

Forschungsgesellschaft
Stahlverformung e. V.



AF Mitglied

Kurzbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Entwicklung einer Methode zur Untersuchung und Bewertung des fertigungs-bedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials moderner Korrosionsschutzsysteme für hochfeste Bauteile aus Stahl

(Bewilligungszeitraum: 01.09.2013 – 31.07.2016)

der Forschungsstelle

Technische Universität Darmstadt, Institut für Werkstoffkunde

Das IGF-Vorhaben 17815 N/1 der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Darmstadt, 18.01.2017

Prof. Dr-Ing. Matthias Oechsner

Ort, Datum

Name des Projektleiters an der Forschungsstelle

1. Motivation

Im Zuge des voranschreitenden Leichtbaus wird immer stärker der Einsatz hochfester Stähle gefordert. Die Nutzung dieser Stähle ermöglicht es, Konstruktionen des Maschinen-, Appa- rate- und Stahlbaus hinsichtlich ihrer Baugröße zu optimieren und dadurch Ressourcen und Energie einzusparen. Mit zunehmender Festigkeit der eingesetzten Stähle steigt jedoch deren Anfälligkeit gegenüber einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion (H-SpRK) erheblich an [1, 2]. Bei der H-SpRK handelt es sich um eine Systemeigenschaft, wobei die Ursache für das Auftreten stets ein dafür anfälliger Werkstoffzustand ist, wobei die Anfälligkeit nicht allein durch die Festigkeit bestimmt wird, sondern darüber hinaus zum Beispiel auch noch von der chemischen Zusammensetzung und dem Gefügebautbau. Das Wasserstoffangebot sowie auftretende Zugspannungen sind die Auslöser und stellen somit Gefährdungspotenziale dar (siehe **Abbildung 1**).

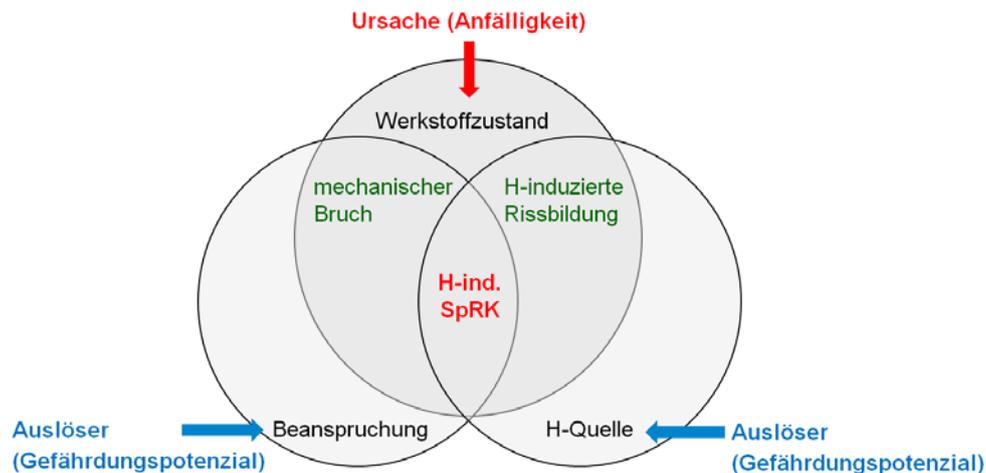


Abbildung 1: Darstellung der Wechselwirkungen zwischen der Ursache und den beiden Auslösern bezüglich einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion (H-SpRK) [1]

Der für die H-SpRK erforderliche Wasserstoffeintrag kann entweder im Betrieb, z.B. durch Korrosion oder während der Fertigung, z.B. durch Beizprozesse oder galvanische Beschichtungen, erfolgen. Zum Korrosionsschutz hochfester Stähle finden unter anderem galvanisch abgeschiedene Oberflächenbeschichtungen Verwendung. Bei Vorbehandlungsschritten, wie z.B. dem Beizen der Bauteiloberfläche und dem eigentlichen galvanischen Beschichtungsprozess kommt es zu einem Wasserstoffangebot an der Bauteiloberfläche und je nach vorliegenden Umgebungsbedingungen zu einem bestimmten fertigungsbedingten Wasserstoffeintrag [3, 4, 5, 6]. Damit ergibt sich die paradoxe Situation, dass von dem Oberflächenbeschichtungsprozess, das die hochfesten Bauteile vor Korrosion und der damit einhergehenden Gefahr einer betriebsbedingten Wasserstoffschädigung schützen soll, selbst ein nicht zu unterschätzendes Gefährdungspotenzial ausgehen kann. Aktuell werden nach den galvanischen Beschichtungsprozessen die Bauteile bei ungefähr 200°C für eine bestimmte Dauer wärmebehandelt, um den eingebrachten schädlichen diffusionsfähigen Wasserstoffanteil zu minimieren bzw. komplett auszutreiben.

Zur Beurteilung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials werden in DIN 50969-2 verschiedene quasi statische mechanisch-technologische Prüfverfahren und geeignete Prüfkörper aufgelistet, wobei zwischen drei Prüfkategorien und drei Arten der Prüfteile unterschieden wird [7]. Diese Prüfverfahren liefern jedoch lediglich eine Aussage zu dem in Abbildung 1 dargestellten Gesamtsystem. Das Wasserstoffgefährdungspotenzial von galvanischen Beschichtungsprozessen kann somit nur indirekt erfasst werden.

Im Zuge dieses Projekts wurde eine Methodik entwickelt, mit welcher eine umfassende, objektive und vor allem quantitative Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials galvanischer Beschichtungsprozesse möglich ist. Mit dem Einsatz einer solchen Prüfmethode soll in Zukunft die Prozesssicherheit galvanischer Beschichtungsprozesse erhöht werden, um so die Voraussetzungen für den sicheren Einsatz hochfester Stahlwerkstoffe zu schaffen. Des Weiteren könnten mit solch einer ganzheitlichen Untersuchungsmethode auch Abhilfemaßnahmen, wie z.B. die zuvor schon erwähnte nachträgliche Temperbehandlungen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und ihrer Notwendigkeit bewerten und die dabei ablaufenden Prozesse auch besser verstanden werden. Neben der Prozessfreigabe und -bewertung könnte die Methode auch zur Weiterentwicklung von galvanischen Beschichtungsprozessen hinsichtlich des Wasserstoffeintrags und der Überzügeigenschaften genutzt werden.

2. Forschungsziele

Das übergeordnete Ziel von diesem Forschungsprojekt ist die Entwicklung einer allgemein anwendbaren und wissenschaftlich abgesicherten Prüfmethode, um das fertigungsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial galvanischer Beschichtungsprozesse zum Korrosionsschutz hochfester Bauteile aus Stahl umfassend und objektiv bewerten zu können.

Für die Erreichung der Gesamtzielsetzung wurden die drei folgenden Teilziele definiert:

- 1) Nachweis der Eignung allgemein bekannter mechanisch-technologischer Prüfverfahren zur Durchführung von Zeitstandprüfungen hinsichtlich der Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotentials
- 2) Substitution von Kerbzugproben durch C-Ringproben anhand vergleichender Zeitstandprüfungen
- 3) Ermittlung des Einflusses der Überzüge auf das Effusionsverhalten des Wasserstoffs unter Auslagerungsbedingungen

3. Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Untersuchungen kamen drei verschiedene Werkstoffe zum Einsatz, welche in **Tabelle 1** aufgelistet sind:

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der drei untersuchten Stähle. Alle Angaben sind in Gew.-%.

Werkstoff	C	Si	Mn	Cr	B	Mo	Ni	V
C75	0,70- 0,80	0,15- 0,35	0,60- 0,80	-	-	-	-	-
32CrB4	0,30- 0,34	≤ 0,30	0,60- 0,90	0,90- 1,20	0,0008- 0,0050	-	-	-
300M	0,38- 0,46	1,45- 1,80	0,60- 0,90	0,70- 0,95	-	0,30- 0,65	1,65- 2,00	≥ 0,05

Der Stahl C75 lag als C-Ringprobe in Form von Wellensicherungsringen mit einer Nenngroße von 28 mm nach DIN 471 [8] vor. Aus dem 32CrB4-Stahl wurden gekerbte und ungekerbte Schrauben (M8 x 1,25 x 112) gefertigt, wobei nachträglich aus deren Schaft noch eine gewisse Anzahl an Zylinderproben für die Schmelzgasextraktions-Methode herausgetrennt wurde. Der Stahl 300M wurde in Form von gekerbten und ungekerbten Zeitstandproben nach DIN EN 2832 [9] sowie Zylinderproben mit einer Höhe von 6 mm und einem Durchmesser von 8 mm bereitgestellt.

Aus dem Werkstoff C75 wurden drei verschiedene Anfälligkeitsstufen gegenüber einer H-SpRK über die jeweiligen Vergütungsparameter eingestellt, die gemäß der Vorgaben der DIN 50969-2 in der durchführenden Forschungsstelle qualifiziert wurden. Abhängig von der Anfälligkeitsstufe werden die C-Ringproben in der Folge immer mit Typ I (niedrige Anfälligkeit), Typ II (mittlere Anfälligkeit) und Typ III (hohe Anfälligkeit) bezeichnet.

Bei den untersuchten Werkstoffen handelt es sich um hochfeste Vergütungsstähle, deren Festigkeiten in **Tabelle 2** aufgeführt sind.

Tabelle 2: Zugfestigkeiten der ungekerbten und gekerbten Proben der beiden Werkstoffe 300M und 32CrB4 sowie Vickershärtewerte der drei C-Ringtypen. Darüber hinaus ist das Kerbzugfestigkeitsverhältnis γ_k sowie die aus den Mittelwerten nach DIN EN ISO 18265 umgerechnete Vickershärten bzw. Zugfestigkeiten angegeben (in kursiver Schrift).

Werkstoff	R_{mk} [MPa]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	γ_k	Härte [HV]
300M	2893 ± 10	2021 ± 1	1704 ± 11	1,43	607
32CrB4	1973 ± 7	1332 ± 4	1220 ± 2	1,48	413
C-Ring Typ I	-	1470	-	-	455 ± 19
C-Ring Typ II	-	1620	-	-	497 ± 19
C-Ring Typ III	-	1937	-	-	585 ± 19

Bei den verschiedenen Prüfmethode n zur Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials von galvanischen Beschichtungsprozessen für hochfeste Bauteile aus Stahl kann grundsätzlich zwischen direkten und indirekten Prüfmethode n unterschieden werden. Zu den direkten Prüfmethode n zählen unter anderem die Wasserstoffanalytik, die Glimmentladungsspektrometrie (GD-OES) sowie die elektrochemische Permeationsmessung nach DIN EN ISO 17081 [10], wobei in diesem Projekt nur die Wasserstoffanalytik verwendet wurde.

Zu den indirekten Prüfverfahren zählen die mechanisch-technologischen Prüfverfahren, deren Belastungsprofile die diffusionsgesteuerten Schädigungsmechanismen des Wasserstoffs erfassen können. Dazu gehören unter anderem die Zeitstandprüfung nach DIN 50969-2 [7], der Langsamzugversuch nach DIN EN ISO 7539-7 [11] und der sogenannte Step-Load-Test nach ASTM F 1624-06 [12], wobei im Projekt vor dem Hintergrund der praktischen Anwendung in der betrieblichen Praxis ausschließlich die Zeitstandprüfung nach DIN 50969-2 angewendet wurde.

Am Beispiel von galvanischen Zink- und Zink-Nickel-Beschichtungsprozessen, die bei unterschiedlichen Beschichtern durchgeführt wurden, konnte eine umfassende Methodik zur Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials von galvanischen Beschichtungsprozessen durch Kombination der bisher eingesetzten mechanisch-technologischen Prüfverfahren mit einer speziellen Form der Wasserstoffanalytik (Heißgasextraktionsmethode mittels Yanako-Einheit) entwickelt und verifiziert werden. Das für die verschiedenen Überzüge und die verwendeten Grundwerkstoffe charakteristische Wasserstoff-Effusionsverhalten bei Raumtemperatur (RT) und 200°C und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Wasserstoffgefährdungspotenzial konnte mit dieser Methode untersucht und bewertet werden.

4. Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten sind die während der Projektlaufzeit erzielten Ergebnisse zusammengefasst.

4.1 Entwicklung einer Methode zur Bewertung des fertigungsbedingten H-Gefährdungspotenzials von galvanischen Beschichtungsprozessen

Das übergeordnete Ziel dieses Projekts stellte die Entwicklung einer Methode zur Bewertung des fertigungsbedingten H-Gefährdungspotenzials galvanischer Beschichtungsprozessen zur Beschichtung hochfester Stähle dar. Im Fokus dieser Entwicklung stand die Identifikation einer geeigneten H-Analysemethode, um den während eines galvanischen Beschichtungsprozesses eingebrachten diffusionsfähigen und damit schädlichen H-Anteil zu quantifizieren. Dazu wurde an im Vorfeld während zweier Beschichtungsgänge in Industrieanlagen mit ZnNi beschichteten C-Ringproben vom Typ II die Heißgasextraktionsmethode mittels Yanako-Einheit identifiziert, die sich für die Quantifizierung des durch den Beschichtungsprozess in das Gesamtsystem Grundwerkstoff plus Überzug eingebrachten effusiblen H-Gehalts am besten eignet.

Auf Basis des 1. ZnNi-Beschichtungsgangs im Technikum von Beschichter A wurde an den galvanisch beschichteten C-Ringproben der Typen I-III ein Bewertungsverfahren bezüglich

des fertigungsbedingten H-Gefährdungspotenzials eines ZnNi-Beschichtungsprozesses entwickelt. Als Analyseparameter für die Heißgasextraktionsmethode mittels Yanako-Einheit hat sich eine einstündige Auslagerung bei 200°C zur Sammlung des effundierenden Wasserstoffs in den Yanako-Hülsen bewährt. Die Verspannprüfung nach 50969-2 stellte die zweite Prüfmethode dar, um zusätzlich eine belastbare Messgröße bezüglich der mit dem effusiblen H-Gehalt zusammenhängenden Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der beschichteten C-Ringproben durch den Wasserstoffeintrag zu erzielen. Die systematischen Untersuchungen unter Verwendung dieser beiden Prüfmethoden an den beschichteten und für bestimmte Dauern bei RT und 200°C ausgelagerten C-Ringproben der Typen I-III haben gezeigt, dass eine eindeutige Korrelation zwischen den Ausfallraten der Verspannprüfungen und den entsprechenden effusiblen H-Gehalten vorliegt. Diese entwickelte Methodik kann somit genutzt werden, um eine umfassende Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials eines ZnNi-Beschichtungsprozesses vorzunehmen.

Die entwickelte Bewertungsmethode wurde mit einem 2. Beschichtungsgang bei Beschichter A mit gleichen Prozessparametern wie bei einem weiteren Beschichtungsgang bei Beschichter C mit abweichenden Prozessparametern erfolgreich verifiziert. Hierbei ist hervorzuheben, dass die für die Funktionalität der Bewertungsmethode erforderliche Korrelation zwischen den Ergebnissen der Verspannprüfung und der H-Analytik auch mit den bestimmten effusiblen Wasserstoffgehalten des Gesamtsystems aus Grundwerkstoff plus Überzug funktioniert, obwohl die für eine Wasserstoffversprödung entscheidende Größe der effusible Wasserstoffgehalt im Grundwerkstoff ist. Diese Beobachtung erlaubt eine deutliche Vereinfachung im Probenhandling, da der nasschemische Abtrag der ZnNi-Überzüge in der praktischen Routineanwendung einige mögliche Fehlerquellen beinhaltet. Dieser Zusammenhang kann jedoch nur bei ähnlichen Überzugsdicken der untersuchten Proben sichergestellt werden, da dort der größte Anteil des effusiblen Wasserstoffgehalts lokalisiert ist.

Bei der Analyse der beiden Beschichtungsgänge bei Beschichter A wurde offensichtlich, dass selbst bei identischen Prozessparametern die vom Gesamtsystem absorbierten effusiblen H-Gehalte große Unterschiede zwischen den beiden Beschichtungsgängen aufweisen. Dies lässt den Schluss zu, dass es weitere, noch unbekannte Einflussparameter gibt.

4.2 Übertragung der für ZnNi entwickelten Bewertungsmethode auf einen galvanischen Zn-Beschichtungsprozess

Das erfolgreich für galvanische ZnNi-Beschichtungsprozesse entwickelte und verifizierte Verfahren zur Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials wurde auch auf seine Eignung für andere galvanische Überzüge hin überprüft. Dazu wurden C-Ringproben der Typen I-III in einem Beschichtungsgang bei Beschichter B in einer Industrieanlage galvanisch mit Zn beschichtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den verzinkten C-Ringproben haben gezeigt, dass das Bewertungsverfahren auch auf die im Vergleich zu ZnNi für Wasserstoff undurchlässigeren Zn-Überzügen anwendbar und damit auch zur Beurteilung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials geeignet ist.

4.3 Nachweis der Eignung allgemein bekannter mechanisch-technologischer Prüfverfahren zur Durchführung von Zeitstandprüfungen hinsichtlich der Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotentials

Es konnte mit den Versuchsreihen an den mit ZnNi beschichteten C-Ringproben der Typen I-III gezeigt werden, dass sich die Verspannprüfung an C-Ringproben nach 50969-2 grundsätzlich eignet, um das fertigungsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial galvanischer Beschichtungsprozesse zu erfassen. Die Untersuchungen an den bei Beschichter A mit ZnNi beschichteten Zylinderproben und gekerbten Proben aus den Werkstoffen 300M und 32CrB4 haben gezeigt, dass sich die Zeitspannprüfungen an gekerbten Proben ebenfalls für eine Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials eignen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den im großen Umfang durchgeführten vergleichenden Wasserstoffanalysen (direkte Methode zur Erfassung des Wasserstoffgefährdungspotenzials) bestätigt werden konnte, dass sich die Verspannprüfung (indirekte Methode) an glatten oder gekerbten Probenformen nach DIN 50969-2 zur Prozessfreigabe und -kontrolle von ZnNi-Beschichtungsverfahren grundsätzlich eignet, da sich jeweils eine eindeutige Korrelation zwischen den Ergebnissen der beiden Prüfmethoden eingestellt hat.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass das im Vorfeld des Projekts gesteckte Ziel, die relativ teuren Kerbzugproben durch einfach handhabbare und preiswerte C-Ringproben im Zuge der Prozessfreigabe und -kontrolle von galvanischen Beschichtungsprozessen zu ersetzen, auf Basis der hier erzielten Ergebnisse umsetzbar ist.

Da innerhalb der beiden Zustände von 0% und 100% Ausfallrate allerdings keine valide Differenzierung bezüglich des H-Gefährdungspotenzial möglich ist, ist die reine Verspannprüfung zur Optimierung von Beschichtungsprozessen und deren -Parametern hinsichtlich eines fertigungsbedingten Wasserstoffeintrags ungeeignet. Hierfür bietet sich als Ergänzung die angewandte Wasserstoffanalyse-Strategie an, um das Wasserstoffgefährdungspotenzial direkt über die Bestimmung des effusiblen Wasserstoffgehalts zu beschreiben.

4.4 Ermittlung des Einflusses der Überzüge auf das Effusionsverhalten des Wasserstoffs unter Auslagerungsbedingungen

Der Einfluss der Überzüge auf das Effusionsverhalten von Wasserstoff wurde durch Variation der Auslagerungstemperaturen (RT und 200°C) und Auslagerungsdauern untersucht.

Ein Kernergebnis dieser Untersuchungen ist, dass im Fall von ZnNi-Überzügen abhängig von den gewählten Beschichtungsparametern unterschiedliche Überzugsstrukturen hinsichtlich der H-Durchlässigkeit erzeugt wurden, die das H-Effusionsverhalten erheblich beeinflussen. Bei Beschichter A wurden durch die beiden Beschichtungsgänge mit gleichen Prozessparametern im Vergleich zu Beschichter C für alle fünf betrachteten Werkstofftypen stets für Wasserstoff durchlässige Überzugsstrukturen erzielt, so dass selbst bei RT ein erheblicher Anteil des in das Gesamtsystem eingebrachten diffusionsfähigen Wasserstoffs effundieren konnte und sich somit das Wasserstoffgefährdungspotenzial verminderte. Bei den mit ZnNi beschichteten C-Ringproben von Beschichter C sind die Überzugsstrukturen dagegen relativ undurchlässig für Wasserstoff, so dass selbst nach einer Auslagerung bei 200°C für 16 Stunden immer noch knapp 80% der mittels Verspannprüfung getesteten C-Ringproben vom Typ III mit der höchsten Anfälligkeit brechen. Es ist auch denkbar, dass ein Teil des

Wasserstoffs von dem sperrenden Überzug in den Grundwerkstoff diffundiert. Diese Hypothese wurde allerdings nicht überprüft.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ZnNi-Überzüge nicht grundsätzlich die oft auf phänomenologischen Erkenntnissen basierende gute Durchlässigkeit für Wasserstoff aufweisen müssen. Daher kann abgeleitet werden, dass die Durchlässigkeit gegenüber Wasserstoff von der Überzugsstruktur abhängt und diese wiederum maßgeblich über die Prozessparameter bei der Beschichtung beeinflusst wird.

Die verzinkten C-Ringproben zeigten im Vergleich zu den bei Beschichter A mit ZnNi beschichteten C-Ringproben ein schlechteres H-Effusionsverhalten bei RT und 200°C auf. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass bei einer 200°C-Auslagerung auch aus dem Grundwerkstoff ein gewisser Anteil des effusiblen H-Gehalts durch den Zn-Überzug effundieren kann und sich dieser während der Temperaturbehandlung nicht nur innerhalb des Grundwerkstoffs homogenisiert.

5. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Das Fehlen einer Untersuchungsmethode zur Bewertung der Qualität galvanischer Korrosionsschutzüberzüge auf hochfesten Vergütungsstählen, und hier insbesondere des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials, verhindert eine breitere Anwendung z.B. neuerer Zink-Basisbeschichtungen. Dies steht als Hemmnis dem Wunsch entgegen, die Anwendungsbereiche z.B. von mit ZnNi-Überzügen beschichteten hochfesten Stahlteilen zu erweitern.

Da es sich bei Bauteilen aus hochfesten Vergütungsstählen vielfach um Sicherheitsbauteile handelt, trägt die entwickelte Bewertungsmethode auch zur Aufdeckung der Anwendungsgrenzen und damit zur Verbesserung des Schutzes von Mensch und Umwelt bei.

Die Kenntnis über das Effusionsverhaltens des Wasserstoffs aus beschichteten Proben während des Temperprozesses eröffnet die Möglichkeit, den Temperprozess energie- und zeitsparender zu gestalten und erhöht damit die Produktivität dieses Fertigungsschrittes.

Von den im Projekt erzielten Ergebnissen profitieren vorwiegend die Unternehmen der vorwiegend klein- und mittelständischen deutschen Beschichtungsindustrie aber auch alle anderen Hersteller hochfester Bauteile aus Stahl, die diese Teile zum Zwecke des Korrosionsschutzes mit galvanischen Überzüge beschichten lassen. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen mittelfristig die Weiterentwicklung der Versuchsmethode zu einer Prüfmethode, welche das überzugsspezifische Wasserstoffgefährdungspotenzial verschiedenartiger Korrosionsschutzsysteme auf Zinkbasis bewertbar macht. Die in diesem Forschungsprojekt entwickelte Methodik zur Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials galvanischer Beschichtungsprozesse bei hochfesten Bauteilen aus Stahl gibt den Beschichtern ein Werkzeug an die Hand, die Sicherheit der Produkte durch Auswahl einer geeigneten Beschichtung und Nachbehandlung besser einzuschätzen und zu verbessern.

Die in Kombination zu den mechanisch-technologischen Prüfmethode zum Einsatz kommende spezielle H-Analysemethode ermöglicht in der Zukunft ein tieferes Verständnis der während der einzelnen Teilschritte des galvanischen Beschichtungsprozesses auftretenden Mechanismen und Einflussparameter bezüglich der Wasserstoffabsorption. Diese Methodik

bietet die Grundlage für die Weiterentwicklung der Prozesse und der darin enthaltenen Betriebsstoffe sowie die Ableitung von prozesstechnischen Maßnahmen, um das fertigungsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial zu verringern.

6. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die etwa 50 Mitgliedsfirmen des Deutschen Schraubenverbandes (DSV) wurden über die gesamte Projektlaufzeit zweimal im Jahr im Rahmen des DSV-Arbeitskreises „Gemeinschaftsforschung“ über den aktuellen Stand des Forschungsprojekts informiert. Darüber hinaus wurde über die gesamte Laufzeit einmal jährlich eine Präsentation über die aktuellen Ergebnisse auf der Sitzung des Arbeitskreises „Wasserstoffversprödung“ der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik (DGO) gegeben. Die Thematik dieses Forschungsprojekts wurde im Rahmen verschiedener studentischer Arbeiten und durch die an dem Institut für Werkstoffkunde (IfW) der TU Darmstadt gehaltenen Vorlesungen mit den Titeln „Verbindungstechnik“ und „Schadenskunde“ in die akademische Lehre integriert. Einzelne Erkenntnisse aus dem Projekt wurden in den Lehrstoff der Schraubfachausbildung DSV® integriert.

Darüber hinaus fand auch ein weitreichenderer Transfer der Forschungsergebnisse im Rahmen der EUROCORR 2016 in Montpellier und der ZVO-Oberflächentage 2016 in Garmisch statt.

7. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben (17815 N/1) der Forschungsvereinigung Stahlverformung (FSV) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie der FSV für die Möglichkeit zur Durchführung des Vorhabens. Ein weiterer Dank für die große Unterstützung gilt dem Deutschen Schraubenverband (DSV), der als Dachverband bei diesem Projekt fungierte, sowie den am Arbeitskreis „Gemeinschaftsforschung“ des DSV und am projektbegleitenden Ausschuss teilnehmenden Unternehmen

Der vollständige AiF-Schlussbericht kann über die Forschungsvereinigung Stahlverformung erworben werden.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Landgrebe, *Wasserstoffinduzierte Sprödbruchbildung bei hochfesten Schrauben aus Vergütungsstählen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1993.
- [2] Nagumo, M., Nakamura, M. and Takai, K., *Metall and Mat Trans A*, Vol. 32, 339–347, 2001.
- [3] Paatsch, W., *Metalloberfläche*, 32, 546–550, 1978.
- [4] Paatsch, W., *Metalloberfläche*, 34, 174–179, 1980.
- [5] Paatsch, W., *Jahrbuch Oberflächentechnik*, 33, 254-259, 1977.
- [6] Speckhardt, H., *VDI-Berichte Nr. 220*, 107-116, 1974.
- [7] DIN 50969-2, *Vermeidung fertigungsbedingter wasserstoffinduzierter Sprödbrüche bei hoch-festen Bauteilen aus Stahl - Teil 2: Prüfungen*, 2013
- [8] DIN 471, *Sicherungsringe (Haltringe) für Wellen – Regelausführung und schwere Ausführung*, 2011.
- [9] DIN EN 2832, *Wasserstoffversprödung von Stählen – Kerbzugversuch*, 1993
- [10] DIN EN ISO 17081, *Elektrochemisches Verfahren zur Messung der Wasserstoffpermeation und zur Bestimmung von Wasserstoffaufnahme und -transport in Metallen*, 2015.
- [11] DIN EN ISO 7539-7, *Korrosion von Metallen und Legierungen Prüfung der Spannungsrisskorrosion Teil 7: Prüfung mit langsamer Dehngeschwindigkeit*, 2005.
- [12] ASTM F 1624-06, *Standard Test Method for Measurement of Hydrogen Embrittlement Threshold in Steel by the Incremental Step Loading Technique*, 2006.