

Kurzbericht

zu dem IGF-Vorhaben

**HAEGaS – Optimierung galvanischer Prozesse durch das Verständnis der
Prozesseinflussgrößen auf das Wasserstoff (H)-Aufnahme- und Effusionsverhalten
galvanisch beschichteter hochfester Stähle**

(Bewilligungszeitraum: 01.01.2018 – 30.06.2021)

der Forschungseinrichtung

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Darmstadt, TU-Darmstadt

Das IGF-Vorhaben 19759 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde gefördert über die



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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Darmstadt, 28.02.2022

Prof. Dr-Ing. Matthias Oechsner

Ort, Datum

Name des Institutsleiters an der Forschungseinrichtung

1. Motivation

Durch sein breites Eigenschaftsspektrum und die vielfältigen Einsatzbereiche ist Stahl der bedeutendste Konstruktionswerkstoff. 81 % des Stahls werden für Erzeugnisse im Baugewerbe, im Automobilbereich, im Maschinenbau und für Metallwaren benötigt [1]. Der Bedarf an Hochleistungsstählen für verschiedenste Einsatzbereiche wächst, und das Innovationspotential von Stahl ist aus heutiger Sicht noch lange nicht ausgeschöpft. Grundlage für die sichere Anwendung von Hochleistungsstählen ist ein zuverlässiger und langzeitstabiler Korrosionsschutz. Für hochfeste Stähle stellen insbesondere galvanische zinkbasierte Schichten wie galvanisch Zink (g-Zn) oder Zink-Nickel (g-ZnNi) einen wirkungsvollen Korrosionsschutz sicher. Jedoch wird beim galvanischen Beschichtungsprozess Wasserstoff in den Stahl eingebracht, was dazu führt, dass mit zunehmender Festigkeit des Stahls das Risiko für Brüche infolge wasserstoff-induzierter Spannungsrisskorrosion (H-SpRK) steigt. Obwohl sich heute bereits verschiedene galvanische Beschichtungen in der Anwendung etabliert haben, ist das genaue Verständnis bezüglich des Wasserstoffeintrags während des galvanischen Beschichtungsprozesses noch nicht vorhanden [2]. Für das Auftreten einer H-SpRK müssen sich die Schnittmengen der drei Faktoren Werkstoffzustand – Beanspruchung – Wasserstoffangebot überschneiden (**Abbildung 1**).

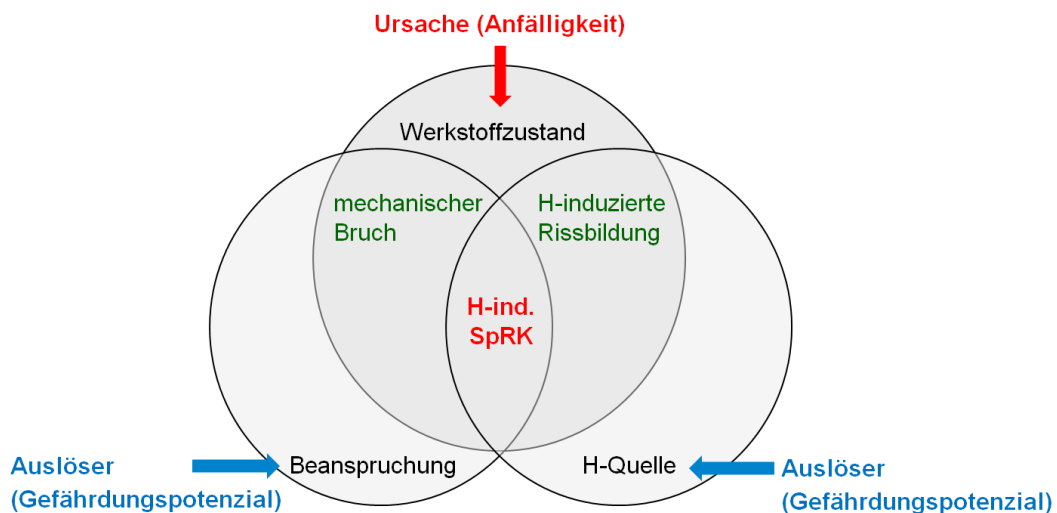


Abbildung 1: Einflussfaktoren für das Auftreten einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion (H-SpRK)

Die Ursache für H-SpRK ist stets ein dafür anfälliger Werkstoffzustand. Das (kritische) Wasserstoffangebot sowie Zugspannungen sind die Auslöser bzw. stellen die Gefährdungspotenziale dar. Der für die H-SpRK erforderliche Wasserstoffeintrag kann sowohl im Betrieb (z.B. durch Korrosion) als auch während der Fertigung (z.B. durch Beiz- oder galvanische Beschichtungsprozesse) erfolgen.

Bei der galvanischen Beschichtung kommt es sowohl bei den Vorbehandlungsschritten, z.B. der Bauteilreinigung durch elektrolytische Entfettung oder Beizen, als auch während des eigentlichen galvanischen Beschichtungsprozesses zu einem Wasserstoffangebot an der Bauteiloberfläche und damit - je nach vorliegenden Prozessbedingungen - zu einem fertigungsbedingten Wasserstoffeintrag. Damit ergibt sich die paradoxe Situation, dass von dem Beschichtungsverfahren, welches die hochfesten Stähle vor Korrosion und der damit einhergehenden Gefahr einer betriebsbedingten Wasserstoffschädigung schützen soll, selbst ein nicht zu unterschätzendes Gefährdungspotenzial ausgehen kann.

Zur Bewertung dieses fertigungsbedingten Wasserstoff-Gefährdungspotenzials wurden im kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt IGF 17815/N [3] erfolgreich Prüf- und Analysestrategien entwickelt und validiert. Diese auf chemischen Wasserstoffanalysen und mechanischen Verspannversuchen basierenden Methoden erlauben die sichere und reproduzierbare Analyse und Bewertung der während der Beschichtung aufgenommenen Wasserstoffkonzentration. Dies ermöglicht die Ableitung der Grenzwasserstoffkonzentration im Gesamtsystem Grundwerkstoff-Schicht, dessen Überschreiten zu einer Wasserstoffversprödung führt, sowie der Sicherstellung der Wirksamkeit von Temperbehandlungen.

Allerdings sind die eigentlichen Mechanismen und Einflussfaktoren bezüglich des Wasserstoffeintrags während der Vorbehandlung und der Beschichtung sowie das Effusionsverhalten bei einer anschließenden Temperbehandlung noch nicht verstanden. So zeigte sich im IGF-Forschungsprojekt 17815/N, dass ZnNi-Überzüge nicht grundsätzlich die oft auf phänomenologischen Erkenntnissen basierende gute Durchlässigkeit für Wasserstoff aufweisen [2]. So unterschied sich die bei der ZnNi-Beschichtung aufgenommene Wasserstoffkonzentration auch bei identischen Prozessparametern und Grundwerkstoffen zwischen den Beschichtungsgängen in der gleichen Galvanikanlage mitunter signifikant.

In dem Projekt sollte daher ein tieferes Verständnis bezüglich der während der einzelnen Teilschritte des galvanischen Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesses auftretenden Mechanismen und Einflussparametern hinsichtlich der Wasserstoffabsorption gewonnen werden. Dabei sollen die in IGF 17815/N entwickelten Prüfmethode eingesetzt und mit weiteren quantitativen Wasserstoff-Analysemethoden, mechanisch-technologischen Prüfmethode sowie mikrostrukturellen Untersuchungen ergänzt werden. Die zu erzielenden Ergebnisse bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung der Prozesse und der darin enthaltenen Betriebsstoffe sowie die Ableitung prozesstechnischer Maßnahmen, um das fertigungsbedingte Wasserstoff (H)-Gefährdungspotenzial zu verringern.

Damit liefert das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Prozesssicherheit galvanischer Prozesse und dem sicheren Einsatz galvanisch beschichteter hochfester Stähle.

2. Forschungsziele

Die Zielsetzung des Projekts ist das Verständnis und die Bewertung des unterschiedlichen Wasserstoff-Aufnahme- und Effusionsverhaltens galvanisch mit Zn und Zn-Ni beschichteter hochfester Stähle, die Identifikation der relevanten Prozesseinflussgrößen sowie die Entwicklung von Strategien und Handlungsempfehlungen zur Prozessoptimierung.

Zur Erreichung der Zielsetzung sind die folgenden Projektschwerpunkte vorgesehen:

- Systematische Analyse der prozessbedingten Einflüsse auf die Wasserstoffaufnahme, insbesondere die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Beschichtungsparametern – verwendeter Betriebsstoffe – Zustand der Betriebsstoffe – Wasserstoffeintrag
- Entwicklung eines Verständnisses zu den Auswirkungen der Vorbehandlungs- und der Beschichtungsparameter auf die Wasserstoffaufnahme beim galvanischen Beschichten
- Verständnis der mikrostrukturellen Einflüsse, insbesondere im Bereich der galvanischen Schicht, auf das Wasserstoff-Effusionsverhalten
- Weiterentwicklung der in IGF 17815/N entwickelten Prüfmethode für Verspannversuche, insbesondere hinsichtlich der Identifikation geeigneter Vergütungszustände für C-

Ringtypen speziell zur Prozesskontrolle von galvanischen Beschichtungsprozessen bezüglich hochfester Stähle

Ableitung kritischer Zustände (z.B. Stromdichte, pH-Wert, Badalter, Temperatur und Zusätze) der Betriebsstoffe und der Beschichtungsparameter

3. Vorgehensweise

Die Vorgehensweise ist in **Abbildung 2** zusammengefasst:



Abbildung 2: Projektstruktur

4. Ergebnisse

Die Zielsetzung des Projekts ist die Schaffung eines Verständnisses und die Bewertung des unterschiedlichen Wasserstoff-Aufnahme- und Effusionsverhaltens galvanisch mit Zn und Zn-Ni beschichteter hochfester Stähle, die Identifikation der relevanten Prozesseinflussgrößen sowie die Entwicklung von Strategien und Handlungsempfehlungen zur Prozessoptimierung.

Dazu wurden die in IGF 17815/N entwickelten Prüfmethode eingesetzt und um mikrostrukturelle Untersuchungen ergänzt. Das Screening umfasste galvanisch mit Zn bzw. ZnNi beschichtete C-Ringproben des Werkstoffs C75S. Mittels Heißgasextraktionsmethode in der Yanako-Sammereinheit erfolgte eine valide Quantifizierung des diffusiblen H-Anteils. Hierbei wurden die beschichteten Proben für eine Stunde bei 200 °C aufgeheizt und anschließend jeweils die gesammelte, effundierte H-Konzentration mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor bestimmt. Mit dieser H-Analysestrategie wurde in Kombination mit lichtmikroskopischen Untersuchungen zur Bestimmung der Überzugsdicke und Rissdichte und Verspannungsprüfungen nach DIN 50969-2 das H-Gefährdungspotenzials bewertet. Für alle drei ZnNi-Beschichtungsprozesse sowie den Zn-Beschichtungsprozess konnte eine eindeutige Korrelation zwischen der Ausfallrate bei der Verspannungsprüfung und der absorbierten und bei 200 °C effusiblen H-Konzentration des Gesamtsystems – Grundwerkstoff plus Überzug – der beschichteten Proben in Abhängigkeit der Härteniveaus nachgewiesen werden. Im Gegensatz zur alleinigen Bewertung des Gefährdungspotenzials mit Hilfe der Verspannungsprüfung ist mit Hinzunahme einer ergänzenden H-Analytik eine direkte und feinere Differenzierbarkeit des Gefährdungspotenzials möglich. Diese ist speziell bei der Optimierung galvanischer Beschichtungsprozesse in Bezug auf eine verringerte H-Absorption von Bedeutung.

Die Ergebnisse der H-Analysen an beschichteten Proben aus den insgesamt vier ZnNi- bzw. Zn-Beschichtungsprozessen zeigen, dass bei dem verwendeten sauren Zn-Prozess im Vergleich zu den anderen drei ZnNi-Prozessen eine erhöhte Konzentration an Wasserstoff vom Substrat absorbiert wurde, wodurch der saure Zn-Prozess ein erhöhtes H-Gefährdungspotenzial darstellt, da die H-induzierte Schädigung im Grundwerkstoff stattfindet.

Ebenso wurden Zusammenhänge mit der Mikrostruktur der Überzüge festgestellt. Die H-Permeabilität der untersuchten ZnNi-Überzugstypen nahm dabei signifikant mit ansteigender Rissdichte innerhalb der Überzüge zu. Mit Hilfe der Silberdekorationsmethode wurde erstmalig visualisiert, dass die Rissnetzwerke der ZnNi-Überzüge bevorzugte H-Diffusionspfade darstellen. Je nach Rissdichte wiesen die mit ZnNi beschichteten Proben eine im Vergleich zu den Proben mit rissfreien Zn-Überzügen eine niedrigere oder höhere H-Permeabilität auf. Diese Ergebnisse zeigen, dass die in der DIN EN ISO 19598 angegebene Richtwerte für die Auslagerungsdauern bei ungefähr 200 °C nicht unbedingt für alle ZnNi-Systeme gelten müssen, da das H-Effusionsverhalten sehr stark von der Rissdichte abhängt.

Neben einem Screening technischer ZnNi- und Zn-Überzüge aus Lohngalvaniken wurde in der Technikumsgalvanik des IST Braunschweig ein gezieltes Design of Experiment zur Untersuchung des Einflusses der Beschichtungsparameter und der Konstitution der Betriebsstoffe auf die Wasserstoffabsorption für den alkalischen ZnNi-Prozess durchgeführt. Der Versuchsplan enthielt 33 Versuchsvariationen und insgesamt 37 Versuche. Die Auswertung der Schichtdicken auf den Ringen gestaltete sich schwierig, da die Ringe dazu neigten, zu verkleben oder sich ineinander zu verzahnen. Hieraus ergaben sich starke Schwankungen für die Schichtverteilung auf den Ringen. Über die Auswertung der Massenänderung des Schüttguts (Metallkugeln) pro Zeit, welche sehr gut mit der Massenänderung der Ringe pro Zeit korrelierte, konnten im ersten Schritt relevante Einflussfaktoren für die Abscheiderate ermittelt werden. Es

zeigte sich, dass eine hohe Zn- und gleichzeitig eine niedrige Ni-Konzentration, sowie eine hohe Temperatur und Stromstärke die Schichtabscheiderate bzw. den Wirkungsgrad des Prozesses maßgeblich positiv beeinflussen.

Weitergehend zeigte die Auswertung der Wasserstoffanalytik, dass eine niedrige Abscheiderate bzw. ein niedriger Wirkungsgrad zu einer hohen H-Konzentration, insbesondere für die effusible H-Konzentration, aufgrund eines erhöhten H-Angebots an der Bauteiloberfläche führen. Niedrige Abscheideraten waren immer auch mit hohen Ni-Konzentrationen im Elektrolyten verbunden. Eine hohe Ni-Konzentration im Elektrolyten führte wiederum zu einem hohen Ni-Anteil (hohe Barrierewirkung gegenüber Wasserstoff) in der Schicht. Mikroskopiebilder der Schichtoberfläche zeigten zudem eine deutlich glattere und kompaktere Schicht im Vergleich mit Proben, die mit einer hohen Abscheiderate hergestellt wurden. Es kann daher vermutet werden, dass der Wasserstoff dort geringer zur Effusion angeregt werden konnte.

Die Betrachtung des Rissbildes an zwei Proben mit hohem und an zwei Proben mit niedriger H-Konzentration zeigte jedoch kaum Unterschiede. Hierbei muss angemerkt werden, dass sich die Rissbildung ggf. auch noch während der Nachbehandlung (Passivierung) und anschließenden Wärmebehandlung, welche an diesen Proben nicht durchgeführt wurden, verstärkt hätte.

Fazit des Projektes ist, dass die wesentlichen Ziele des Projektes erreicht werden konnten. Anhand der Untersuchungen kann eine Bewertung des unterschiedlichen Wasserstoff-Aufnahme- und Effusionsverhaltens galvanisch beschichteter hochfester Stähle in Abhängigkeit der Prozessführung, der Betriebsstoffe und der Mikrostrukturen der abgeschiedenen Schichten durchgeführt werden. Mit Hilfe des DoE konnten zudem wesentliche Einflussgrößen der Schichtabscheidung und des Wasserstoffeintrags ermittelt werden. Des Weiteren erlaubt die DoE-Software auch die Ermittlung geeigneter Prozessfenster mit reduziertem H-Eintrag, hohem Wirkungsgrad und einem Ni-Anteil zwischen 9 -15 % in der Schicht, welcher einen guten Korrosionsschutz gewährleistet. Jedoch muss bedacht werden, dass trotz des großen Versuchsumfangs keine vollständige Beschreibung des Modells realisiert werden konnte. Dementsprechend traten auch Zweifaktor-Wechselwirkungen auf, die z.T. nicht eindeutig zugeordnet werden können, so dass an dieser Stelle immer eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt.

Eine tabellarische Gegenüberstellung der einzelnen im Antrag genannten Teilziele des Projekts und der im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse enthält **Tabelle 1**.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ziele und der im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse

Zielstellung	Ergebnisse
Systematische Analyse der prozessbedingten Einflüsse auf die Wasserstoffaufnahme, insbesondere die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Beschichtungsparametern – verwendeter Betriebsstoffe – Zustand der Betriebsstoffe – Wasserstoffeintrag	Die systematische Analyse ist in Form eines DoE mit 33 Parametervariationen (Untersuchung von 8 Einflussfaktoren, die mit dem PbA vorab abgestimmt wurden: Stromstärke bzw. Stromdichte, Temperatur, Trommeldrehzahl, Zn-, Ni, OH-, Ganzbildner- und Komplexbildnerkonz.) erfolgt. Der Zustand der Betriebsstoffe wurde nicht variiert, jedoch wurde ein eingefahrener Elektrolyt aus der Industrie eingesetzt.
Entwicklung eines Verständnisses zu den Auswirkungen der Vorbehandlungs- und der Beschichtungsparameter auf die Wasserstoffaufnahme beim galvanischen Beschichten	Die Untersuchungen zeigten, dass der H-Eintrag während der Vorbehandlung vernachlässigbar klein war. Daher wurde für die systematische Analyse die Vorbehandlung immer gleich gelassen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass durch Abtragung der Schicht bei Passivierung die H-Konzentration sinkt.
Verständnis der mikrostrukturellen Einflüsse, insbesondere im Bereich der galvanischen Schicht, auf das Wasserstoff-Effusionsverhalten	Das H-Effusionsverhalten der untersuchten Überzugstypen nimmt signifikant mit ansteigender Rissdichte innerhalb der Überzüge zu. Demnach beeinflusst nicht nur die prozessbedingte H-Absorption im Gesamtsystem von galvanischem Überzug und Grundwerkstoff das H-Gefährdungspotenzial, sondern insbesondere auch die Mikrostruktur der erzeugten Schichten.
Weiterentwicklung der in IGF 17815/N entwickelten Prüfmethode für Verspannversuche, insbesondere hinsichtlich der Identifikation geeigneter Vergütungszustände für C-Ringtypen speziell zur Prozesskontrolle von galvanischen Beschichtungsprozessen bezüglich hochfester Stähle	Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus IGF 17815/N sowie der hier erzielten Ergebnisse erfüllen die C-Ringtypen der Anfälligkeitsstufen II und III die Voraussetzungen für eine Prozesskontrolle galvanischer Überzüge. Für Verbindungselemente bis zur Festigkeitsklasse 12.9 liegt mit der Anfälligkeitsstufe II ein ausreichend scharfer Werkstoffzustand für eine Prozesskontrolle vor. Zur Prozesskontrolle höherfester Werkstoffe bietet die Anfälligkeitsstufe III eine ausreichende Empfindlichkeit. Tastversuche in Zusammenarbeit mit dem C-Ring-Hersteller haben gezeigt, dass eine reproduzierbare Einstellung einer Anfälligkeit zwischen den Stufen II und III nicht ausreichend reproduzierbar erfolgen kann. Da der Hersteller den Vertrieb eingestellt hat, konnten keine weitergehenden Untersuchungen durchgeführt werden.
Ableitung kritischer Zustände (z.B. Stromdichte, pH-Wert, Badalter, Temperatur und Zusätze) der Betriebsstoffe und der Beschichtungsparameter auf Basis von H-Analysen und elektrochemischer Untersuchungen bezüglich der H-Aufnahme und des Korrosionsverhaltens	Es konnten die relevanten Einflussfaktoren (sowie ihre gegenseitige Wechselwirkung) für den Wasserstoffeintrag ermittelt werden. Anhand des DoE-Modells ist eine Ableitung kritischer Zustände möglich bzw. die Ermittlung optimaler Prozessbedingungen für einen geringen H-Eintrag, einen hohen Wirkungsgrad und Ni-Anteilen von 9 – 15 % in der Schicht möglich. Die Überprüfung der Korrosionseigenschaften ist nicht erfolgt, da Probenanzahl nicht ausreichend. Die für die H-Analytik benötigte Probenanzahl deckte sich mit der max. Probenproduktion pro Variation.

5. Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit

Aufgrund des zunehmenden Bedarfs an hoch- und höchstfesten Stählen kommt dem Verständnis und der Bewertung des unterschiedlichen Wasserstoff-Aufnahme- und Effusionsverhaltens während bzw. nach dem galvanischen Beschichtungsprozess eine besondere Bedeutung zu.

Der fehlende Wissensstand um die Zusammenhänge zwischen dem galvanischen Beschichtungsprozess, den Prozessparametern, dem Zustand der verwendeten Betriebsstoffe sowie der resultierenden Schichtmikrostrukturen auf die Qualität galvanischer Korrosionsschutzüberzüge, und hier insbesondere hinsichtlich des fertigungsbedingten H-Gefährdungspotenzials, stellt heute ein Hemmnis bezüglich des Einsatzes und der Erweiterung der Anwendungsbereiche moderner galvanischer Schichten, z.B. ZnNi, für hochfeste Stahlteile dar.

Mittels der angestrebten Projektergebnisse können Beschichtungsbetriebe ihre Prozesse und die Einflussparameter besser verstehen, die Beschichtungsparameter sowie die nachgeschaltete Wärmebehandlung gezielt optimieren und so die Wirtschaftlichkeit und die Wettbewerbsfähigkeit verbessern.

Das Projekt birgt folgenden Nutzen:

- Vertieftes Wissen zum Abscheideverhalten galvanischer Bäder (hier insbesondere galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel (g-Zn und g-ZnNi)) und zu den Auswirkungen auf das Wasserstoffaufnahme- und das schichtspezifische Effusionsverhalten
- Ableitung von prozesstechnischen Maßnahmen, um das fertigungsbedingte Wasserstoff-Gefährdungspotenzial zu verringern
- Kosten, Energie- und Zeiteinsparungen bei der thermischen Nachbehandlung
- Weiterentwicklung der Prozesse und Betriebsstoffe
- Sicherstellung der Bauteilsicherheit gegenüber fertigungsbedingter „Wasserstoffversprödung“
- Verbesserung der Prüfmethodik für die Prozesskontrolle und -freigabe
- Vertrauensgewinn bei den Kunden durch die Kenntnis und Beherrschung der Problematik der fertigungsbedingten „Wasserstoffversprödung“
- Vertrauensgewinn bei den Kunden durch verbesserte Beratung und optimierte Prozesse
- Verbesserung der Akzeptanz beim Einsatz hochfester, galvanisch beschichteter Bauteile

6. Umsetzung/Ergebnistransfer

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 in 2018 und 2019 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. Ebenso wurden die Ergebnisse auf Fachtagungen präsentiert.

7. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19759 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Es gilt ein großer Dank der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), dem Deutschen Schraubenverband e.V. (DSV), die das Forschungsprojekt finanziell gefördert und inhaltlich begleitet haben. Weiterhin ist allen Mitgliedsfirmen des projektbegleitenden Ausschusses zu danken, die sich mit Sach- und Dienstleistungen sowie konstruktiven Diskussionen maßgeblich am Forschungsprojekt beteiligt haben.

8. Literatur

-
- [1] Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland, Wirtschaftsvereinigung Stahl 2016, Düsseldorf
 - [2] Schirmer Galvanotechnik GmbH, „Zn-Ni-Beschichtungen, Informationsbroschüre 2013
 - [3] IGF 17815/N-1: „Entwicklung einer Methode zur Untersuchung und Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials moderner Korrosionsschutzsysteme für hochfeste Bauteile aus Stahl“ (Forschungsstelle MPA-Darmstadt), Abschlussbericht 2016