

Untersuchungen zur Anwendung des Drahtspannstrahlens als Oberflächenvorbereitung für den Korrosionsschutz im Unterwasserbereich.

Henning Hansen (Stadt Oldenburg, Fachdienst Tiefbau) (Vortragender),
Volker Jannaschk (MONTI - Werkzeuge GmbH),
Zoran Kovarcek (MONTI - Werkzeuge GmbH),
Alexander Montabaur (MONTI - Werkzeuge GmbH),
Thomas Hassel (Leibniz Universität Hannover)

Extreme klimatische Bedingungen sowie der hohe Salzgehalt des Meerwassers führen beim Betrieb technischer Anlagen zwangsläufig zu Korrosionserscheinungen, welche sich zur ernsthaften Schwächung der Strukturen entwickeln können. Dabei sind sowohl die Strukturbereiche oberhalb als auch unterhalb der Wasserlinie betroffen, wobei gerade der Wasserwechselbereich durch den Zutritt von Luftsauerstoff besonders korrosionsanfällig ist [1].

Aufwändige und kostenintensive Planungen und Überlegungen zum Life-Cycle-Management solcher Anlagen führen zur Erhöhung der Sicherheit und zur Sicherstellung des langfristigen Betriebs, wobei die Schadensaufnahme durch visuelle Inspektionen in festgelegten Intervallen erfolgt. Nach der Detektion z.B. von stark korrodierten Bereichen muss die Reparatur durch die Erneuerung des Korrosionsschutzes erfolgen [2]. Dabei sind bei ortunveränderlichen Anlagen auch Unterwasserarbeiten erforderlich. Reparaturen nach der Detektion solcher Schäden erfolgen daher bisher nahezu immer manuell, sowohl über als auch unter Wasser. Die Arbeiten unter Wasser werden dabei von Tauchern ausgeführt, welche hinsichtlich der, durch die Gezeiten bedingten Strömungen, wie z.B. in der Nordsee, nur ein sehr eingeschränktes Zeitfenster zur Durchführung derartiger Arbeiten haben. Die Beseitigung von Korrosionsschäden erfolgt dabei klassisch durch das Säubern und Entrosten der betroffenen Bereiche, welche anschließend wieder versiegelt werden. Dabei kommen im wesentlichen Strahlverfahren zum Einsatz, wobei das Strahlgut (Sand, Glasperlen oder Stahlgries) aus umwelttechnischen Gründen möglichst nicht am Boden der Gründungsstruktur abgelagert werden soll.

Der wesentliche Schritt einer derartigen Reparaturmaßnahme ist der Vorgang der Reparaturstellenvorbereitung, um eine optimale Haftung des aufzubringenden Korrosionsschutzes zu ermöglichen. Hierbei werden bestimmte Randbedingungen bezogen auf die Stahloberfläche nach Norm DIN EN ISO 8501 gefordert [3], welche dann im Geltungsbereich des Korrosionsschutzes nach DIN EN ISO 12944-4 im Hinblick auf die Oberflächenvorbereitung spezifiziert wird [4]. Trotz des vereinheitlichten Standards der DNV GL die Richtlinie DNVGLST-0126 „Design of Wind Turbine Support Structures“ als vereinheitlichten Standard sind Schäden wohl nie zu vermeiden und müssen durch eine sinnvolle Reparaturtechnik behoben werden [5].

Die eigentliche Reparatur der korrodierten Bereiche erfolgt durch die Freilegung der Metallstruktur, wobei Bewuchs, Rost und Farbe entfernt werden müssen. Anschließend wird dann, ebenfalls durch den Taucher ein neuer Zweikomponenten-Anstrich aufgebracht, welcher den zukünftigen Korrosionsschutz an dieser Stelle sicherstellen muss. Um die Haftung des Unterwasseranstrichs optimal zu gewährleisten muss die Prozesstechnik zur Vorbereitung der Reparaturstelle eine möglichst definierte und homogene Rauheit auf der Metalloberfläche erzeugen.

Das Drahtspannstrahlen, welches oberhalb der Wasserlinie schon gute Erfolge gebracht hat, wird in diesem Bericht hinsichtlich der Anwendbarkeit unter Wasser untersucht, um das Eignungspotential zu ergründen und die notwendigen Schritte zur Entwicklung unter Wasser tauglicher Systeme abzuleiten.

1 Die Drahtspannstrahltechnik und deren Anwendungsgebiete

Der Einsatz konventioneller Strahlmethoden ist offshore in vielen Fällen aufgrund von Sicherheits- oder Umweltschutzbestimmungen untersagt. Eine Lösung bietet die Drahtspannstrahltechnik (Bristle Blaster®) mit seiner ATEX-Zulassung für Zone 1 (EX II 2G c IIA T4 X). Hohe Flexibilität und kurze Rüstzeiten machen diese patentierte Technologie zur idealen Oberflächenvorbereitung für Offshore-Konstruktionen, wie Bohrinseln, FPSO oder Offshore-Windenergieanlagen. Ebenso sind Stahlwasserbauten in besonderem Maße widrigen Umwelteinflüssen ausgesetzt und anfällig für Beschädigungen und Korrosion. Der Bristle Blaster® bietet hier eine effektive und wirtschaftliche Methode zur Oberflächenvorbereitung. Er verbindet die Flexibilität und die kurzen Rüstzeiten eines handgehaltenen Werkzeugs mit den Ergebnissen eines Strahlvorgangs. Es entstehen keine umweltbelastenden Nebenprodukte, wie kontaminierte Strahlmittel, die eine aufwändige Einhausung der Arbeitsumgebung und Entsorgung notwendig machen. Daher eignet er sich hervorragend für Fehlstellenreparaturen und Wartungsarbeiten an Stahlwasserbauten, wie z.B. Schleusentoren, Wehren und Spundwänden und ist perspektivisch ebenfalls für die Anwendung unter Wasser hervorragend geeignet.

Das handgeführte, pneumatisch oder elektrisch betriebene Gerät erzielt einen Reinheitsgrad vergleichbar mit Sa 2½ und ein raues Oberflächenprofil, das für eine bessere Haftung der Beschichtung sorgt. Reparatur- und Ausbesserungsarbeiten, insbesondere kleinerer Flächen, können daher wirtschaftlicher ausgeführt werden. Dazu zählen auch Schweißnähte, vor allem in Bereichen, in denen nicht gestrahlt werden kann oder darf. Roststellen und Beschädigungen an Beschichtungen lassen sich beispielsweise schnell und ohne größeren Aufwand ausbessern. Die dazu notwendige technische Ausrüstung besteht lediglich im Gerät selbst und einer entsprechenden Luftdruck- bzw. Stromversorgung.

Die Wirkungsweise basiert auf einem mit speziellen Drähten bestückten Polyamid-Band. Dies rotiert auf dem Werkzeugkopf des Antriebsaggregates. Die Borsten werden dabei über einen Beschleunigungsstab geführt, wodurch sich die Aufschlagkraft der Borstenspitzen vervierfacht (siehe Abbildung 1). Beim Aufschlagen der Borstenspitzen werden Beläge und vorhandene Oberflächenbeschichtungen entfernt und gleichzeitig ein winziger Krater auf der Oberfläche und damit eine Rautiefe erzeugt. Beim Arbeiten auf der Oberfläche wird das Trägermaterial, d. h. die Stahloberfläche selbst, geschont. Die Drahtspitzen treffen nahezu vertikal auf die Oberfläche und „schlagen“ dabei den Rost oder die Beschichtung ab. Vom Stahl selbst wird dabei kaum Material abgetragen. Da keine wie bei Schleifwerkzeugen erzeugte Reibungswärme entsteht, erhitzt sich auch die Oberfläche nicht. Dadurch, dass die Borstenspitzen einzeln und punktuell auf die Oberfläche aufschlagen, kommt es – anders als beim Schleifen – nicht zu einem Verreiben von Rostpartikeln oder Verschmieren von Beschichtungen auf der Oberfläche.

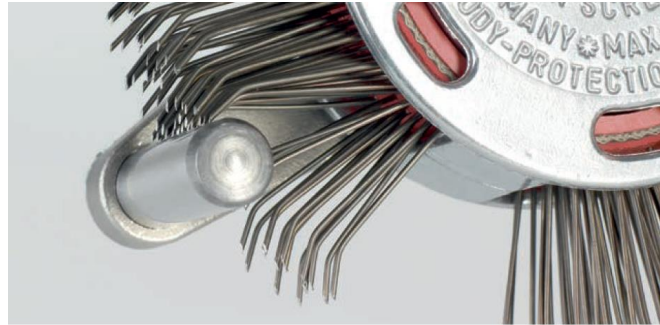


Abbildung 1: Darstellung des Beschleunigungsvorgangs beim Drahtspannstrahlen durch das Überstreichen des Beschleunigungsstabes der abgewinkelten Drähte und dem anschließenden beschleunigten Auftreffen auf der Materialoberfläche. (Quelle Monti GmbH)

Die Anwendungsgebiete liegen im Wesentlichen im Bereich der Korrosionsschutzvorbereitung und reichen vom Stahlbau bis zur Anwendung im Schienenfahrzeugbau (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Übersicht der verschiedenen Anwendungsfelder der Drahtspannstrahltechnik (Quelle: Monti GmbH)

Die manuell ausführbare Technik ist für die Unterwasseranwendung durch den Taucher sehr gut geeignet und kann mit einer entsprechenden Schulung sehr schnell in das Portfolio der unter Wasser verfügbaren Prozesstechniken übernommen werden. Als Antriebe sind für diesen Anwendungsbereich die hydraulischen oder pneumatischen Antriebe von großem Vorteil, da damit keinerlei elektrische Gefährdung für den Taucher besteht.

2 Werkstoffe, Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführung

Die im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Materialien waren ein unlegierter Baustahl der Güte S235, ein Feinkornbaustahl der Güte S355NL und ein Stahl der Güte API 5L X70. Es wurden Untersuchungen zur Entwicklung der Rauigkeit und des Materialabtrages durchgeführt, wobei der Prozess jeweils mechanisiert und manuell durchgeführt worden ist. Die mechanisierten Untersuchungen erfolgten nach dem in Abbildung 3 dargestellten Schema mit den in Tabelle 1 verwendeten Parametern.

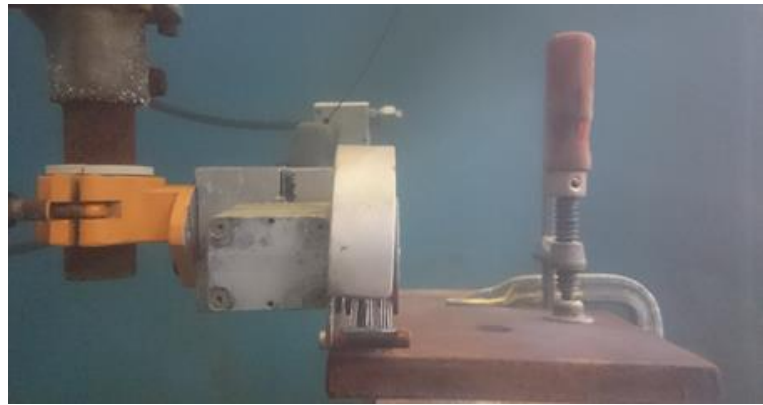
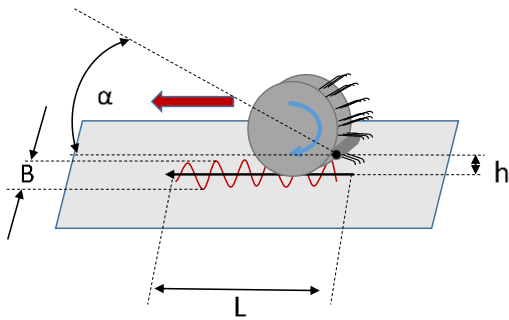


Abbildung 3: Darstellung der mechanisiert durchgeführten Versuche (links: schematische Versuchsdurchführung; rechts: Versuchsaufbau)

Der Vorschub erfolgt in Richtung des roten Pfeiles, während die Drehrichtung der Bürste entgegen der Vorschubrichtung erfolgt. Die bearbeitete Fläche ergibt sich aus dem Produkt der Breite B und der Länge L . Die Breite B ist hierbei die Summe aus der Bürstenbreite und der doppelten Pendelamplitude des Führungssystems.

Tabelle 1: Versuchsparameter der mechanisiert unter Wasser durchgeführten Versuche

Parameter	Wert
Umdrehungsgeschwindigkeit	2300 U / min
Vorschubgeschwindigkeit v	0,75 cm/s
Pendelamplitude	0,575 cm
Winkel α	9,3 °

Die Rauheit der Proben wurde mit einem taktilen Rauheitsmessgerät vom Typ „Mitutoyo Surf-test SJ-301“ vermessen. Die Messung erfolgte nach DIN EN ISO 4288. Die große Rauheit der untersuchten Proben erfordert je Probe eine Messstrecke von $l = 40$ mm, welche bei den Proben durch jeweils $n = 5$ Einzel-Messstrecken ersetzt wurde. Als Ergebnis werden die arithmetischen Mittenrauwerte R_a sowie die mittleren Rautiefen R_z dargestellt.

Um die Eignung der Oberflächenkonditionierung mittels Drahtspannstrahlens mit dem Bristel Blasters® zum nachfolgenden Auftrag von Korrosionsschutz-Beschichtungen nachzuweisen, wurde die Haftzugfestigkeit einer solchen Beschichtung auf mehreren mit dem Bristel Blaster® vorbereiteten Proben in Anlehnung an DIN EN 582 untersucht. Zur Durchführung der Haftzugversuche wurden Proben aus korrodiertem S355 wie folgt vorbereitet:

- Entschichten / Konditionieren der Oberfläche mit den Bristel Blaster® unter Wasserabdeckung (automatisiert sowie manuell)
- Auftrag des UW-Lacksystems unter Wasserabdeckung
- Präparation der Zugproben
 - Proben-Präparation mittels Wasserstrahlschneidens
 - Aufkleben der Zugstempel auf der Beschichtung
 - Freipräparieren der Zugstempel

Auf die Proben wurde im direkten Anschluss an die Oberflächenbearbeitung das 2-Komponenten Lacksystem LECO-UWB-S5 der Firma Lestin aufgetragen. Hierbei handelt es sich um ein Korrosionsschutz-Beschichtungssystem für den Einsatz auf feuchten Untergrund und unter Wasser, welches sich aus einer 2-Komponentigen Grundierung sowie einem ebenfalls aus zwei Komponenten bestehenden Decklack zusammensetzt.

Die Komponenten der Grundierung wurden nach Herstellervorgabe gemischt und die Grundierung mit einem kurzborstigen Spezialpinsel, einem sogenannten Modler, auf die bearbeitete Probe in kleinen, kreisenden Bewegungen appliziert, um das Wasser von der Probenoberfläche zu verdrängen. Im Anschluss an diesen ersten Grundierungsauftrag wurde eine zweite Schicht nass in nass mit einer kurzflorigen Farbrolle appliziert, um die erforderliche Schichtstärke zu erreichen.

Zur Durchführung der Haftzugversuche wurden an den zu untersuchenden Stellen Proben aus den Werkstücken entnommen. Der Zuschnitt der Haftzugproben mit einem Durchmesser von 30 mm erfolgte mittels Wasserabrasivstrahlschneidens. Die Oberfläche der Beschichtung auf den Haftzugproben wurde im Anschluss durch Anschleifen und Entfetten gereinigt und Prüfstempel aus Stahl mit einem Durchmesser von 20 mm mit dem 2-Komponenten Epoxid Klebstoff Araldite 2011 (entspricht Araldite AW106) aufgeklebt. Die Verklebung wurde bis zur vollständigen Durchhärtung mittels einer Klemmkonstruktion verpresst, um eine dünne, homogene Verklebung zu erreichen. Nach einer Aushärtezeit von 7 Tagen wurden die Zugstempel freipräpariert. Hierzu wurde der an den Stempeln ausgetretene Klebstoff entfernt und die Beschichtung entlang der Außenkontur des Zugstempels abgetragen, so dass die Kräfte der Haftzugprüfmaschine ausschließlich in Bereich des Stempels auf die Beschichtung einwirken.

Die Versuche zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit der Beschichtung auf den mit dem Drahtspannstrahlen bearbeiteten Proben wurden in Anlehnung an die DIN EN 582 auf einer Universalprüfmaschine Z250 der Firma Zwick/Roell durchgeführt. Die Proben wurden zur Prüfung mit Hilfe des hydraulischen Probenhalters auf der Maschine eingespannt. Durch einen in allen Richtungen frei beweglichen Probenhalter wird hierbei die Querkraftfreiheit der Ein-

spannung gewährleistet. Zur Erfassung der Änderungen von Kraft und Weg kamen ein Traversenwegaufnehmer (WN:143331) sowie ein 250 kN Kraftsensor (ID:0 WN:143332) zum Einsatz. Die Steuerung, Überwachung und Auswertung der Zugversuche erfolgte durch den angeschlossenen Rechner. Nach dem Vorspannen auf eine Kraft von 50 N wurden die Proben auf Zug belastet und die Messwerte für Kraft und Weg bis zum Versagen der Probe aufgezeichnet. Diese Prüfung erfolgt mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 1 N·mm⁻²·s⁻¹ (entspricht beim gewählten Prüfstempeldurchmesser von 20 mm 314 N·s⁻¹).

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen zeigen, dass sich in Abhängigkeit der Verfahrenswahl zwischen mechanisiert und manuell durchgeführten Versuchen ein gänzlich unterschiedliches Erscheinungsbild der Oberfläche zeigt. Während die mechanisiert bearbeiteten Oberflächen durch die fixierte Pendelbreite eine definierte Bearbeitungsflächengröße zeigt, ist dies bei der manuellen Durchführung durch die mangelnden Sichtverhältnisse nur sehr schwer und nur nach einer guten Schulung zu erreichen. Die mechanisiert bearbeiteten Flächen zeigen durch die konstanten Pendel- und Vorschubbewegungen der Maschine eine regelmäßige Textur auf der Oberfläche. Bei den manuell bearbeiteten Flächen erscheint die Oberfläche sehr gleichmäßig aufgeraut.

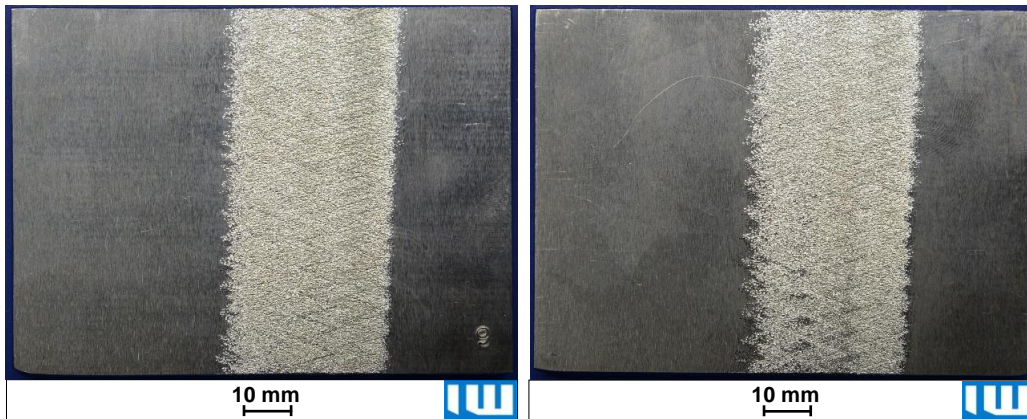


Abbildung 4: Oberflächenausbildung nach mechanisiert durchgeführten Versuchen mittels Drahtspannstrahlen unter Wasser

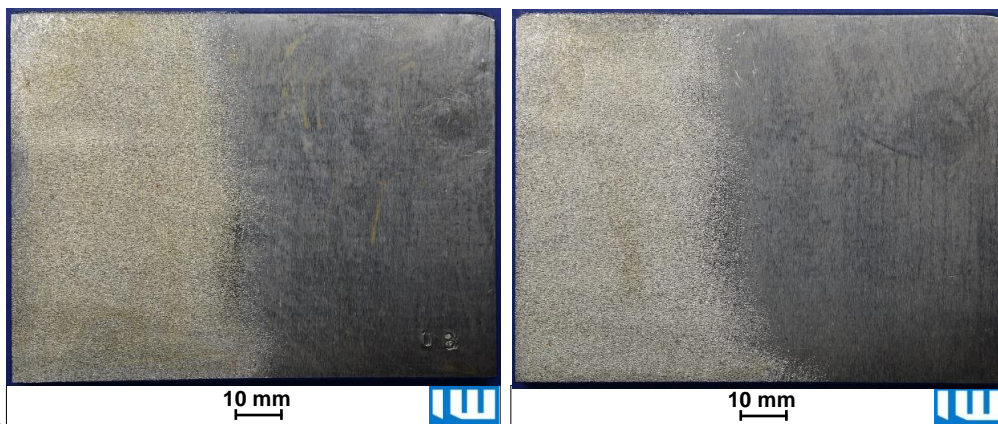


Abbildung 5: Oberflächenausbildung nach manuell durchgeführten Versuchen mittels Drahtspannstrahlen unter Wasser

Die gemessenen Rautiefen ergeben für diese Messungen bei den mechanisierten Versuchen einen gemittelten Mittenrauwert R_a von $9,66 \pm 0,95 \mu\text{m}$ und eine gemittelte Rautiefe R_z von $75,1 \pm 6,9 \mu\text{m}$. Die manuelle Bearbeitung der Oberflächen ergibt einen gemittelten Mittenrauwert R_a von $9,01 \pm 0,92 \mu\text{m}$ und eine gemittelte Rautiefe R_z von $73,6 \pm 5,9 \mu\text{m}$.

Der bei der Bearbeitung erfolgte Massenabtrag ist in Tabelle 1 dargestellt, woraus ersichtlich wird, dass die manuelle Bearbeitung tendenziell einen höheren Massenabtrag im Vergleich zur mechanischen Bearbeitung mit sich bringt. Mit der Steigerung der Festigkeit (bzw. Härte) des bearbeiteten Werkstoffs reduziert sich der Massenabtrag erwartungsgemäß.

Tabelle 2: Gravimetrisch ermittelter Massenabtrag für die untersuchten Materialien

Werkstoff	Massenabtrag in mg/mm ²	
	Mechanisierte Bearbeitung	Manuelle Bearbeitung
S235	0,057	0,098
S355NL	---*	0,050
API 5L X70	---*	0,036

*... Messwerte wegen zu geringer Probenzahl nicht vorhanden

Das Aufbringen des Schutzschichtsystems mittels Pinsel durch eine rotierende Bewegung erfordert ein hohes Maß an Konzentration und Schulung, da durch die rotierende Bewegung einerseits das Wasser von der Oberfläche verdrängt und andererseits der Lack in einer bestimmten Schichtdicke aufgetragen werden muss. In Abbildung 6 ist eine beschichtete Probe dargestellt in den verschiedenen Phasen der Probenpräparation für die Haftzugprüfung.

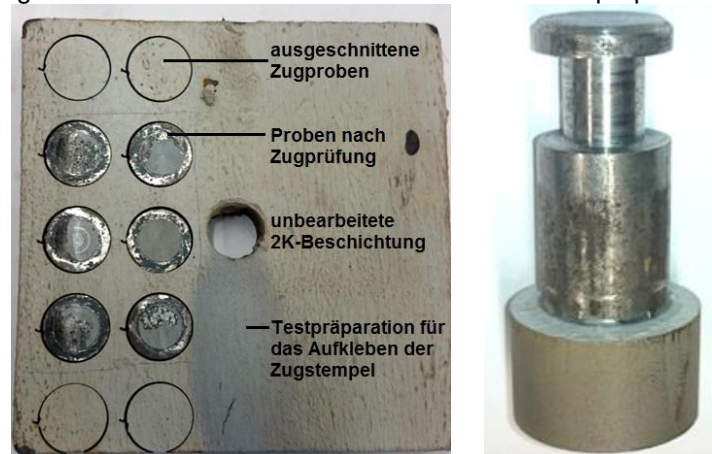


Abbildung 6: Darstellung des Fertigungsverlaufes zur Präparation der Haftzugproben (links); Haftzugprobe mit aufgeklebtem Stempel (rechts)

Im Bereich der Darstellung der geprüften Proben wird ersichtlich, dass nicht bei allen Proben eine vollständige Benetzung durch den Lack erreicht worden ist und somit Wasser auf der Oberfläche zurückgeblieben ist. Dies wiederum führt zur Korrosion und Schwächung der Verbindung da die tragende Fläche für die Übertragung der Zugkraft verringert wird.

Für die Beschichtung Lestin Leco-UWB-S5 wird bei feuchter Applikation auf Stahl eine Haftzugfestigkeit von mindestens 4,5 MPa angegeben. Dieser Wert wird als Vergleich für die durchgeführten Haftzugproben herangezogen.

Tabelle 3 Darstellung der Haftzugfestigkeitswerte für manuell entschichtete Proben

Probe	Prüfkraft [kN]	Festigkeit [MPa]	Prüfweg [mm]	Versagensart	
				Art	opt. Besonderheiten
531	2,43	7,7	0,28	Beschichtung	
532	2,84	9,0	0,29	Beschichtung	
533	2,26	7,2	0,26	Beschichtung	
534	1,69	5,4	0,2	Beschichtung	asymmetrisch
535	1,67	5,3	0,2	Beschichtung	stark korrodiert
541	1,37	4,4	0,17	Beschichtung	stark asymmetrisch
542	2,75	8,8	0,3	Mischbruch	
543	3,63	11,6	0,39	Mischbruch	
544	3,39	10,8	0,41	Mischbruch	
545	0,96	3,1	0,11	Mischbruch	stark asymmetrisch

Bei der Untersuchung der Proben wird nachfolgend zwischen den manuell sowie den maschinell entschichteten Proben unterschieden, da die manuell bearbeiteten Proben im Mittel höhere Haftzugfestigkeiten erreicht haben und sich die Versagensbilder der beiden Versuchsreihen subjektiv stark unterscheiden.

Für die manuell entschichteten Proben sind in Tabelle 3 die ermittelten Haftzugfestigkeiten dargestellt. Im Mittel ergibt sich damit eine gemittelte Haftzugfestigkeit von $7,33 \pm 2,78$ MPa. Im Gegensatz dazu beträgt die gemittelte Haftzugfestigkeit der mechanisch prozessierten Proben lediglich $4,23 \pm 1,84$ MPa, wobei hier die Ursache im Versagen des mit hoher Wahrscheinlichkeit nur mit ungenügender Qualität aufgetragenen Lacksystems begründet liegt.

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass das Drahtspannstrahlen grundsätzlich geeignet ist, um Oberflächen unter Wasser für die Applikation von schwerem Korrosionsschutz vorzubereiten. In der statistischen Auswertung zeigt sich, wie aus der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, dass die Haftzugversuche an den manuell vorbereiteten Proben signifikant höhere Werte für die Haftzugfestigkeit erzielen. Bei allen statistischen Auswertungen wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ gewählt.

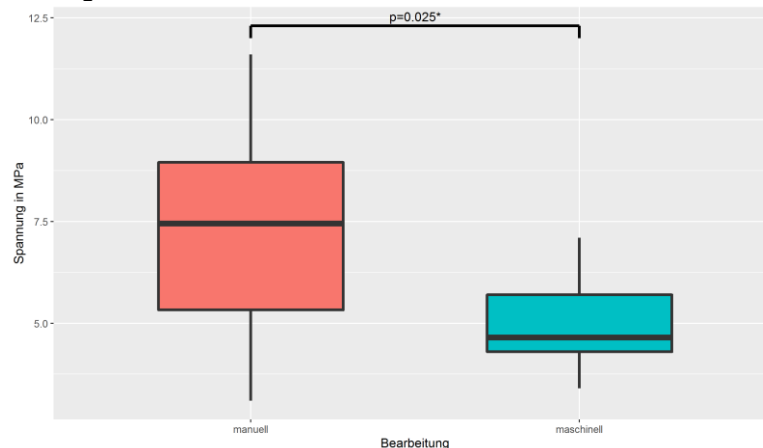


Abbildung 7: Boxplot der Zugfestigkeiten der manuell sowie mechanisiert entschichteten Proben

Allerdings konnte mittels Fisher-Test (P-Wert = 0,63), einem Test auf die Signifikanz einer Abweichung zwischen zwei Wertepaaren, kein Unterschied zwischen manueller und maschineller Bearbeitung in Bezug auf die Versagenshäufigkeit (Zugfestigkeit $<4,5$ MPa) nachgewiesen werden. Die Auswertung der unterschiedlichen Probenbleche deutet darauf hin, dass nicht alleine die Art der Probenvorbereitung ausschlaggebend für die erzielbare Haftzugfestigkeit ist, sondern dass auch weitere Parameter einen erheblichen Einfluss besitzen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass sich das Drahtspannstrahlen mit dem Bristel Blaster® gut zur Bearbeitung und Konditionierung auch von stark korrodierten Bauteilen aus Stahl, wie sie beispielsweise im Off-Shore Bereich und im Pipelinebau anzutreffen sind, eignet.

Die gemessenen Rautiefen ergeben für diese Messungen bei den mechanisierten Versuchen einen gemittelten Mittenrauwert R_a von $9,66 \pm 0,95$ μm und eine gemittelte Rautiefe R_z von $75,1 \pm 6,9$ μm . Die manuelle Bearbeitung der Oberflächen ergibt einen gemittelten Mittenrauwert R_a von $9,01 \pm 0,92$ μm und eine gemittelte Rautiefe R_z von $73,6 \pm 5,9$ μm .

Der Materialabtrag liegt beim Drahtspannstrahlen unter Wasser bei Werten von $0,098$ mg/mm^2 für S235, $0,050$ mg/mm^2 für S355NL und $0,036$ mg/mm^2 für API 5L X70, wobei der Materialabtrag mit steigender Festigkeit und Härte des Materials sinkt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Haftzugfestigkeit deuten auf eine prinzipielle Eignung des Drahtspannstrahlens als Oberflächen-Konditionierungsverfahren für den nachfolgenden Auftrag eines schweren Korrosionsschutzes. Allerdings weisen die mechanisiert bearbeiteten Proben eine große Streubreite der erzielten Haftzugfestigkeitswerte auf. Mögliche Ursachen hierfür liegen vor allem in der manuellen Applikation der Beschichtung begründet. Gerade die vergleichsweise starke Streuung der mechanisiert bearbeiteten Proben, sowie die bei diesen Proben im Mittel geringere Haftzugfestigkeit im Vergleich zu den manuell bearbeiteten Proben lassen aber darauf schließen, dass sich bei einer automatisierten Bearbeitung die Haftung der Beschichtung durch eine optimierte Prozessführung noch erheblich steigern lässt.

Schrifttum

1. Zen, K.: Corrosion and life cycle management of port structures. *Corrosion Science* **47**(10), 2353–2360 (2005).
2. Moan, T.: Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures. *Structure and Infrastructure Engineering* **1**(1), 33–62 (2005).
3. DIN EN ISO 85030 1-5: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen - Rauheitskenngrößen von gestrahlten Stahloberflächen. Beuth Verlag, Berlin (2013)
4. DIN EN ISO 12944 1-8: Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme. Beuth Verlag, Berlin (2016)
5. Lichtenstein, L.: Harmonisierung von DNV GL-Standards & Empfehlung zum Korrosionsschutz von Offshore-Windparks. *Stahlbau* **84**(8), 571–576 (2015).