

Kurzbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 17816 N/1

Thema

Umgebungseinfluss auf den korrosionsbedingten Wasserstoffeintrag in hochfeste Stähle bei Anwendung von modernen Korrosionsschutzsystemen auf Zinkbasis

Berichtszeitraum

01.09.2013-31.08.2016

Forschungsvereinigung

AiF-Forschungsvereinigung

Forschungsstelle(n)

Nr. 1, Technische Universität Darmstadt / Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde

08.11.2016

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters der (bei einem gemeinsamen Bericht federführenden) Forschungsstelle



1. Problemstellung

Zur Unterstützung des Leichtbaus erwächst die Forderung nach einem verstärkten Einsatz hochfester Stähle. Stähle sind zudem nicht immer adäquat und gleichzeitig kostengünstig zu substituieren, wie bei der Anwendung für Schrauben oder Federn. Mit dieser Entwicklung wächst aber auch für hochfeste Stahlbauteile das Risiko, dass sie unter bestimmten Bedingungen durch wasserstoffinduzierte Rissbildung versagen.

Als entscheidendes Manko erweist sich hierbei, dass zur Einschätzung des Gefährdungspotenzials infolge einer betriebsbedingten Aufnahme des Wasserstoffs im mechanisch hoch beanspruchten Zustand die grundlegende Kenntnis über Prozessabläufe der Entstehung, Absorption und Verteilung von Wasserstoff während der Betriebsphase fehlt. Durch Klärung dieser Phänomene könnte der Anwendungsbereich von hochfesten Werkstoffen im Maschinenbau und Fahrzeugbau grundlegend erweitert werden.

2. Forschungsziele

Eine der Kernaufgaben dieses Forschungsvorhabens war es, unterschiedliche praxisrelevante hochfeste bainitische Grundwerkstoffe hinsichtlich deren Eigenschaften bezüglich Wasserstoffdurchtritt, korrosionsbedingtem Wasserstoffangebot, Wechselwirkung mit dem Grundwerkstoff und dem daraus resultierenden Wasserstoffgefährdungspotenzials zu charakterisieren. Darüber hinaus wurde der Einfluss von Überzugssystemen auf Zinkbasis auf das resultierende Gefährdungspotenzial in Abhängigkeit des darunter liegenden Grundwerkstoffs beurteilt.

3. Vorgehensweise / Durchgeführte Untersuchungen

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Proben wurden seitens des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt. Die Proben wurden aus den für hochfeste Verbindungselemente gängigen Vergütungsstahlsorten gefertigt, Tabelle 1.

Tabelle 1: Tabelle Grundwerkstoff – Materialzusammensetzung

Werkstoff	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Mikrolegierungselemente
A (32CrB4)	0,355	0,822	1,12			-
B	0,42	0,7	1,0	0,2		-
C	0,37	0,5	1,0	0,7		+

Vor Versuchsbeginn wurde das Kraft-Verformungs-Verhalten des angelieferten Probenmaterials untersucht und mit den im Projektantrag festgelegten Vorgaben verglichen. Dazu wurden Zugversuche an taillierten sowie an gekerbten Proben durchgeführt. Die ermittelten Festigkeitswerte können der Tabelle 2 entnommen werden. Als Vergleich dazu sind in der Tabelle auch die Festigkeitswerte des im Vorgängerprojekt untersuchten Werkstoffs 1.7076 (32CrB4) angegeben.

Tabelle 2: Festigkeitswerte des Probenmaterials

Werkstoff/Festigkeitsklasse	Werkstoff (1.7076) A 12.9	Werkstoff B 14.8	Werkstoff B 16.8
$R_{p0,2}$ [MPa]	1221	1301	1455
R_m [MPa]	1339	1487	1673
R_{mk} [MPa]	1854	2083	2321
R_{mk}/R_m	1,39	1,4	1,39

3.1 Erfassung von korrosionsbedingtem Wasserstoff unter praxisrelevanten Bedingungen

Um die verschiedenen Korrosionssysteme (Werkstoff + Korrosionsumgebung) hinsichtlich ihres Wasserstoffangebotes zu quantifizieren, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens elektrochemische Messungen des Polarisationswiderstands durchgeführt. Als Probenkörper wurden die aus dem Grundwerkstoff B und C gefertigten runden Zugproben mit eingerollter Kerbe verwendet. Alle Messungen wurden in einer speziell konstruierten elektrochemischen Messzelle mit Drei-Elektroden-Anordnung ausgeführt.

Neben der Information über das Wasserstoffangebot, das sich je nach Werkstoff und Korrosionsumgebung unterscheidet, ist die Wasserstoffeintrittsrate von besonderem Interesse. Diese für jedes Korrosionssystem charakteristische Größe kann als Verhältnis des angebotenen zum tatsächlich im Probenkörper vorhandenen Wasserstoff ermittelt werden. Zur Erzeugung von korrosionsbedingtem Wasserstoff wurden die Probenoberflächen zum einen im neutralen Salzsprühnebeltest und zum anderen unter kontinuierlicher Elektrolytzufuhr (Immersion) korrosiv beaufschlagt. Für die Immersion wurden die Proben einzeln in eine Kammer eingebaut, die in einen Kreislauf mit Elektrolytreservoir (1000 ml 5% NaCl-Lösung) und einer Pumpe (200 ml/min) eingeschlossen wurde. Die Betriebstemperatur im neutralen Salzsprühnebeltest beträgt 35°C. Korrosionsbeanspruchung im Immersionstest erfolgte bei Raumtemperatur. Somit wurde eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnissen mit den Ergebnissen aus anderen Arbeitspaketen angestrebt. Die Beanspruchungsdauer beträgt jeweils 30 Stunden.

Es wurde festgestellt, dass die Korrosionsprodukte einen Beitrag zu gemessenen Wasserstoffsignal leisten und somit die Messergebnisse verfälschen. Zur Abschätzung des Wasserstoffeintrags in Abhängigkeit einer mechanischen Beanspruchung bedarf es einer alternativen Herangehensweise. Eine mögliche Alternative zur Korrosionsbelastung stellt die kathodische Wasserstoffbeladung bei den Stromdichten dar, die den ermittelten Korrosionsstromwerten in anwendungsnahem Medium gleichen. Die Beladungsversuche erfolgten in der gleichen elektrochemischen Zelle beschrieben wurde. Auch hier wurde lediglich ein definierter Abschnitt der Probe im Schaftbereich mit eingerollter Kerbe der Beladung ausgesetzt. Als Beladungsmedium wurde 0.1 M/l Natronlauge-Lösung (NaOH) gewählt, sodass mit keiner Entstehung von Korrosionsprodukten auf der Probenoberfläche zu rechnen ist.

3.2 Qualitative und quantitative Beurteilung von Wasserstoffverteilungsprofilen in Abhängigkeit der Zugbelastung

Der Einfluss des Belastungszustandes auf die Wasserstoffverteilung im Probenkörper wurde durch Wasserstoffvisualisierung mittels Silberdekorationsmethode näher untersucht. Die Methode beruht auf der Reaktion zwischen Silberionen in einer wässrigen Kaliumdicyanoargentat-Lösung und den aus der Probe austretenden Wasserstoffatomen (1).



Für die detaillierte Methodenbeschreibung ist auf [1] zu verwiesen. Die Untersuchungen zum Einfluss des Spannungsgradienten auf das Wasserstoffverteilungsprofil in der Probe wurde an den Proben aus Werkstoff B Festigkeitsklasse 16.8 ausgeführt. Das Experiment beruht auf der Abhängigkeit des Stoffflusses vom Konzentrations- und Zugspannungsgradient, die von Vergara et. al. [2] in Form von Gleichung (2) formuliert wurde.

$$J = -D \cdot \nabla C + D \cdot \frac{V_H}{R \cdot T} \cdot C \cdot \nabla \sigma, \quad (2)$$

Hierbei stehen D für Diffusionskoeffizient, C-Wasserstoffkonzentration, V_H – partielles molares Volumen vom Wasserstoff im Metall, R-universale Gaskonstante, T-Temperatur und σ - für die im Bauteil herrschende Belastung.

3.3 Bewertung des Wasserstoffgefährdungspotenzials mittels Laststeigerungsversuchen

Das korrosionsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial des Grundwerkstoffs mit verschiedenartigen Zinküberzugsystemen unter definierten korrosiven Bedingungen wurde mittels diskontinuierlicher Laststeigerungsversuche (in Anlehnung an ASTM F 1624-12) untersucht. Die Grundlage zur Beurteilung der generellen Grundwerkstoffanfälligkeit gegenüber Wasserstoffversprödung bilden Laststeigerungsversuche an Luft. Als Vergleich dazu dienen die unter Korrosionsbeanspruchung ermittelten Grenzbelastungen. Somit wird der Einfluss des im Korrosionsprozess gebildeten Wasserstoffs auf die Herabsetzung der maximal ertragbaren Last sichtbar gemacht. Zur Belastungsuntersuchung unter Medieneinfluss wird eine 5 %ige Natriumchloridlösung (NaCl-Lösung) verwendet, die durch die Zugabe von Salzsäure (HCl) auf einen pH-Wert von 3 angesäuert wurde. Für die Medienbeaufschlagung wird eine speziell hierfür konstruierte Vorrichtung verwendet. Die dem Medium zugängliche definierte Prüffläche von 2,23 cm² befindet sich hierbei innerhalb dieser Elektrolytkammer.

4. Forschungsergebnisse

4.1 Erfassung von korrosionsbedingtem Wasserstoff unter praxisrelevanten Bedingungen

Messungen des Polarisationswiderstands an unbeschichteten Proben zur Abschätzung des korrosionsbedingten Wasserstoffangebotes

Um die korrosiven Umgebungen hinsichtlich eines möglichen Wasserstoffangebotes zu beurteilen, wurden elektrochemische Messungen des Polarisationswiderstands durchgeführt. Für die Messungen wurden unbeschichtete Proben der Werkstoffvarianten B und C beider Festigkeitsklassen (14.8 und 16.8) in eine elektrochemische Zelle eingebaut. Bei den Untersuchungen wurden Elektrolyte mit niedriger Konzentration an Chloridionen und unterschiedlichen pH-Werten als anwendungsnahe Lösungen verwendet. Zusätzlich wurde eine Variation der Sauerstoffkonzentration zur Abbildung der praxisnahen Bedingungen (Spalte) vorgenommen. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass sowohl die Werkstoffzusammensetzung, als auch der pH-Wert des Korrosionselektrolyten einen Einfluss auf das herrschende

Wasserstoffangebot an der Probenoberfläche ausüben. Daneben haben Untersuchungen verdeutlicht, dass das Wasserstoffangebot mit sinkendem pH-Wert zunimmt.

Wasserstoffgehaltsmessungen an korrodierten Proben

Eine Bewertung verschiedener Umgebungszustände erfolgte auf Basis der Wasserstoffgehaltsmessungen mittels Heißgasextraktionsverfahren. Aufgrund der auf der Probenoberfläche anhaftenden Korrosionsprodukte wurden die Analysemessungen durch darin vorhandenen Wasserstoff verfälscht. Die gemessenen Wasserstoffgehalte scheinen unrealistisch groß und weisen eine sehr große Streuung auf. Ein zur Entfernung der Korrosionsprodukte vorgenommener inhibierter Beizprozess führte jedoch zu einem unerwünschten Materialabtrag und somit zu einem sehr wahrscheinlichen Verlust von oberflächennahem Wasserstoff. Somit erwies sich die Methode des Heißgasextraktionsverfahrens für die Wasserstoffanalysemessungen an korrodierten Proben als ungeeignet.

Abschätzung des Wasserstoffeintrags in Abhängigkeit der Zugbelastung

Mit dem Ziel der Bestimmung der wirksamen Wasserstoffkonzentration, wurden Wasserstoffanalysemessungen an auf Zug belasteten Proben bei überlagerter kathodischer Wasserstoffbeladung vorgenommen. Drei unterschiedliche Belastungsprofile wurden ausgewählt: konstante Zugbelastung bei jeweils 55 und 75 % der Kerbzugfestigkeit an Luft und eine lineare Lasterhöhung bis 55% der Kerbzugfestigkeit bei einer konstanten Versuchsdauer von 5 Stunden. Sowohl diffusionsfähiger als auch tief getrappter Wasserstoff war im Fokus dieser Untersuchung. Es konnte gezeigt werden, dass die Konzentrationswerte des diffusionsfähigen und getrappten Wasserstoffs bei allen Proben relativ ähnlich sind, wobei die bei höherer Last getesteten Proben einen leicht höheren Betrag an diffusionsfähigem Wasserstoff aufweisen. Durch einen Vergleichsversuch wurde festgestellt, dass selbst die kleine Konzentration an diffusionsfähigem Wasserstoff bei einer kontinuierlich steigenden Zugbelastung (kontinuierliche lineare Laststeigerung) zu einem Sprödbruch führen kann. Dieses Erkenntnis ist in guter Übereinstimmung mit Hinweisen aus der Literatur, wonach bei einer kontinuierlich steigenden Zugbelastung unter überlagerter Wasserstoffbeladung Sprödbrüche bereits bei Beladungsstromdichtungen unterhalb 1 mA/cm² beobachtet wurden.

4.2 Qualitative und quantitative Beurteilung von Wasserstoffverteilungsprofilen in Abhängigkeit der Zugbelastung

Zur Bewertung des korrosionsbedingten Gefährdungspotenzials sind Kenntnisse über die Verteilung vom absorbierten Wasserstoff im Probenkörper von besonderer Bedeutung. Um die lastabhängigen Wasserstoffverteilungsprofile zu ermitteln, die je nach Belastungsprofil in dem Probenkörper entstehen, wurden Wasserstoffvisualisierungsversuche mittels Silberdekorationsmethode durchgeführt. Dabei erfolgte eine Visualisierung von diffusionsfähigem Wasserstoff auf der Probenoberfläche. Durch eine integrale energiedispersive Röntgenspektroskopie-Analyse konnte eine quantitative Beurteilung der Wasserstoffverteilungsprofile vorgenommen werden. Im Rahmen der Methodvalidierung wurde anhand der Messungen an unbelasteten Proben der Wasserstoffdiffusionskoeffizient ermittelt. Mit einem Wert von ca. $3,5 \cdot 10^{-7}$ cm²/s liegt der Diffusionskoeffizient in einem für die Stahlwerkstoffe plausiblen Bereich. Es wurde bewiesen, dass bei gewählter Probengeometrie mit dem Kerbfaktor von 3,4 unter angelegter Zugspannung die Bereiche mit maximaler Spannung für die Wasserstoffdiffusion energetisch vorteilhaft sind. Dabei kann sich die

Wasserstoffgeschwindigkeit in die Richtung des Spannungsgradienten je nach Belastungsniveau bis zu 100% erhöhen.

4.3 Bewertung des Wasserstoffgefährdungspotenzials mittels Laststeigerungsversuchen

Die Bewertung des Gefährdungspotenzials unterschiedlicher Schichtsysteme erfolgte mittels diskontinuierlicher Laststeigerungsversuche. Zu Beginn wurden Proben aus den Werkstoffvarianten B und C zur Beurteilung der Grundwerkstoffanfälligkeit gegenüber Wasserstoffversprödung untersucht. Durch Variation der Festigkeitsklassen (14.8 und 16.8) konnte der Festigkeitseinfluss auf die Werkstoffsensibilisierung gegenüber Wasserstoffversprödung überprüft werden. Es wurde nachgewiesen, dass die bainitischen Proben mit Festigkeitsklasse 14.8 beider Werkstoffvarianten (B und C) unter den gewählten Versuchsbedingungen vergleichbare Gefährdungspotenzialwerte zu denen im Vorgängerprojekt untersuchten Proben aus martensitischem Werkstoff 32CrB4 Festigkeitsklasse 12.9 aufweisen. Ein ähnliches Verhalten wurde bei den Proben aus Werkstoffvariante C Festigkeitsklasse 16.8 beobachtet. Bei der Werkstoffvariante B wurde jedoch eine festigkeitsbedingte Herabsetzung der Werkstoffanfälligkeit gegenüber betriebsbedingter Wasserstoffversprödung erkannt. Außerdem wurde bei diesen Proben eine erhöhte Sensibilität hinsichtlich fertigungsbedingter Oberflächenfehler beobachtet. Darüber hinaus wurde das Verhalten unterschiedlicher Überzugssysteme unter Korrosionsbeanspruchung anhand ermittelter Schwellwerte beurteilt. Bei den Proben aus Werkstoff B mit Festigkeitsklasse 14.8 zeigten die Schichtsysteme bis auf gZn keinen signifikanten Einfluss auf das Gefährdungspotenzial. Die im Zusammenhang mit gZn-Überzugssystem beobachtete Verringerung der maximal ertragbaren Zugbelastung kann der fertigungsbedingten Wasserstoffversprödung zugeordnet werden. Dieser Befund ist auch für die Proben der Festigkeitsklasse 16.8 gültig. Aufgebracht auf festeren Grundwerkstoff (16.8) wiesen die Überzugssysteme gZnNi und ZnL ein unterschiedliches Verhalten auf. Das gZnNi-Überzugssystem verringerte die Werkstoffanfälligkeit gegenüber Wasserstoffversprödung. Im Gegensatz dazu konnte der Einfluss des ZnL-Überzugs nicht eindeutig beurteilt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die wichtigsten Wechselwirkungen zwischen Überzug und dem darunter liegenden Werkstoffzustand erfasst und für die einzelnen Systeme charakterisiert wurden. Darüber hinaus konnte mit Laststeigerungsversuchen nachgewiesen werden, dass die Überzugssysteme das korrosionsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial des Gesamtsystems je nach Festigkeitsklasse des Grundwerkstoffs unterschiedlich beeinflussen.

5. Voraussichtliche Nutzung bzw. beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse

Der projektbegleitende Ausschuss (PA) setzt sich aus Mitgliedern des „Arbeitskreises Gemeinschaftsforschung“ zusammen und gehört mit ihren überwiegend kleinen und mittelständischen Betrieben dem Deutschen Schraubenverband e.V. an. Es wird erwartet, dass die gewonnenen Ergebnisse der deutschen Schraubenindustrie Wettbewerbsvorteile verschaffen. Darüber hinaus profitieren auch alle anderen Hersteller hochfester Bauteile aus Stahl von den erzielten Ergebnissen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind hauptsächlich für die Fachgebiete Rohstoffe, Werkstoffe, Materialien und Konstruktion und zudem eingeschränkt für das Fachgebiet Chemie von Nutzen. Sie können von KMU in den Wirtschaftszweigen 34/35 (Fahrzeugbau) und 29 (Maschinenbau) sowie 27/28 (Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen) umgesetzt bzw. genutzt werden.

Durch die enge Zusammenarbeit der Mitgliedsfirmen des Deutschen Schraubenverbandes mit dem Verband der Automobilindustrie (VDA) sind in der Vergangenheit auch in anderen Branchen

als Referenz dienende, gerade für KMU gut umzusetzende Richtlinien entstanden. Hierzu sei beispielsweise das VDA-Prüfblatt 235-102 genannt, welches zur Auswahl verschiedener Cr(VI)-freier Überzugssysteme in Abhängigkeit der wirkenden Korrosionsbeanspruchung herangezogen werden kann. Aufgrund der Mitarbeit der Forschungsstelle in zahlreichen regelsetzenden Gremien (z. B. DIN, DAST, VDA, VDEH usw.) ist darüber hinaus gewährleistet, dass die Ergebnisse in den entsprechenden Regelwerken Eingang finden (z. B. aktuelle Erweiterung der DIN 50969-3) und damit den KMU als leicht einzusetzende Werkzeuge der Qualitätssteigerung und -sicherung dienen.

6. Praktischer Nutzen / Wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse für KMUs

Dem Leichtbau durch konsequente Nutzung hochfester Werkstoffzustände wird national wie auch international eine enorme Bedeutung bei der Reduktion des Kohlendioxidausstoßes durch den Verkehr beigemessen. Ausgelöst wurde diese Dynamik durch die aktuellen Forschungserkenntnisse bezüglich der Ursachen für eine Klimaerwärmung durch die Verbrennung fossiler Energieträger, insbesondere auf Erdölbasis, bei gleichzeitiger Verknappung bzw. steigendem Bedarf dieser Energieträger auf dem Weltmarkt. Zur Ressourcenschonung gewinnt die Leichtbauthematik in vielen technischen Bereichen stetig an Bedeutung. Neben dem Einsatz von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium und Magnesium spielt der Einsatz von hoch- und höchstfesten Stählen eine zunehmend wichtigere Rolle.

Der sichere Einsatz und Umgang mit hochfesten Bauteilen aus Stahl stellt sich demzufolge auch global als Zukunftstechnologie dar. Lösungen der damit verbundenen Herausforderungen, z.B. durch eine Produktentwicklung funktionsbestimmender Systeme in Maschinen und Fahrzeugbau auf Basis einer qualifizierten Werkstoffauswahl und Verarbeitung tragen unmittelbar zur Stärkung des Standortes Deutschland bei. Deutsche Maschinen-, Fahrzeug- und Anlagenbauer aus dem KMU-Bereich sind weltweit tätig und unterliegen dem Zwang, ihre Produkte weltweit zu vermarkten. Das Beherrschen der Problemstellung einer betriebsbedingten wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion ist in diesem globalen Umfeld sowohl eine Herausforderung aber auch eine Chance zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit deutscher Industrieunternehmen.

Den vorrangig dem Sektor der KMU zuzuordnenden Unternehmen in der Schrauben herstellenden Industrie als auch den Beschichtern kommen die gewonnenen Erkenntnisse zur Untersuchung eines betriebsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials von hochfesten Stahlwerkstoffen und Korrosionsschutzsystemen auf Zinkbasis unmittelbar zu Gute.

Hier können die Erkenntnisse der Forschung zu einer zielgerichteten Vorausbildung im Rahmen einer Produktentwicklung und zu einer Schadensverhütung beitragen. Hieraus ergibt sich zudem ein ausgeprägter volkswirtschaftlicher Nutzen.

Die Projektergebnisse werden aber insbesondere dem Mittelstand (z.B. Zulieferer der Automobil- und Luftfahrtindustrie usw.) zugutekommen, der diese enorme und komplexe Aufgabe nur durch die industrielle Gemeinschaftsforschung meistern kann. Darüber hinaus leisten die Projektergebnisse durch Auswahl eines geeigneten Überzugssystem einen wichtigen ökologischen Beitrag durch Ressourcenschonung, z.B. auch durch Substitution hochlegierter Stähle durch ausreichend beständige beschichtete Bauteile aus hochfesten Vergütungsstählen bei mäßiger Korrosionsbeanspruchung, z.B. auch im Bauwesen.

7. Umsetzung / Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Das Forschungsvorhaben wurde während der kompletten Projektdauer durch den dazugehörigen projektbegleitenden Ausschuss (PA) betreut. Der kontinuierliche Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurde durch regelmäßig stattfindende Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses gewährleistet. Die darin vertretenden Firmen wurden im Rahmen dieser Sitzungen über die aktuellen Forschungsergebnisse informiert. Zusätzlich zu den Sitzungen des PA wurden die Mitglieder des "Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung" des Deutschen Schraubenverbandes e.V. fortlaufend über die anfallenden Ergebnisse informiert. In den zweimal jährlich stattfindenden Sitzungen des "Arbeitskreises Gemeinschaftsforschung" wurden die darin teilnehmenden Firmen durch eine Präsentation über die aktuellen Forschungsergebnisse informiert. Durch eine rege Diskussion der angefallenen Ergebnisse wurde so ein enger Praxisbezug gewährleistet.

Des Weiteren präsentierte die Forschungsstelle die Ergebnisse der Arbeit im Rahmen einer Sitzung NA 062-01-76-AA „Chemische und elektrochemische Überzüge“ im DIN, Berlin. Darüber hinaus wurden ausgewählte Untersuchungsergebnisse auf der 45. Jahrestagung der Gesellschaft für Umweltsimulation e.V. in Karlsruhe einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Zudem ist ein Beitrag in einer ausgewählten Fachzeitschrift im Laufe des Jahres 2017 geplant, z. B. in *Materialwissenschaft & Werkstofftechnik*, *Materials Testing* oder *Materials & Corrosion*.

Zusätzlich werden die Erkenntnisse über den Lehrstuhl Werkstoffkunde (IfW) an der Technischen Universität Darmstadt TUD in die akademische Lehre übernommen. Darüber hinaus werden diese Erkenntnisse durch bilaterale Projekte und durch Information und Beratung an der mit dem Institut für Werkstoffkunde eine Betriebseinheit bildender Staatlicher Materialprüfungsanstalt Darmstadt der Industrie zugänglich gemacht. Hierbei ist anzumerken, dass viele Industrieprojekte, die an der MPA Darmstadt bearbeitet werden, aus dem KMU-Sektor stammen.

8. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17816 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken der FSV für die Möglichkeit zur Durchführung des Vorhabens sowie dem BMWi und der AiF für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis des Deutschen Schraubenverbandes unter Leitung von Herrn Dr. Beyer, Deutscher Schraubenverband, begleitet. Diesem Arbeitskreis gehört unser Dank für die große Unterstützung.

Der Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, aufgefördert werden.