

**Schlussbericht zum BMWI Vorhaben 0325672A**

**Nachhaltiger Korrosionsschutz von Offshore-  
Windenergieanlagen durch versiegelte spritzverzinkte  
Oberflächen**

**Linde AG  
Linde Gas Deutschland**

**Werner Krömmer, F. Prenger, R. Jantze, K. Bobzin, M. Öte, M. Knoch**

**2017**

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren**



# **Schlussbericht zum Verbundvorhaben KOKON Nachhaltiger Korrosionsschutz von Offshore- Windenergieanlagen durch versiegelte spritzverzinkte Oberflächen**

## **Teilprojekt**

Linde AG  
Linde Gas Deutschland  
Carl von Linde Straße 25  
85716 Unterschleißheim  
Werner Krömmel

Förderkennzeichen  
0325672A

Gefördert durch:



## Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung zum Vorhaben	4
I.1	Aufgabenstellung	4
I.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4	Stand der Wissenschaft und Technik	7
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II.	Eingehende Darstellung	8
II.1	Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse	8
II.1.1	Korrelation von Substratopographie und Schichthaftung	8
II.1.2	Ermittlung des derzeitigen Status der Korrosionsbeständigkeit von Schutzüberzügen	9
II.1.3	Spritzversuche mit unterschiedlichen Zerstäubergasen	12
II.1.4	Versuchsaufbau und Durchführung	13
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
II.4	Voraussichtlicher Nutzen – insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes	16
II.5	Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	17

## I. Kurze Darstellung zum Vorhaben

### I.1 Aufgabenstellung

Als Ziel dieses Projektes sollen Duplex-Korrosionsschutzsysteme für Windenergieanlagen hinsichtlich Langlebigkeit, Reduktion der Belastung für Mensch und Umwelt sowie verbessertem Korrosionsschutz optimiert werden. Dies soll erreicht werden, indem die Zuverlässigkeit des Duplex-Korrosionsschutzsystems bei geringeren Kosten für die Oberflächenvorbehandlung, Beschichtung und Wartungsaufwand erhöht wird. Ein zuverlässiges Duplex-Korrosionsschutzsystem für OWEA muss in der Lage sein, die Stahlkonstruktion für min. 25 Jahre vor Korrosion zu schützen.

Ein Stillstand einer OWEA zur Wartung der Beschichtung lässt die spezifischen Kosten zum Betrieb der Anlage steigen und die ständige Verfügbarkeit der Stromversorgung wird dadurch in Frage gestellt. Eine Verbesserung des Korrosionsschutzes ist gleichbedeutend mit der Reduktion des Wartungsaufwands, oder sogar der Wartungsfreiheit des Schichtsystems. Da die Reparatur einer Beschichtung Offshore um den Faktor 75-100 teurer ist als die Applikation der Erstbeschichtung, können nicht nur in großem Maße Ressourcen, sondern auch Kosten eingespart werden, die gegebenenfalls erst nach mehreren Einsatzjahren auftreten, jedoch den wirtschaftlichen Erfolg einer OWEA bedrohen können.

Durch die Entwicklung neuartiger thermisch gespritzter Beschichtungen in Kombination mit angepassten Lacksystemen soll der Korrosionsschutz so weit erhöht werden, dass Wartungsintervalle signifikant verlängert werden können, bzw. Wartung nicht mehr oder nur einem wesentlich geringeren Umfang notwendig ist. Die Eigenschaften der heute verwendeten ZnAl Beschichtungen sollen daher optimiert werden. Da die Variationsmöglichkeiten im Verarbeiten der Werkstoffe direkten Einfluss auf die Qualität der Schicht haben und sich bei unterschiedlichen Legierungen unterschiedlich auswirken, müssen die Parameter jeweils auf die Metallisierung abgestimmt werden.

Dabei spielt zum einen die maximale Korrosionsschutzwirkung eine erhebliche Rolle, zum anderen hat aber auch die Wirtschaftlichkeit durch maximale Wirkungsgrade und evtl. reduzierte Schichtdicken einen Vorteil für die Applikation. Der Einfluss des Zerstäubergases auf die Schichtmikrostruktur, die Phasenzusammensetzung der Schicht und die Größe der Spritzpartikel bei zinkbasierten Spritzdrähten wurde untersucht. Daraus konnten auch Erkenntnisse für andere Werkstoffe, wie bspw. Eisenbasis-Werkstoffe die als Verschleißschutzbeschichtung Einsatz finden, gewonnen werden.

### I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde

Durch das zusammenarbeitende Konsortium wurde die gesamte Wertschöpfungskette der Produktion von beschichteten spritzverzinkten Oberflächen, von der Werkstoffherstellung über die Zerstäubergase bis zur wissenschaftlichen Expertise abgedeckt. Dies macht die ein derart komplexes Projekt erst möglich und wäre von den einzelnen Partnern alleine nicht zu bewerkstelligen.

Der Geschäftsbereich Linde Gas der Linde AG ist in Deutschland und Europa führender Industriegaseproduzent und einer der bedeutendsten weltweit. Die Linde AG befasst sich zudem mit der Erforschung und Entwicklung des thermischen Spritzens. So wurde in den vergangenen Jahren der Einsatz unterschiedlicher Gase erforscht, die den Beschichtungsprozess verbessern bzw. innovative Schichten produzieren, die bisher mit herkömmlichen Zerstäubergasen nicht möglich waren.

Das Institut für Oberflächentechnik ist eins der erfahrensten Institute in Deutschland auf dem Gebiet des thermischen Spritzens. Die Analyse von Korrosionsprozessen und die Entwicklung von Korrosionsschutzschichten gehört zu den Kernkompetenzen des IOT. Zuletzt wurde ein Projekt zum Korrosionsschutz durch thermisch gespritztes Zink (IGF 16.434 N) erfolgreich bearbeitet.

Die Grillo-Werke AG ist ein innovativer Hersteller von Zinkprodukten und Marktführer für die Herstellung Zn-basierter Spritzdrähte. Jährlich werden 160.000 t Produkte aus metallischem Zink hergestellt. Mit dem Bereich Forschung ist es zudem möglich neue Werkstoffe in das Thema einfließen zu lassen.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Teilaufgaben des Teilprojektes für Linde ergeben sind eng verknüpft mit den Arbeiten der Partner was in der Projektstruktur Abb.: 1 zu sehen ist. Die Arbeitspakete bei denen Linde federführend, ist sind AP2 die Weiterentwicklung des Spritzprozesses und AP4 ds Herstellen von Duplexsystemen aus AP1 bis AP3

Arbeitspaket 2: Optimierung des Spritzprozesses durch Verwendung verschiedener Zerstäubergase

Unter Verwendung der Zerstäubergase Stickstoff, Stickstoff + H<sub>2</sub>, Stickstoff +C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> sowie Druckluft wurden Spritzversuche als Referenz durchgeführt. Die Gasgemische wurden dabei in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen eingesetzt um so das Optimum für den jeweiligen Werkstoff zu erreichen. Hier wurden Mischungen in Bereichen von 1% bis 5% Aktivkomponente (H<sub>2</sub> oder C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) herausgestellt und in 1% Schritten durchgeführt. Werkstoffe waren das kommerziell erhältliche ZnAl15 sowie ZnMgAl als Fülldraht mit je einem Drahtdurchmesser von 2 und 2,5 mm zum Einsatz. Die hergestellten Proben werden am IOT einer Grundcharakterisierung unterzogen. Basierend auf den erzielten Ergebnissen wurden in erster Linie die verwendeten Zerstäubergase angepasst sowie die Beschichtungsparameter des Lichtbogendrahtspritzprozesses erarbeitet. Hier wurde ein Gasmischer aufgebaut der dann auch bei den Projektpartnern IOT und Grillo eingesetzt wurde.

Herstellung von Duplex-Systemen (Linde, IOT, Grillo)

In AP4 wurden auf die optimierten Schichten aus AP2 und AP3 geeignete Versiegler im Unterauftrag von Linde durch die Firma Hempel GmbH aufgebracht. Das Eindringverhalten des Versieglers, abhängig von der Schichtmikrostruktur und Viskosität des Versieglers wurde im Querschliff analysiert und bewertet. Die versiegelten Schichten wurden zusätzlich mit geeigneten organischen Schichtsystemen versehen, die Stand der Technik (Epoxy- und Polyurethansysteme) sind und den passiven Korrosionsschutz übernehmen. Diese

Untervergabe war nötig da diese Lacke einer besonderen, genau abgestimmten Verarbeitung unterzogen werden müssen. Zudem sind Versiegler und Deckschicht aufeinander abzustimmen. Die Firma Hempel ist führend bei Lacksystemen im Offshore-Bereich und auch für Innovationen offen, weshalb wir sie als externen Partner hatten.

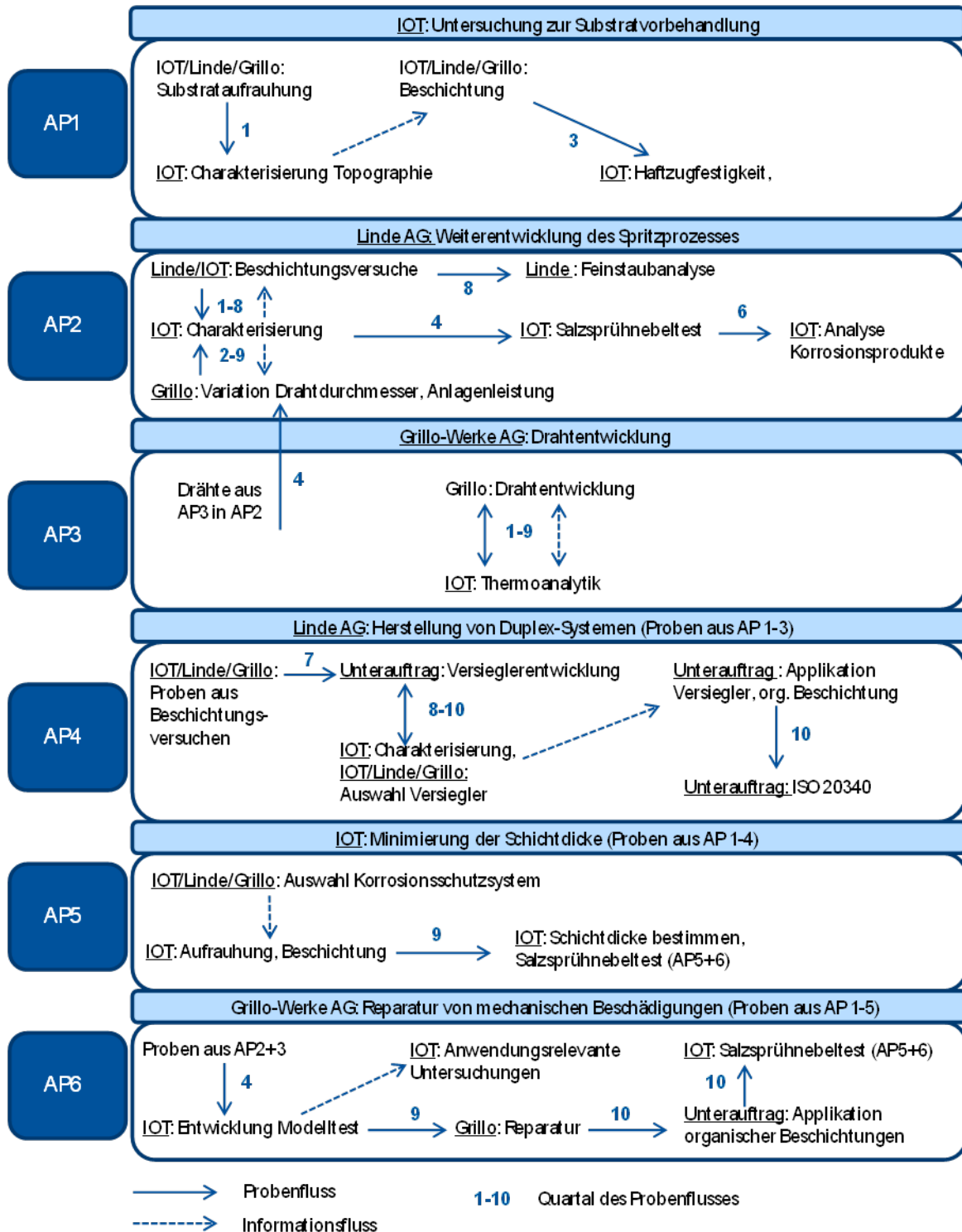


Abbildung 1: Projektstruktur

## I.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Spritzmetallisierungen sind seit geraumer Zeit Standard beim Korrosionsschutz von Offshore-Öl- und Gas-Konstruktionen im Stahlbau. Im Bereich mit kombinierten Beanspruchungen, z.B. an Stützen oder Deckunterseiten, kommen insbesondere Aluminium Spritzschichten (TSA) zur Anwendung. Turmsegmente für Windtürme werden teilweise spritzmetallisiert. Es kommen keine Lichtbogenspritzgeräte mit ZnAl15 Drähten zum Einsatz, obwohl dies in der Praxis problemlos möglich ist, und im Spritzwasserbereich die Lebensdauer der Konstruktionen erheblich verlängern würde. Mittels konventioneller Verfahren gespritzte Metallschichten weisen zum einen eine hohe Porosität auf, weshalb sie in der Regel eine zusätzliche Versiegelung benötigen. Zum anderen oxidieren die Partikel aufgrund der hohen Prozesstemperaturen durch den Luftsauerstoff, weshalb sich in den Schichten oxidreiche Bereiche bilden. Beide Phänomene können die Korrosionsschutzwirkung herabsetzen oder unnötig großen Schichtdicken erfordern.

Große Bestrebungen bestehen derzeit organische Lacksysteme zu verbessern und damit den passiven Korrosionsschutz. Diese Optimierung bringt bestimmt auch Verbesserungen für die Lebensdauer des Korrosionsschutzsystems, wird aber seinen Anforderungen nur gerecht, wenn keine Beschädigungen des Lackes vorliegen, wie bereits bei vorhergehenden Forschungsprojekten gezeigt wurde.

Derzeit verwendete Lacksysteme sind Epoxilacke (EP) (Bild 1) teilweise in Kombination mit Polyurethanlacken (PUR) (Bild4). Die Problematik nach dem aktuellen Stand ist, dass bei aktuellen Duplexsystemen als erste Versiegelung ein Epoxid verwendet wird, der jedoch nicht geeignet ist in die Porosität der Metallisierung einzudringen. Dadurch ist diese nicht ideal vor dem Eindringen von Feuchtigkeit geschützt, wodurch es bei Beschädigungen des Lacksystems wiederum leicht zu Unterkorrosion kommt.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die bisherige intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Linde und der Arbeitsgruppe Thermisches Spritzen am IOT der RWTH Aachen Institut für Werkstofftechnik wurde im Rahmen dieses Vorhabens weiter intensiviert. Reger Austausch fand bei der Entwicklung geeigneter Prozessparametern statt und hier besonders bei der Auswertung der Ergebnisse die dann in die weitere Parameterfindung mit eingegangen sind. Das Vorbereiten der Substrate was ein elementarer Punkt des Vorhabens war wurde gemeinsam mit allen Partnern vorangetrieben da nicht zuletzt hier auch die unterschiedliche Anlagentechnik und Herangehensweise von Bedeutung war.

Die Zusammenarbeit mit der Fa. Grillo AG zeichnete sich durch die dort große Erfahrung der Grillo AG bei der Verarbeitung von Zink und Zinklegierungen aus und die vorhandene Marktübersicht welche Drahtdimensionen im Markt verwendet werden. Die Tatsache, dass dort auch Beschichtungsanlagen stehen, die mit wesentlich größerer Leistung arbeiten war ein zusätzliches Plus.

Als weiteren Partner gab es Austausch mit der Firma Hempel die führend ist bei Lacksystemen im Offshore-Bereich und auch für Innovationen offen ist, weshalb wir sie als externen Partner

hatten. Die optimierten Schichten aus AP2 und AP3 wurden mit geeigneten Versiegeln im Unterauftrag von durch die Firma Hempel GmbH fertiggestellt.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

#### II.1.1 Korrelation von Substratopographie und Schichthaftung

Die Vorbereitung der Oberfläche durch Strahlen ist für das thermische Spritzen von besonderer Bedeutung. Besonders zu beachten ist das Zusammenspiel der Rauheit mit der Partikelgröße die der Thermische Spritzprozess liefert. Ziel ist es hier eine Oberflächenvorbehandlung zu erreichen die Ideal auf den folgenden Prozess abgestimmt ist. Dabei sollen eine maximale Wirtschaftlichkeit und das bestes Ergebnis erreicht werden.

Bei diesen Versuchen wurde das Strahlgut variiert mit dem Ziel verschiedene Oberflächentopographien zu erzeugen. Als Substratwerkstoff kommt, wie bei allen Versuchen, der Stahl S355J2+N zum Einsatz der auch bei Windtürmen angewendet wird. Die aufgerauten Oberflächen werden bei Linde im Haus mit dem Tastschnittverfahren geprüft und am IOT mit einem konfokalen Lasermikroskop charakterisiert.

Um die Parameter Abstand und Winkel konstant zu halten wurde das Strahlrohr fest in der Anlage montiert. Der Parameter Abstand lag bei allen Versuchen bei 80mm der Winkel betrug 75°. Der Strahldruck bei unseren Versuchen wurde unabhängig vom Strahlmittel bei 3 bar konstant eingestellt.

Als Strahlmittel wurde verwendet:

1. Korund in einer Körnung von F16 1mm - 1,4mm
2. Stahlguss kantig 0,8mm

Für die Versuche wurde eine Venturi-Düse anstelle einer Standarddüse mit gerader zylindrischer Bohrung verwendet. Diese hat eine große Eintrittsöffnung, die sich allmählich konisch auf einen sehr kurzen geraden Teil in der Mitte der Düse verengt, um sich dann wieder bis zur Düsenaustrittsöffnung zu erweitern (Lavalkontur). Eine Standarddüse erreicht ca. 350 km/h bei 6 bar Strahldruck. Durch Venturi Düsenform wird die Austrittsgeschwindigkeit des Strahlmittels mehr als verdoppelt und beträgt jetzt etwa 720 km/h, bzw. man kann bereits bei kleineren Drücken von 3 bar die gewünschten Ergebnisse erreichen.

Der Aufbau der Versuche wurde mit folgenden Parametern hergestellt (Abb.: 2)

Abstand        80mm

Winkel         75°.

Strahldruck    3 bar

Strahlmittel: Korund in einer Körnung von F16 (1mm - 1,4mm) und Stahlguss kantig 0,8mm





Abbildung 2: Aufbau der Strahlversuche

Die Ergebnisse der Versuche zeigen unter Verwendung von Korund als Strahlmittel Werte im Bereich von Rz 69,7 $\mu$ m und 75,25 $\mu$ m sowie Ra 10,35 $\mu$ m und 11,2 $\mu$ m mit dem Tastschnittverfahren gemessen. Die Ergebnisse mit Stahlguss liegen zwischen Rz 75,1 $\mu$ m und 92,9 $\mu$ m sowie Ra von 12,05 $\mu$ m bis 13,05 $\mu$ m. Das in der Maritimen Industrie verwendete Strahlmittel Stahlguss erzielte dabei leicht höhere Werte, die jedoch in der Bandbreite üblicher Werte für die optimale Vorbereitung thermisch gespritzter Schichten liegen. Die Gestrahlten Proben wurden zur weiteren Überprüfung an das IOT gesendet. Die Ergebnisse werden im Bericht des IOT genauer erläutert.

### **II.1.2 Ermittlung des derzeitigen Status der Korrosionsbeständigkeit von Schutzüberzügen**

Um für die Weiterentwicklung der Beschichtung in alle Richtungen einen derzeitigen Status Quo zu ermitteln wurden Proben für den Salzsprühstest nach DIN EN ISO 9227 und den Zyklustest ISO 20340 vorbereitet.

Die Probenvorbereitung für die Versuche wurde nach dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt.

- Entfetten der Proben (ISO 2063)
- Strahlen nach SA3 (ISO 2063)

Die Schichtdicke für die Versuche wurde nach ISO 2063 gewählt, was einer Mindestdicke von 100 $\mu$ m (+25%) entspricht. Dies sind auch Werte die heute denen bei einer Beschichtung in maritimen Bereichen entsprechen.

Nach dem Beschichten wurden die Proben mit einem handelsüblichen Epoxi Farbsystem beschichtet welches in der maritimen Industrie bereits eingesetzt wird und dem Stand der Technik entspricht. Besondere Beachtung bei der gesamten Prozesskette wurde dem Transport der Bauteile gewidmet. Zwischen den Behandlungsschritten musste dafür gesorgt werden, dass die Zeit an denen die Proben an Luft oxidieren könnten, bevor die erste

Versiegelung aufgebracht wird, den Vorgaben entspricht. Um dieses zu gewährleisten, wurden die Proben unter Argon (innert) verpackt um den Kontakt mit Sauerstoff zu unterbinden.

Das Aufbringen des Epoxi Decksystems wurde von der Fa. Hempel in den eigenen Labors durchgeführt. Den Aufbau des Epoxi Decksystems finden Sie in Tabelle 1. Einen Schliff des Schichtaufbaus eines Duplexsystems in Abbildung 3

Tabelle 1. Aufbau des Epoxi Lacksystems für die Off Shore Industrie

Schicht	Produkt	Schicht- dicke $\mu\text{m}$	Binder
Grundierung	Hempadur 45703	200	2K EP
Zwischenschicht 1	Hempadur 45753 <sup>1)</sup>	200	2K EP
Zwischenschicht 2	Hempadur 45753 <sup>1)</sup>	200	2K EP
Deckschicht	Hempathane 55610	80	2K PU

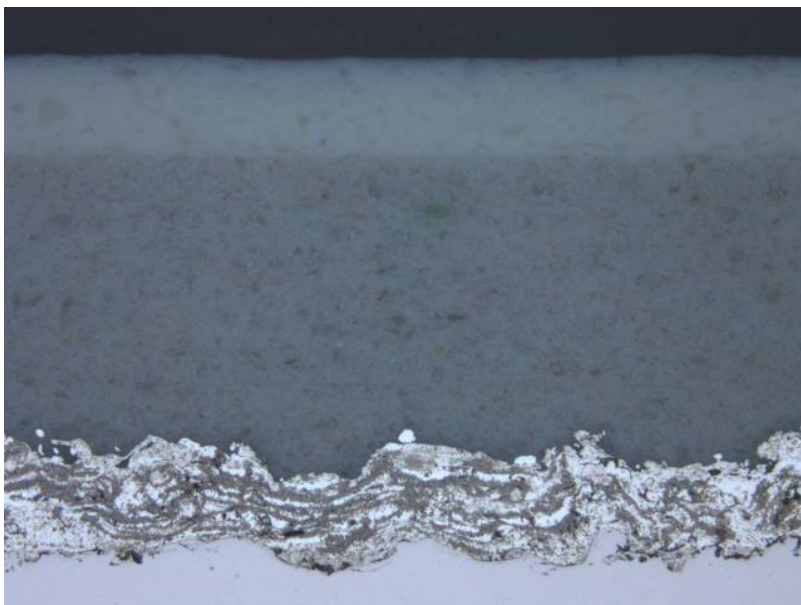


Abbildung 3 Aufbau des Duplexsystems

Die meisten Korrosionsangriffe bei Offshore-Anlagen und anderen zu schützenden Systemen gehen von Beschädigungen durch Transport oder anderen mechanische Einwirkungen aus. Aus diesem Grund wurden die Proben für den den Zyklustest nach ISO 20340 vor den Korrosionsuntersuchungen die Proben mit einer Fehlstelle präpariert wie sie in den Normen des Salzsprühtests DIN EN ISO 9227 und den Zyklustest ISO 20340 vorgeschrieben sind. Diese hat eine Länge von 50mm eine Breite von 2mm und eine Tiefe von 2mm (Abb.: 4). Ziel dieser eingebrachten Beschädigung ist es den Korrosionsangriff zu starten und die Stabilität der Beschichtung gegen das korrosive Medium prüfen.

Die Proben (Abb. 5:) zeigten im Fall der heute als Standard verwendeten Duplex Beschichtung mit Luft als Zerstäubergas sehr geringen Angriff und die Zinkschicht übernahm perfekt die aktive Schutzwirkung der Fläche. Sehr schön zu sehen ist, dass der leichte Befall mit Rotrost nur in der in der Beschädigung vorhanden ist.

Abbildung 6 dagegen zeigt, dass ohne eine Zink Aluminium Beschichtung die Korrosion sehr stark fortschreitet. Rotrost zerstört direkt das Bauteil und somit die Trägerstruktur. Aus diesem Grund wird heute mit einem Korrosionszuschlag konstruiert, was in einer extremen dicken Wandstärke der Turmsegmente resultiert, die nur aus Stabilitätsgründen nicht nötig wäre und ein enormes einsparungspotential haben.



Abbildung 4: Probe mit eingebrachter Fehlstelle



Abbildung 5: Proben mit thermisch gespritztem ZnAl15 nach der Zyklusprüfung



Abbildung 6: Proben nur mit Lacksystem nach dem Zyklustest

### II.1.3 Spritzversuche mit unterschiedlichen Zerstäubergasen

Um den Einfluss von  $N_2$ ,  $N_2+H_2$  und  $N_2+C_2H_4$  ( $N_2$  mit/ohne Aktivgas) als Zerstäubergase beim Lichtbogendrahtspritzen auf die Schicht-, Verbund- und Systemeigenschaften von Zinkschichten zu untersuchen, wurden bei Linde erste Versuche mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen der Stickstoff Aktivgas Varianten sowie als Referenz dazu Versuche mit Luft und reinem Stickstoff gemacht. Für diese Versuche wurde eine mobil einsetzbare Gasmischeinheit aufgebaut, die bei allen Partnern im Einsatz war.

Die Parameterauswahl bei Luft orientierte sich dabei an denen der vom Hersteller angegebenen Daten und wurde durch einen Test nach DIN EN ISO 17836 2005-02 Thermisches Spritzen - Bestimmung der Auftragsrate beim thermischen Spritzen bestätigt und versucht bezüglich der Auftragsrate zu verbessern. Diese Norm hat sich als ideal erwiesen, optimale Spritzparameter zu finden die hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Qualität ein Optimum darstellen. Eine weitere Qualifikation der Schichten wird zu einem späteren Zeitpunkt durch das IOT erfolgen. Diese Norm wurde bei den Versuchen mit anderen Zerstäubergasen verwendet um diese zu optimieren und um Veränderungen mit denen durch Luft hergestellten Schichten aufzuzeigen

Der Test basiert dabei auf der Ermittlung der Massenzunahme des Werkstückes. Dabei werden die Prüfstücke entsprechend den Vorgaben vorbereitet, z. B. Entfetten und Strahlen. Die Masse der vorbereiteten Prüfstücke wird durch wiegen festgestellt und dokumentiert sowie die Förderrate des Spritzzusatzes in g/min. Um optimale und praxisrelevante Geschwindigkeiten der Verfahrenwege zu simulieren, haben wir uns dabei auf zylindrische Werkstücke entschieden (Bild 7)

Unter Verwendung der gewählten Spritzparameter werden die Prüfstücke eine definierte Zeit beschichtet, jedoch mindestens 30 Sekunden. Nach der Spritzprüfung wird die Masseänderung der Prüfstücke ermittelt und dokumentiert. Die Masse des benötigten Spritzzusatzes bzw. der Wirkungsgrad ergibt sich aus der Spritzzeit der Förderrate und der Gewichtsänderung.



Abbildung 7: Wirkungsgradmessung

#### II.1.4 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Herstellung der Spritzschichten wurde die Lichtbogen-Spritzanlage Typ Smart-Arc® 350PP der Firma Oerlikon Metco verwendet. Die Versuchsdurchführung ist in zwei Schritte aufgeteilt. Wie beschrieben, wurden in einer ersten Reihe die optimalen Parameter durch die Ermittlung des Wirkungsgrades auf einem zylindrischen Bauteil ermittelt. Bei der Versuchsdurchführung wurden folgende Zerstäubergase betrachtet. Luft, reiner Stickstoff, sowie Stickstoff mit Wasserstoff als Aktivgas. Bei der Variante mit Aktivgas wurde der Anteil des Aktivgases zwischen 1% und 4% variiert. Als Werkstoff wurde ZnAl 8515 mit einem in der Praxis üblichen Drahtdurchmesser von 2mm verwendet. Versuche mit kleineren Drahtdurchmessern hatten einen nicht stabil laufenden Prozess zur Folge.

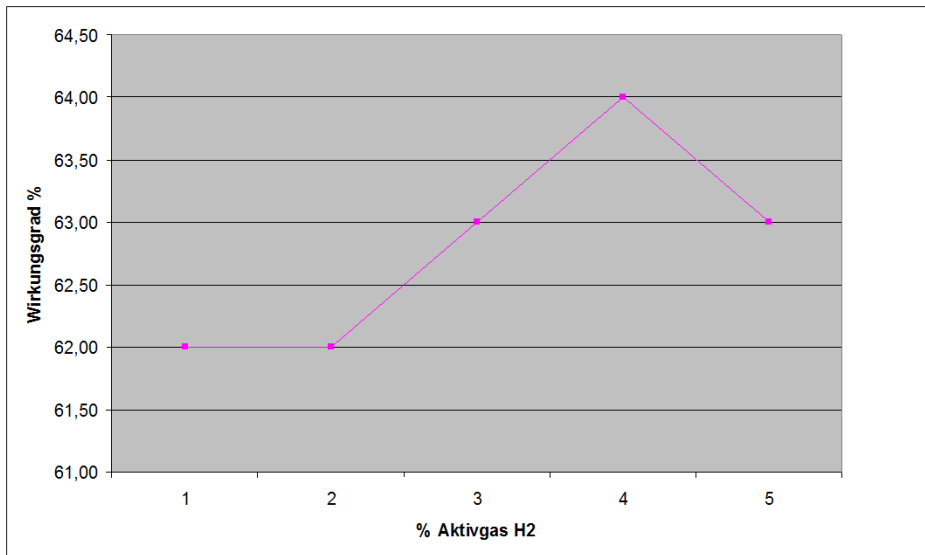


Abbildung 8: Einfluss des Aktivgasanteils am Wirkungsgrad

Die Wirkungsgrade (DE = Deposition Efficiency) die dabei erzielt wurden sind beeinflusst durch das Zerstäubergas selbst und durch die Parameterveränderungen. So erreicht man bei der Verdüsung mit Luft eine DE von 59 % mit reinem Stickstoff steigt die DE leicht an auf 61%. Unter Zugabe von H<sub>2</sub> als Aktivgas bleibt der Wert erst konstant steigt dann bei 4% H<sub>2</sub> auf 64% an und fällt bei 5% wieder leicht ab (Abb.: 8)

Große Unterschiede gab es auch bei Parametern wie dem Spritzabstand. Durch die Verwendung unterschiedlicher Zerstäubergase war es zwingend den Parameter Abstand Brenner zum Bauteil für jedes einzelne zu erarbeiten. Dies ist vor allem Wichtig da die Partikeltemperatur beim Auftreffen entscheidend ist für die Haftung und die Schichtstruktur. Die Erkenntnis aus diesen Versuchen zeigte, dass die Werte bei Luft und Stickstoff mit 4% Aktivgas sehr ähnlich sind, hingegen reiner Stickstoff die Partikel so schnell abkühlen lässt, dass eine Verringerung auf 80mm nötig war. Erwähnenswert ist auch das Parameter mit unterschiedlichem Aktivgasanteil maximale Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Abständen haben, mit steigendem Anteil ergibt sich dabei ein größerer Abstand.

Mit den oben angegebenen Parametern wurden und Veränderung einzelner Werte wie z.B. Spritzabstand, Anteil des Aktivgases und unterschiedliche Zerstäubergasdrücke unter Zuhilfenahme der Messung des Auftragswirkungsgrades der Idealparameter erarbeitet. Die Parameter die dabei den höchsten Wirkungsgrad erzielten finden Sie in Tabelle 2.

Im zweiten Teil der Versuche wurden bei Grillo mit den erarbeiteten Parametern Probepplatten für eine anschließende Untersuchung hinsichtlich des Korrosionsverhaltens der Schichten hergestellt. Die Abmessungen der Proben wurden aus den Normen ISO 20340 und der DIN EN ISO 9227 ermittelt diese sind 150 x 75 x 4 mm bzw. 150 x 100 x 4mm. Wie bereits bei der Ermittlung des derzeitigen Status der Korrosionsbeständigkeit von Schutzüberzügen wurden die metallisierten Proben mit einer Epoxidbeschichtung versehen. Die Ergebnisse der Korrosionsprüfung sind im Bericht des IOT enthalten.

Tabelle 2.: Finale Beschichtungsparameter

ZnAl15		(Luft ZnAl15)		ZnAl15	
230A		230A		260A	
22V		22V		22V	
Draht: 8m/min		Draht: 8m/min		Draht: 8m/min	
Spritzabstand:	110mm	Spritzabstand:	100mm	Spritzabstand:	80mm
Vorschub:	800 mm/s	Vorschub:	800 mm/s	Vorschub:	800 mm/s
Versatz	14mm	Versatz	14mm	Versatz	14mm
3,1 bar		3,1 bar		3,1 bar	
73m <sup>3</sup> /h ges		73 m <sup>3</sup> /h Luft		73 m <sup>3</sup> /h N <sub>2</sub>	
Aktivgas H <sub>2</sub>	4%				

## II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden erfolgreich eingesetzt und für folgende Positionen verwendet.

### Personalmittel

Hier wurden Arbeiten von Hr. Dr. Andreas Trautmann Hr. Dipl. Ing. Florian Lang und Hr. Werner Krömmer zur Unterstützung der Arbeiten des Vorhabens finanziert.

### Reisekosten

Die Reisemittel wurden für Reisen zur Konferenzen wie der EWEA Offshore /Frankfurt dem HTG Workshop für Korrosion und Meerwasserbauwerke der Fachtagung der Germanischen Lloyd Korrosionsschutz in der Maritimen Technik und der Internationalen Thermischen Spritzkonferenz ITSC

Arbeitsbesprechungen bei der Fa. Hempel über die Vorgehensweise der Probenlackierung, sowie zum Bundesamt für Wasserbau in Karlsruhe über die Prüfung der Proben und die zeitliche Abstimmung.

Die Reisen zu Projektmeetings mit den Projektpartnern wurden, um für die einzelnen Partner die Kosten gering zu halten und gleichmäßig zu verteilen, bei den jeweiligen Partnern im Wechsel durchgeführt bzw. wenn möglich in Telefonkonferenzen.

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit dem Vorhaben wird für die Endanwender von Korrosionsschutzsystemen und Betreiber von Windkraftanlagen dargelegt welche Relevanz die Richtige Vorbereitung des Substrates in Verbindung mit dem aufgetragenen Schichtsystem hat. Bisher wurde für die Vorbereitung der

Oberfläche bei nur Lacksystemen und Metallisierung plus Lacksystem dieselben Anforderungen gestellt. Eine Reduzierung des Strahlgrades für die Metallisierung bringt jedoch für die Metallisierung die Ausreichende Vorbereitung mit sich, ohne dass der Korrosionsschutz darunter leidet. Wie im Bericht des IOT gezeigt wird, bringt diese Reduzierung nicht nur wirtschaftliche Vorteile, sondern auch qualitative Verbesserungen.

Durch die Arbeiten des Projektes 0325672A "Nachhaltiger Korrosionsschutz von Offshore-Windenergieanlagen durch beschichtete spritzverzinkte Oberflächen" und deren Vorstellung ist die Diskussion über die Anwendung und den dadurch verbesserten Korrosionsschutz neu aufgerollt worden.

Bei dem heute meist manuell ausgeübten Prozess konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass jegliche Abweichung von Prozessparametern Einfluss auf die Schichtqualität hat, was sich wiederum auf die Korrosionsschutzwirkung auswirkt. Manuell kann das Verfahren zwar beherrscht werden, birgt aber ein großes Risiko hinsichtlich einem gleichmäßigen und qualitativ hochwertigen Auftrag von Beschichtungen. Bei der geforderten Lebensdauer ist daher eine Automatisierung des gesamten Prozesses von der Vorbereitung bis zum Beschichten das wichtigste Ziel, dass durch das Projekt gezeigt werden konnte. Erste Anwender haben diese Bereits erkannt und in diese Richtung investiert.

Aufgrund des hohen zu erwartenden Nutzens für die Volkswirtschaft und den Beitrag zur Energiewende in Deutschland, hinsichtlich der wirtschaftlichen Zukunftsfähigkeit Deutschlands als Staat und Wirtschaftsstandort ist eine Zuwendung aus öffentlichen Mitteln rechtfertigbar. Der Aufwand, der in diesem Vorhaben durchgeführten Arbeiten, rechtfertigt sich durch den Erfolg der erreichten Ziele.

## II.4 Voraussichtlicher Nutzen – insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes

Die Ergebnisse der Oberflächenvorbereitung in die Neufassung der DIN EN ISO 2063 - 1 und - 2 eingearbeitet

Thermal spraying — Zinc, aluminium and their alloys

Part 1: Design considerations and quality requirements for corrosion protection systems

Part 2: Execution of corrosion protection systems

Diese aktuelle Norm wird im 4 Quartal 2017 erscheinen.

Ebenso wurde klar aufgezeigt welchen Vorteil Duplexsysteme bei Offshore - Anwendungen bringen. Diese Ergebnisse sind nicht nur für Windenergie von Interesse, sondern für alle Konstruktionen in salzhaltiger Atmosphäre.

Eine Einsparung von Stahl durch den einberechneten Korrosionszuschlag im Turmbau ist ein langfristiges Ziel das durch Langzeitversuche von Schutzschichten gemeinsam mit Betreibern und Herstellern von Windtürmen erfolgen muss. Es könnte bei idealem Korrosionsschutz erhebliche Mengen an Stahl eingespart werden, der nicht zur konstruktiven Festigkeit beiträgt und somit Ressourcen schonen und einen wirtschaftlichen Nutzen im Turmbau bringen.

In weiteren Veröffentlichungen sollen die Ergebnisse auch anderen Industrien zugänglich gemacht werden um für das thermische Spritzen mit Zink Aluminium Legierungen neue Märkte zu erschließen. Das Anwenden der Ergebnisse von alternativen Zerstäubergasen in andere



Bereiche des thermischen Spritzens ist bereits geschehen und wird derzeit bei kupferhaltigen Werkstoffen, die keine Oxidation erlauben, an Bauteilen für die Leistungselektronik erprobt.

## II.5 Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die Publikation aktueller Teile des Gesamtvorhabens auf unterschiedlichen nationalen und internationalen Konferenzen immer gemeinsam mit allen Projektpartnern. Eine Liste aller Veröffentlichungen finden Sie im Teilprojekt des IOT

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlußbericht	
3. Titel <b>Nachhaltiger Korrosionsschutz von Offshore-Windenergieanlagen durch versiegelte spritzverzinkte Oberflächen</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Werner Krömmer, F. Prenger, R. Jantze, K. Bobzin, M. Öte, M. Knoch	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2017	6. Veröffentlichungsdatum 29.09.2017
	7. Form der Publikation Bericht	
	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Linde AG Linde Gas Deutschland Carl von Linde Straße 25 85716 Unterschleißheim	10. Förderkennzeichen 0325672A	
	11. Seitenzahl 17	
	13. Literaturangaben --	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	14. Tabellen 2	
	15. Abbildungen 8	
	16. Zusätzliche Angaben --	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) PTJ Jülich 29.09.2017		
18. Kurzfassung Die Entwicklung neuartiger thermisch gespritzter Beschichtungen in Kombination mit angepassten Lacksystemen erhöht den Korrosionsschutz wesentlich, so dass Wartungsintervalle signifikant verlängert werden können, bzw. Wartung nicht mehr oder nur einem wesentlich geringeren Umfang notwendig ist. Bei dem heute meist manuell ausgeübten Prozess konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass jegliche Abweichung von Prozessparametern Einfluss auf die Schichtqualität hat, was sich wiederum auf die Korrosionsschutzwirkung auswirkt. Manuell kann das Verfahren zwar beherrscht werden, birgt aber ein großes Risiko hinsichtlich einem gleichmäßigen und qualitativ hochwertigen Auftrag von Beschichtungen. Bei der geforderten Lebensdauer ist daher eine Automatisierung des gesamten Prozesses von der Vorbereitung bis zum Beschichten das wichtigste Ziel, dass durch das Projekt gezeigt werden konnte		
19. Schlagwörter Windenergie, Korrosionsschutz, Duplexbeschichtungen, Thermisches Spritzen		
20. Verlag --	21. Preis --	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title <b>Sustainable corrosion protection from Offshore Wind constructions due to sealed thermal sprayed coatings</b>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Werner Krömmer, F. Prenger, R. Jantze, K. Bobzin, M. Öte, M. Knoch	5. end of project 30.04.2017
	6. publication date 29.09.2017
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address)  Linde AG Linde Gas Deutschland Carl von Linde Straße 25 85716 Unterschleißheim	9. originator's report no.
	10. reference no. 0325672A
	11. no. of pages 17
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 8
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) PTJ Jülich 29.09.2017	
18. abstract Development of advanced thermal sprayed coatings in combination with aligned paint systems is increasing the protection lifetime essentially. Maintenance intervals can get significant extended, respectively no longer necessary or reduced to a smaller extend. The todays mostly manually exercised process showed impressive that any kind of deviation from process parameter influence the coating quality and therefor the corrosion protection get a negative effect. The process can get controlled, if done manually, but contains a high risk to get a unique and high quality applied coating. To reach the required lifetime the most important goal is to automatise the complete process from pretreatment up to the final coating, what can be shown due to this project	
19. keywords Wind power, Corrosion Protection, Duplex coatings, thermal spraying	
20. publisher	21. price