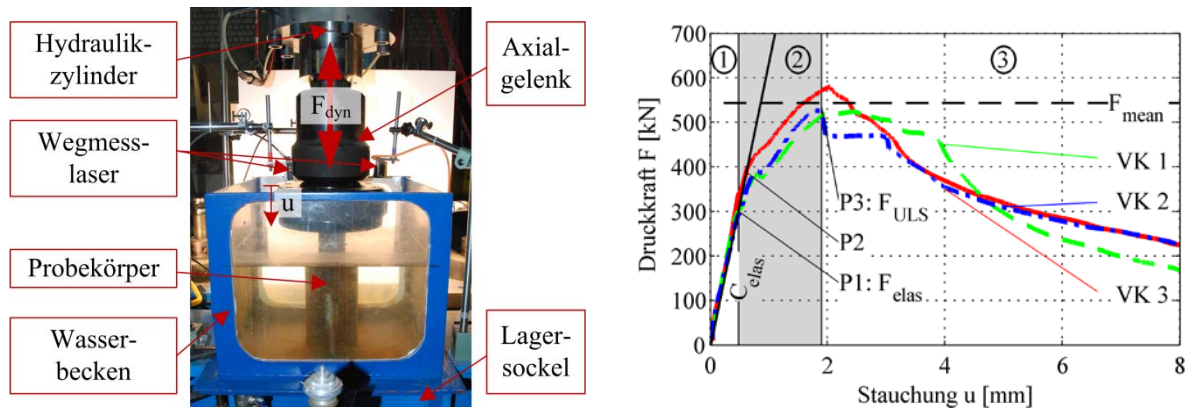


Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens (links) und Kraft-Verformungs-Diagramm zur statischen Axialtragfähigkeit von KV 2 (rechts)

4.2.3 Untersuchung des Ermüdungsverhaltens

Der in Abbildung 7 (links) gezeigte Versuchsaufbau ermöglicht die Beanspruchung der Probekörper unter zyklischer Druckschwelllast bei Variation der Oberlast F_0 , der Prüffrequenz f und der Umgebungsbedingung. Es wurden die folgenden Versuchsbedingungen untersucht:

- Umgebungsbedingung (UB): trocken / nass,
- Oberlast F_0/F_{ULS} : 50 %, 25 %, bei $R = 0,05$,
- Prüffrequenz f : 5,0 Hz, 1,0 Hz, 0,3 Hz.

In Abbildung 8 sind die daraus resultierenden Ergebnisse für einen Versuch je Versuchsbedingung dargestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Einfluss für die Umgebungsbedingungen trocken und nass (Abbildung 8, links). Während der unter trockenen Bedingungen geprüfte Versuchskörper mit nur geringem Steifigkeitsabfall die Versuchsgrenze von $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln erreicht, versagt der unter Wasser geprüfte Versuchskörper bereits bei $N \sim 6,4 \cdot 10^4$ Lastwechseln. Als Grund hierfür kann ein Eindringen des Wassers in die Kontaktfuge zwischen Stahl und Grout genannt werden. Zum einen wird so die Oberflächenreibung zwischen den Verbundmaterialien reduziert [25] und zum anderen wird infolge lokaler Spannungsspitzen geschädigtes Groutmaterial aus der Verbindung ausgespült.

Die Reduktion der Oberlast F_0 bei Versuchen unter Wasser zeigen Zusammenhänge wie sie auch unter trockenen Umgebungsbedingungen und für reine Füllmaterialproben zu erwarten sind. Während bei $F_0 \sim 50 \% F_{\text{ULS}}$ die Verbindung nach $N \sim 1 \cdot 10^5$ Lastwechseln versagt, führt eine Halbierung der Oberlast auf $F_0 \sim 25 \% F_{\text{ULS}}$ zu einer Steigerung der ertragbaren Lastwechsel auf $N \sim 2 \cdot 10^5$. Hervorzuheben ist, dass eine Oberlast von $F_0 \sim 50 \% F_{\text{ULS}}$ unterhalb der in Abbildung 7 (rechts) gezeigten elastischen Grenze bei $F_{\text{elas}} \sim 70 \% F_{\text{ULS}}$ liegt. Lokale Spannungsspitzen im Bereich der Schubrippen führen auch hier zu Schädigungen im Grout-Material.

Auch die Reduktion der Prüffrequenz f führt zu einer Steigerung der ertragbaren Lastwechsel N . Versagt die Verbindung bei einer Prüffrequenz von $f = 5 \text{ Hz}$ bei $N \sim 6,4 \cdot 10^4$ Lastwechseln, so erreicht sie bei $f = 1 \text{ Hz}$ Lastwechsel von $N \sim 1,2 \cdot 10^5$ und bei $f = 0,3 \text{ Hz}$ Lastwechsel von $N \sim 1,6 \cdot 10^4$. Als Grund hierfür kann die mit sinkender Prüffrequenz f abnehmende Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in der Kontaktfuge genannt werden. Dies führt zu einer Verlangsamung des Ausspülens von gelöstem Grout-Material.

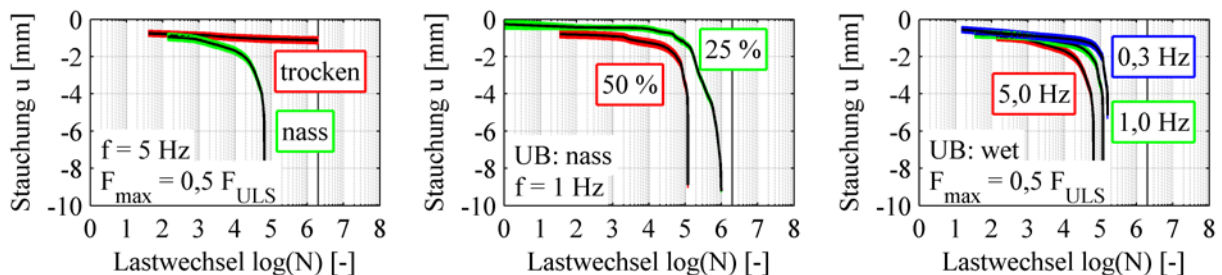


Abbildung 8: Lastwechselabhängige Versuchskörperstauchung für KV 2 bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (links), unterschiedlichen Lastniveaus (mitte) und unterschiedlichen Prüffrequenzen (rechts)

4.3 Großmaßstäbliche Versuche

In großmaßstäblichen Grouted Joint Versuchen wird das Ermüdungsverhalten unter reiner Wechsel- und Druckschwellbeanspruchung untersucht. In Anlehnung an die realen Referenzstrukturen eines Jackets und eines Tripods wurden zwei Versuchskörpergeometrien im Maßstab $\sim 1:2$ und $\sim 1:4$ entwickelt, siehe Tabelle 1. Die beiden Versuchskörpergeometrien 1 und 2 unterscheiden sich maßgeblich in der Größe des Grout-Spalts und liegen außerhalb der üblichen Gültigkeitsgrenzen in Norsok N-004 [4] und ISO 19902 [5].

Tabelle 1: Geometrie der Großversuchskörper 1 und 2 und Grout-Materialdruckfestigkeiten I und II

Versuchskörpergeometrie	Pile D/t [mm]	Grout D/t [mm]	Sleeve D/t [mm]	L_g [mm]	f_{cu} Material I/II [MPa]	Anzahl Schubrippen [-]	Schubrippen h/s [mm]
1	610/25	773/82	813/20	1.240	140/90	5	6/100
2	406/25	773/184	813/20	1.240	140/90	5	6/100

Die in Norsok N-004 [4] und ISO 19902 [5] angegebenen Gültigkeitsbereiche für die Anwendung der Bemessungsansätze begrenzen die einaxiale Mörteldruckfestigkeiten auf Festigkeiten kleiner 80 MPa. Dieser Wert entspricht den in der Offshore-Öl- und Gasindustrie eingesetzten Zementleimen, liegt jedoch weit unter den Druckfestigkeiten derzeit eingesetzter hochfester Vergussmörtel. Daher werden in den großmaßstäblichen Versuchen zwei übliche hochfeste Grout-Materialien der Festigkeitsklasse 140 MPa (Material I) und 90 MPa (Material II) getestet. Zudem werden in weiteren Großversuchen die Anordnung der Schubrippen sowie der Einfluss von Wasser untersucht.

Tabelle 2: Laststufen für die großmaßstäblichen Versuche im Haupt- und Nachlaufprogramm

Laststufe	Hauptversuchsprogramm						Nachlaufprogramm	
	1	2	3	4	5	6	7	8
F_o/F_u [kN]	+1.000/ -1.000	+2.000/ -2000	+3.000/ -3.000	0/ -4.000	0/ -5.000	0/ -6.000	0/ -8.000	+3.000/ -3.000
ΔF [kN]	2.000	4.000	6.000	4.000	5.000	6.000	8.000	6.000
$R=F_u/F_o$	R=-1	R=-1	R=-1	R= ∞	R= ∞	R= ∞	R= ∞	R=-1
Lastwechsel [-]	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	~ 15.000	~ 15.000

Die ersten vier Versuche zielen darauf ab, den Einfluss unterschiedlicher Grout-Spaltmaße sowie unterschiedlicher Materialdruckfestigkeiten auf das Ermüdungsverhalten zu untersuchen. Dazu wurde ein Versuchsprogramm entwickelt, das eine stufenweise Belastung vorsieht. Das Hauptversuchsprogramm besteht aus insgesamt sechs Laststufen mit jeweils 100.000 Lastwechsel pro Laststufe, siehe Tabelle 2, wobei in den ersten drei Laststufen eine sich steigernde reine Wechsellast ($R = -1$) mit einer maximalen Oberlast von $F_o = 3$ MN aufgebracht wird. Daran schließen sich drei weitere Laststufen im Druckschwellbereich mit variiertem Mittellast an. Während der Versuchsdurchführung werden die Stahldehnungen mittels Dehnungsmessstreifen und die lokalen und globalen Verformungen über Laserdistanzsensoren aufgezeichnet. Abbildung 9 rechts zeigt den in die Großprüfmaschine eingebauten und mit Messtechnik versehenen Versuchskörper.

Bei der Versuchsdurchführung des Versuchskörpers 1 mit dem Füllmaterial I konnte nach dem Durchlauf des Hauptversuchsprogramms (Laststufen 1-6) kein eindeutiges Versagen der Struktur festgestellt werden. Daher wurde das Versuchsprogramm um ein Nachlaufprogramm bestehend aus zwei weiteren Laststufen zu jeweils ~ 15.000 Lastwechsel erweitert. Hierbei wurde eine maximal versuchstechnisch umsetzbare Druckschwellbeanspruchung mit einer Oberlast von $F_o = 8$ MN realisiert. Diese maximale Oberlast entspricht annähernd der rechnerischen Grenztragfähigkeit gemäß ISO 19902 [5]. In dieser Laststufe konnten globale Verschiebungen festgestellt werden, die ein Eintreten von lokalen Druckstrebenversagen mit Steifigkeitsabfall vermuten lassen. Um das anschließende Ermüdungsverhalten des bereits stark vorgeschädigten Versuchskörpers zu testen, wurde im Anschluss an die Druckschwellbeanspruchung die maximale Wechselbeanspruchung aus der Laststufe 3 wiederholt. Es konnte mit zunehmender Lastwechselanzahl eine durch die Zugbeanspruchung verursachte Verschiebung des inneren Rohres in Richtung des Lastzylinders beobachtet werden, siehe Abbildung 9, rechts. Um Aufschluss über die Art der Schädigung und die eingetretenen Versagensmechanismen zu erhalten wurde der Versuchskörper geöffnet, siehe Abbildung 9, links.

In Anlehnung an aus der Literatur [26], [27] und [28] bekannte durchgeführte Versuche wurden bereits unterschiedliche Versagensmodi definiert, die durch entsprechende Bemessungsansätze in den vorliegenden Richtlinien, wie bspw. ISO 19902 [5], Berücksichtigung finden. Es wird unterschieden zwischen einer Zerstörung der Mörtelmatrix, einem Druckstrebenversagen und dem Schubgleiten zwischen den Schubrippen oder an der Schubrippenoberkante, siehe Abbildung 9, mitte. Im Versuchskörper 1 ist der Steifigkeitsabfall und das Versagen der Struktur auf sich einstellende Druckstrebenbrüche zurückzuführen. Der Querschnitt durch den geöffneten geprüften Versuchskörper in Abbildung 9 links oben zeigt, dass sich einstellende Druckstreben kreuzen. An den Schubrippen bildeten sich an der druckbeanspruchten Seite ein Versagens-Grout-Keil aus, siehe Abbildung 9 links unten, der bereits von Krahl & Karsan [27] beschrieben wird. Dieser Grout-Keil weist über den Umfang unterschiedliche Abmessungen auf, kann jedoch im Mittel übereinstimmend mit den Ausführungen von Krahl & Karsan [27] mit einer Höhe äquivalent zur Schubrippenhöhe von

6 mm und einer vierfachen Länge von 24 mm festgestellt werden. Wie bereits erste numerische Voruntersuchungen indizierten, kann das Druckstrebenversagen an den äußersten Schubrippen auf deren maximale Beanspruchung zurückgeführt werden. Ein Vergleich mit dem Versuchskörper 2 wird zeigen, in wie fern sich dieses Versagensverhalten mit vergrößertem Grout-Spalt verändern wird.

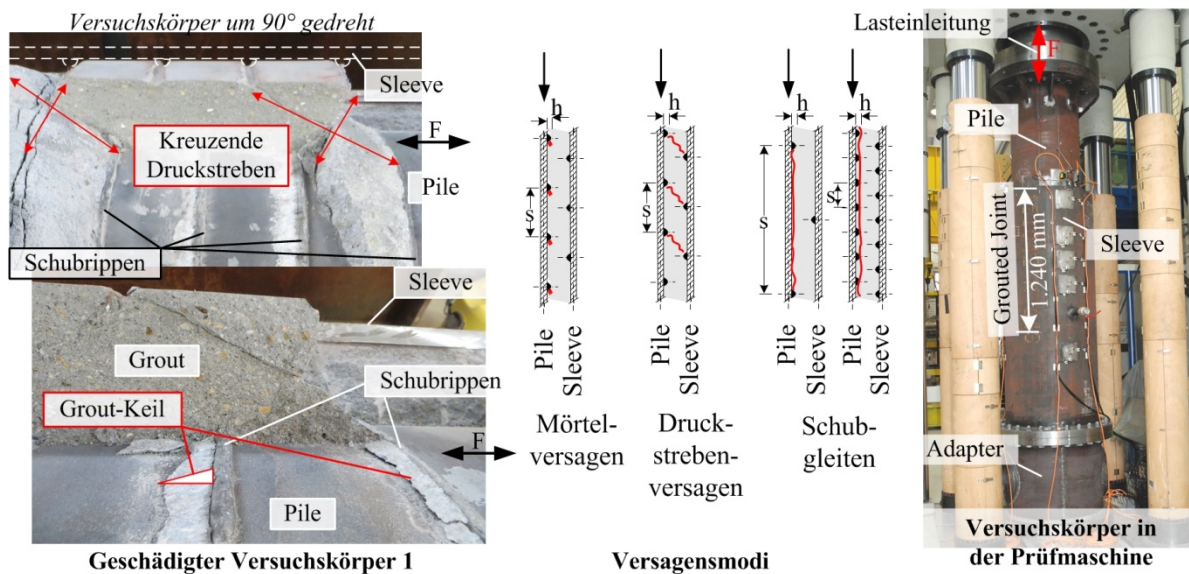


Abbildung 9: Großmaßstäblicher Versuchskörper in der Prüfmaschine (rechts), bekannte Versagensmodi (mitte) und Schadensbild des Versuchskörpers 1 (links)

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt Verbindungstechnologien bei OWEA im Hinblick auf abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben am Institut für Stahlbau. Insbesondere kürzlich durchgeführte Versuche an geschweißten Proben und klein- sowie großmaßstäblichen Grout-Verbindungen werden vorgestellt.

Ermüdungsversuche an geschweißten dicken Blechen zeigen, dass durch den Schweißprozess initiierte Defekte zwar keinen Einfluss auf die statische Zugfestigkeit haben, aber zu einer Reduktion der Ermüdungsfestigkeit und einer Verlagerung des Ermüdungsrisswachstums ins Innere der Probe führen.

Das Ermüdungsverhalten von axial beanspruchten Stumpfnahtverbindungen aus Stahl wurde bei konstanter Spannungsschwingbreite bei sehr hohen Lastwechselzahlen untersucht und gab Aufschluss über den Einfluss von Prüffrequenz und Mittelspannung auf das Ermüdungsverhalten. Es konnte festgestellt werden, dass kein Einfluss der Prüffrequenz besteht, jedoch erhöhte Mittelspannungen zu flacher geneigten Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich führen. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass bei den untersuchten Proben von einer Dauerfestigkeit ausgegangen werden kann.

In Druckschwellversuchen an kleinmaßstäblichen Grout-Verbindungen wird das Ermüdungsverhalten des Grout-Materials unter Einfluss von Wasser untersucht. Erste Ergebnisse dieser kleinmaßstäblichen Versuche weisen darauf hin, dass bei Variation von Oberlast und Prüffrequenz der Wassereinfluss im Gegensatz zu trockenen Umgebungsbedingungen zu einer Reduktion der Ermüdungsfestigkeit dieser Verbindung führt. Weitere Untersuchungen auch in Großversuchen folgen.

In Ermüdungsversuchen an großmaßstäblichen Grout-Verbindungen wird unter reiner Wechsellast- und Druckschwellbeanspruchung in einer Stufenbelastung der Einfluss großer Grout-Spalte auf das Ermüdungsverhalten untersucht. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine Schädigung im Bereich der untersten und obersten Schubrippe in Form von Druckstrebenversagen auftritt. Des Weiteren wurden beim Öffnen des Grout-Körpers geschädigte Grout-Keile an der lastabgewandten Seite der Schubrippen sichtbar. Erst weitere Untersuchungen an großmaßstäblichen Grout-Verbindungen mit variierter Materialfestigkeit und Grout-Spaldicke werden ein Einsortieren der ersten Versuchsergebnisse ermöglichen.

Die bisherigen experimentellen Untersuchungen an Verbindungstechnologien am Institut für Stahlbau haben neue Erkenntnisse geliefert, die bereits Eingang in bestehende Bemessungshinweise gefunden haben. Zugleich wurden neue Fragestellungen aufgeworfen, die Ausgangspunkt für weitere Forschung bilden.

6 Literatur

- [1] Dubois, J., Eichstädt, R., Gottschalk, M., Kelma, S.:
- [2] DNV-OS-J101: Offshore Standard: Design of Offshore Wind Turbine Structures, Det Norske Veritas, Høvik, Norway, Januar 2013.
- [3] GL-Offshore-Richtlinie: Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH, Hamburg, Deutschland, Juni 2005.
- [4] Norsok N-004: Design of Steel Structures - Annex K: Special design provisions for Jackets, Rev. Of Sect. K.5.3 Grouted connection, April 2012

- [5] ISO 19902: Erdöl- und Erdgasindustrie - Gegründete Stahlplattformen, Normenausschuss Erdöl- und Erdgasgewinnung im DIN, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, Juli 2008.
- [6] Schaumann, P., Collmann, M., Deißer, T.A., Priebe, S., Konya, R., Hassel, T. Bach, F.W.: Ökologische und ökonomische Hochleistungsfügetechniken für Stahlrohrtürme von Windenergieanlagen - OPTIWELD. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sachbericht, FKZ 0325063A-C.
- [7] Schulze, K.-R.: Ja, wieso denn Elektronenstrahlschweißen? – Teil 6: Komm raus, Strahl! - Nonvac-EBW: Elektronenstrahlschweißen an freier Atmosphäre. Schweißen und Schneiden 63 (2011), pp. 536-542, 2011.
- [8] Deißer, T. A., Priebe, S., Schaumann, P., Collmann, M., Hassel, T., Konya, R. Bach, F.-W.: Verfahrenstechnische Herausforderungen beim Fügen dicker Bleche mit dem Elektronenstrahl an Atmosphäre und einem Plasma-UP-Hybridverfahren. Schweißen im Schiff- und Ingenieurbau 2011, DVS-Berichte 277, S. 13-18, Hamburg, Deutschland, 2011.
- [9] Schuster, J.: Heißrisse in Schweißverbindungen – Entstehung, Nachweis und Vermeidung. DVS-Berichte, Band 233, 2004.
- [10] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland, Dezember 2010.
- [11] Sonsino, C. M.: „Dauerfestigkeit“ – Eine Fiktion. Konstruktion 4, S. 87-92, April, 2005.
- [12] Sonsino, C. M.; Maddox, S. J.; Haagenen, P.: A Short Study on the Form of the SN-Curves for Weld Details in the High-Cycle-Fatigue Re-gime. IIW-Doc. No. XIII-2045-05, 2005.
- [13] Steppeler, S.: Zum Ermüdungsverhalten von Stumpfnahverbindungen bei sehr hohen Lastwechselzahlen, Dissertation, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, Hannover, (in Vorbereitung).
- [14] Deutsches Patent 10204258.6: Prüfvorrichtung zur Dauerschwingprüfung von Prüflingen. Alt, A., 2005.
- [15] Schaumann, P.; Keindorf, C.; Alt, A.: Hochfrequente Ermüdungstests an Schweißverbindungen mit einem neu entwickelten Magnetresonanzprüfrahmen. Große Schweißtechnische Tagung 2008 Dresden, 17. bis 19. September, Dresden, Deutschland, 2008.
- [16] Schaumann, P.; Steppeler, S.: Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen von Tragstrukturen für Windenergieanlagen bei sehr hohen Lastwechselzahlen. Sondertagung Schweißen im Schiffbau und Ingenieurbau, Hamburg, 27. September 2011, DVS Berichte, Heft 277, S. 53-58, 2011.
- [17] Schaumann, P.; Steppeler, S.: Fatigue tests of axially loaded butt welds up to very high cycles. Fatigue Design 2013, 27-28, Senlis, 2013.
- [18] Schaumann, P., Wilke, F.: Fatigue Assessment of Support Structures of Offshore Wind Energy Conversion Systems. In: Heinemann, D., Schaumann, P. (Hg.): Annual Report 2003/2004. Oldenburg, S. 38–41.
- [19] Schaumann, P., Lochte-Holtgreven, S.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Grout-Strukturen für Offshore-Windenergieanlagen. Schlussbericht GROW. Hannover, Deutschland, 2010.
- [20] Wilke, F.: Load bearing behaviour of grouted joints subjected to predominant bending, Dissertation, Vol.31, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8440-2481-4, 2014.
- [21] Lochte-Holtgreven, S.: Zum Trag- und Ermüdungsverhalten beigebeanspruchter Grouted Joints in Offshore-Windenergieanlagen, Dissertation, Vol. 29, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8440-1987-2, 2013.
- [22] Schaumann, P., Bechtel, A., Lochte-Holtgreven, S.: Nachweisverfahren zur Tragfähigkeit überwiegend axial beanspruchter Grouted Joints in Offshore-Tragstrukturen. Stahlbau, Vol. 81, No. 9, S. 679-688, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Deutschland, 2012.
- [23] Anders, S.: Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints. Dissertation. Heft 6, Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, ISBN 978-3-936634-051, 2007.
- [24] Schaumann, P., Keindorf, C., Lochte-Holtgreven, S.: Statische und dynamische Axialdruckversuche an vergROUTETEN Rohr-in-Rohr-Verbindungen mit verschiedenen Füllmaterialien. Bautechnik 86 (2009), S. 719–728, 2009.
- [25] Schaumann, P., Raba, A., Bechtel, A.: Impact of Contact Interface Conditions on the Axial Load Bearing Capacity of Grouted Connections: Proceedings of EWEA 2013. Wien, Österreich, 2013.
- [26] Forsyth, P., Tebbett, I. E.: New Test data on the Strength of Grouted Connections With Closely Spaced Weld Beads. in: Proceedings of the 20th Annual Offshore Technology Conference OTC, OTC paper 5833, May 2 - 5, Houston, Texas, USA, 1988.
- [27] Krahl, N. W., Karsan, D. I.: Axial Strength of Grouted Pile-to-Sleeve Connections, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 4, S.889 - 905, April 1985.
- [28] Hordyk, M. (1996): The Static and Fatigue Strength of Grouted Pile-sleeve Connections, Fatigue in Offshore Structures, Vol. 2, pp. 635-657. Oxford & IBH Publishers, 1996.