

Matthias Oechsner, Holger Hoche

Technische Universität Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt und Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde Darmstadt

Susanne Friedrich, Steffen Six

Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, Dresden

Entwicklung einer Methode zur Haftfestigkeitsprüfung von Verbindungselementen mit Feuerverzinkungsüberzügen

Bericht Nr. 176

Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

2023



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse eines Forschungsprojektes der AiF-Forschungsvereinigung GAV dar. Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert; AiF-Forschungsvorhaben IGF 21160 BG.

1 Motivation

Die Feuerverzinkung von Schrauben bis zur Festigkeitsklasse 10.9 ist die Grundlage für einen wirtschaftlichen, nachhaltigen und zuverlässigen Korrosionsschutz von Verbindungselementen. Die Feuerverzinkung erfolgt mittels Normaltemperatur (NT)- und Hochtemperatur (HT)-Verzinkung, für die entsprechende Regelwerke existieren (z. B. DIN EN ISO 1461, DIN EN 14713, DAST Richtlinie 022). Darüber hinaus existieren speziell für feuerverzinkte Verbindungselemente weitere Regelwerke (GAV-DSV-Richtlinie für die Herstellung feuerverzinkter Schrauben, DIN EN 14399 und DIN EN ISO 10684).

Insbesondere die in DIN EN 14399 geforderten Eigenschaftenprofile stellen außerordentlich hohe Anforderungen an die Prozesssicherheit und die Qualität hochfester Schraubengarnituren mit Feuerverzinkungsüberzügen. Dies betrifft die mechanische Beanspruchung der Überzüge bei streckgrenzgesteuerter Montage, die Forderung nach präzise einzustellenden und wenig streuenden Vorspannkräften, genau einzustellende Reibungszahlspannen, die Einhaltung geometrischer Toleranzen und einen zuverlässigen Korrosionsschutz. Insbesondere durch abplatzende Teile der Zinküberzüge werden sowohl die planmäßige Vorspannung als auch der Korrosionsschutz der Verbindungselemente beeinträchtigt.

Daher kommt der Sicherstellung der Haftfestigkeit und den damit verbundenen Funktionseigenschaften von Feuerverzinkungsüberzügen bei den hohen Druck- und Scherbeanspruchungen bei hochfest vorgespannten Schraubenverbindungen bei der Montage und im Betrieb eine maßgebende Bedeutung zu.

Trotz Verbesserungen von Prozessabläufen und Umsetzung jüngster Forschungsergebnisse kommt es nach wie vor zu Schwankungen bei der Qualität der erzeugten Zinküberzüge. Hierbei üben Haftfestigkeitsprobleme den größten Einfluss aus. Offensichtliche, visuell wahrnehmbare Fehler können bereits während der Qualitätskontrolle vor der Auslieferung identifiziert werden. Häufiger machen sich Haftfestigkeitsprobleme des Zinküberzugs jedoch erst bei der Montage der Schraubengarnitur aufgrund der dort herrschenden Beanspruchungen bemerkbar. Neben Fehlverschraubungen ziehen diese meist auch Korrosionsprobleme nach sich, die mit nicht unerheblichen Kosten verbunden sein können. Interne Daten des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V. (GAV) und des Deutschen Schraubenverbands e.V. (DSV) belegen insbesondere bei der stetig zunehmenden industriellen Einsatztiefe hochfester feuerverzinkter Schraubengarnituren eine Zunahme von Haftfestigkeitsproblemen, die die zuvor beschriebene Problematik mehr und mehr in den Vordergrund rücken.

Die beiden Forschungseinrichtungen haben im abgeschlossenen Projekt IGF 18389BG Einflussfaktoren und Mechanismen bezüglich der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen auf hochfesten Verbindungselementen identifiziert [IGF18389, HOC18], wobei insbesondere die Qualitätsprobleme bei HT-Überzügen im Fokus standen. Die im Rahmen des Forschungsprojekts angewandten metallographischen und mechanischen Prüfmethoden zur Beurteilung der Haftfestigkeit sind aber für eine praxisgerechte Qualitätsprüfung in der Industrie aufgrund des Prüfaufwands und der Prüfdauer nicht praktikabel.

Aktuell existieren keine geeigneten genormten Prüfverfahren für eine praxisgerechte und zuverlässige Beurteilung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen und der damit verbundenen Funktionseigenschaften, insbesondere während der Beanspruchungen bei Montage und im Betrieb. Diese Tatsache ist gerade für Feuerverzinkungsunternehmen und Schraubenhersteller aus technischer und wirtschaftlicher Sicht problematisch, da diese keine Möglichkeiten für eine normgerechte Prüfung der Qualität ihrer Produkte und somit auch keine geeignete Methode zur Prozessüberwachung und -optimierung haben.

2. Forschungsziele

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer robusten, einfach handhabbaren und aussagekräftigen Methode zur Prüfung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen auf Verbindungselementen.

Zur Erreichung der Zielsetzung sind folgende Projektschwerpunkte vorgesehen:

- **Erstellung eines Lasten- / Pflichtenhefts** bzgl. der Haftfestigkeitsanforderungen an Feuerverzinkungsüberzügen unter Berücksichtigung der Beanspruchungen während Montage und Betrieb
- **Praxis-Screening existierender Methoden** zur Haftfestigkeitsprüfung von Beschichtungen und Zinküberzügen im Allgemeinen sowie in den Betrieben praktizierter proprietärer Methoden zur Haftungsprüfung für Feuerverzinkungsüberzüge
- (Weiter-) **Entwicklung praxisgeeigneter Prüfmethoden**, Umsetzung des Pflichtenhefts
- **Sicherstellung der praktischen Anwendbarkeit** bei Verbindungselementen (Schraube, Mutter, Scheibe) unterschiedlichster Abmessungen
- Eingang der entwickelten Methode in **Normen / Richtlinien**, z.B. ISO 10684

3. Vorgehensweise

Die Vorgehensweise ist in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zusammengefasst:

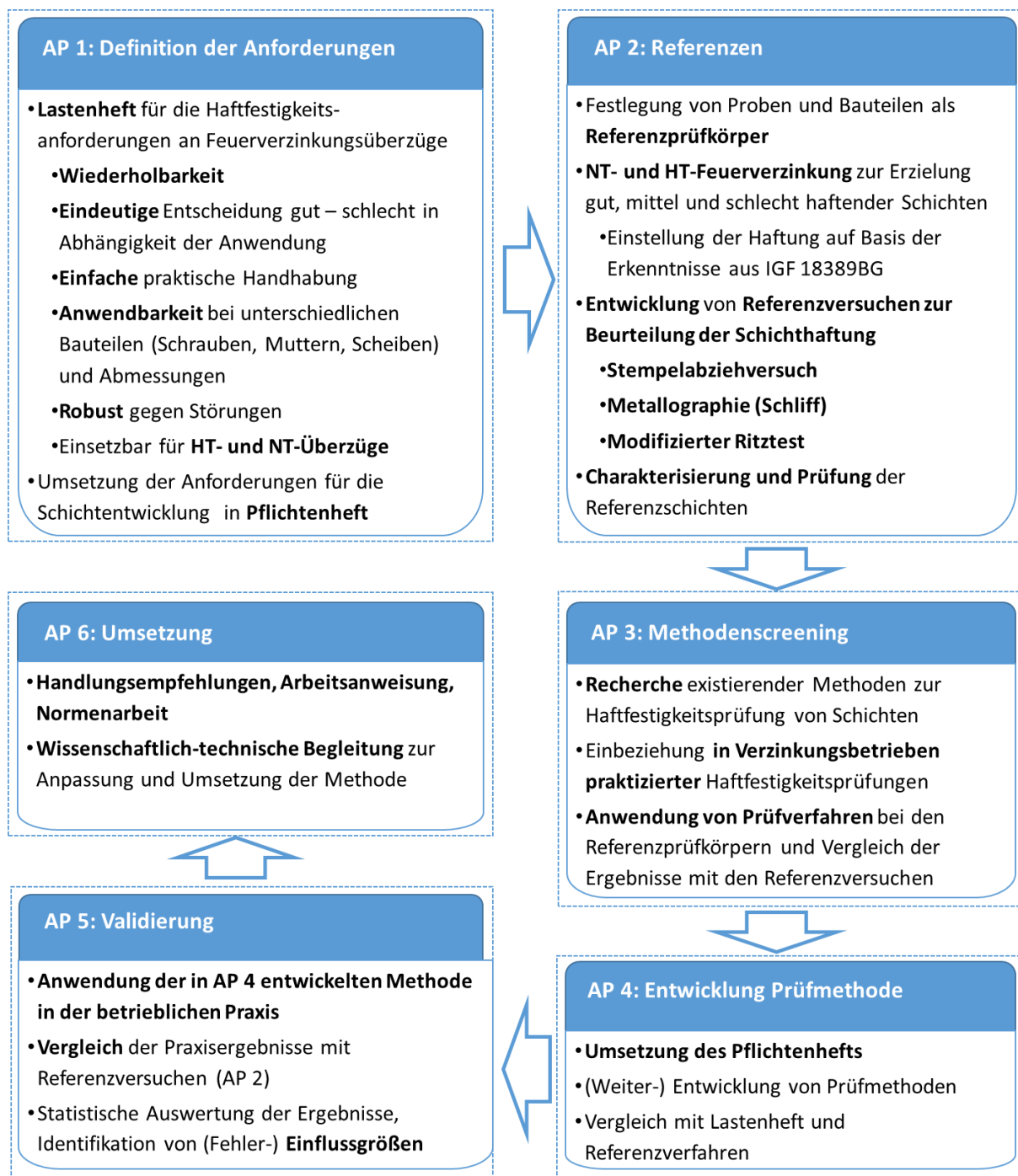


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Projektstruktur und der geplanten Arbeitspakete

4. Ergebnisse

Aktuell existieren keine geeigneten genormten Prüfverfahren für eine praxisgerechte und zuverlässige Beurteilung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen und der damit verbundenen Funktionseigenschaften, insbesondere während Montage und Betrieb.

In der betrieblichen Praxis gibt es heute außer einer Sichtkontrolle, mit der optisch bereits schlechte Verzinkungen identifiziert werden können, keine tragfähige Lösung zur Beurteilung der

Haftfestigkeit. Daher kommen Schichthaftungsprobleme durch die Beanspruchungen bei Transport, Handhabung oder Montage oft erst beim Schraubenhersteller oder beim Endkunden zum Vorschein. Diese Tatsache ist gerade für Feuerverzinkungsunternehmen und Schraubenhersteller aus technischer und wirtschaftlicher Sicht problematisch, weil diese keine Möglichkeiten für eine normgerechte Prüfung der Qualität ihrer Produkte und somit auch keine geeignete Methode zur Prozessüberwachung und -optimierung haben.

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer robusten, einfach handhabbaren und aussagekräftigen Methode zur Prüfung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen auf Verbindungselementen.

Als Grundlage der zu entwickelnden Methode wurde gemeinsam mit dem Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V., dem Deutschen Schraubenverband e.V. sowie den im Forschungsprojekt organisierten Unternehmen ein Lastenheft erarbeitet. Dabei wurden neben grundsätzlichen Anforderungen wie z. B. Robustheit, Handhabbarkeit, Anwendbarkeit, Aussagekraft und Wiederholbarkeit auch die industriellen Praxiserfahrungen bezüglich des Auftretens von Fehlern, Reklamationen und Ursachenforschung berücksichtigt.

Es wurde ein Praxis-Screening existierender Methoden zur Haftfestigkeitsprüfung von Beschichtungen und Zinküberzügen durchgeführt. Dies erfolgte unter Berücksichtigung des Lastenhefts sowie konstruktiver und wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Gemäß VDI 2225-3 wurden mit der Methode des Paarvergleichs entsprechende Gewichtungsfaktoren abgeleitet. Dabei zeigte sich der Ritztest, bei dem mit steigender Kraft ein Hartmetallstift über die Oberfläche gezogen wird, am vielversprechendsten. Die Anwendung des Prüfprinzips zeigte, dass anhand des makroskopischen Befundes Abplatzung / keine Abplatzung eine einfache Zuordnung zur Schichthaftung getroffen werden kann, welche anhand umfassender Untersuchungen an metallographischen Schliffen validiert wurde.

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Ritztests zur Anwendung an Feuerverzinkungsüberzügen wurde als Eindringkörper ein Flowdrill-Fließbohrer an einen vorhandenen Ritztester adaptiert. Für die verschiedenen Bauteile (Mutter, Schraube, Scheibe) wurden sowohl die Prüfkraftbereiche identifiziert als auch Einflüsse auf das Prüfergebnis in Form einer Schrägstellung der zu prüfenden Oberfläche untersucht. Bei allen geprüften Proben war anhand des makroskopischen Befundes eine eindeutige Unterscheidung zwischen gut und schlecht haftenden Zinküberzügen möglich.

Mit dem weiterentwickelten und validierten Prüfkonzepth sowie unter Berücksichtigung des Lastenhefts wurde ein Prototyp für eine mechanische Prüfeinrichtung konzipiert. Anforderung war insbesondere, dass die Prüfeinrichtung ortsunabhängig und im industriellen Umfeld einsetzbar sein soll. Dies umfasst eine einfache und fehlertolerante Handhabung, sodass auch fachfremdes Personal nach erfolgter Einweisung dazu in der Lage ist, diese zu bedienen. Weiterhin sollen Scheiben, Muttern und Schrauben in unterschiedlichen Abmessungen prüfbar sein. Mit diesen Randbedingungen wurde in Zusammenarbeit mit dem pbA die in Abbildung 2 dargestellte Prinzipskizze erstellt.

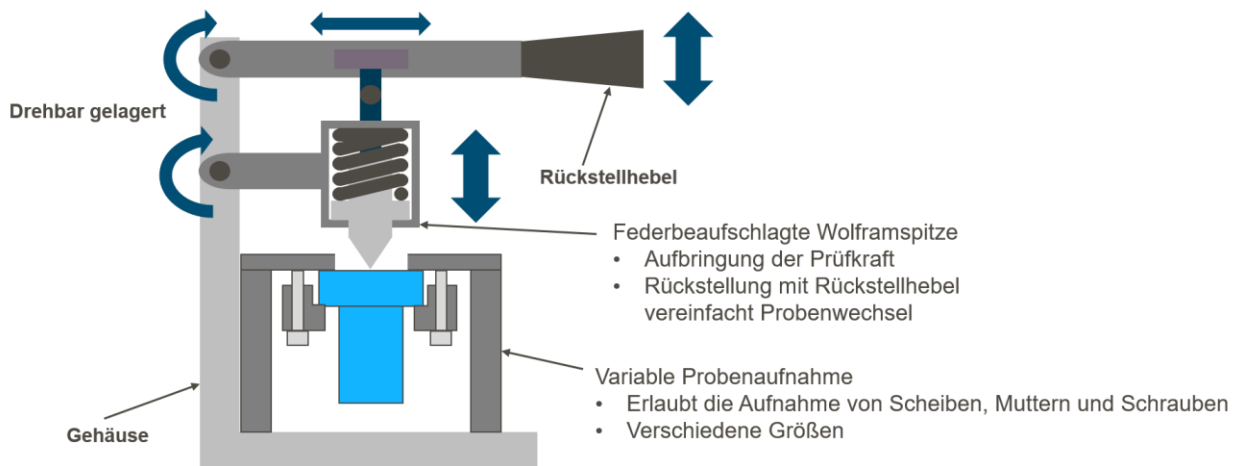


Abbildung 2: Prinzipskizze der mechanischen Prüfeinrichtung

Demnach soll die Kraftbeaufschlagung auf den Fließbohrer über eine Feder erfolgen. Der Hebel und die Scratcheinheit sind drehbar gelagert, um über die variable Probenaufnahme unterschiedliche Größen der Muttern, Scheiben und Schrauben zu prüfen. Weiterhin erlaubt die drehbare Lagerung des Hebels einen einfachen Probenwechsel. Darauf aufbauend wurde der Prototyp konstruiert, in welchem die aufgestellten Anforderungen umgesetzt wurden.

In Tabelle 1 ist eine Gegenüberstellung der Einzelziele und der erreichten Ergebnissen dargestellt. Der zahlenmäßige Nachweis des Personeneinsatzes ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelistet.

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

Pos.	Zielstellung	Ergebnisse
1	Erstellung eines Lastenhefts bzgl. der Haftfestigkeitsanforderungen an Feuerverzinkungsüberzügen unter Berücksichtigung der Beanspruchungen während Montage und Betrieb	<p>Gemeinsam mit dem Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V., dem Deutschen Schraubenverband e.V. sowie den im zugrunde liegenden Forschungsprojekt organisierten Unternehmen wurde ein Lastenheft erarbeitet.</p> <p>Darin fließen die grundsätzlichen Anforderungen an ein Prüfverfahren wie z. B. Robustheit, Handhabbarkeit, Anwendbarkeit, Aussagekraft und Wiederholbarkeit ein. Ebenso werden auch die Praxiserfahrungen der Verzinkungsbetriebe und Hersteller von Verbindungselementen bezüglich des Auftretens von Fehlern, Reklamationen und Ursachenforschung berücksichtigt.</p> <p>Für die Entwicklung der Prüfmethode wurden zusätzlich die maximalen Flächenpressungen bei Verbindungselementen abgeschätzt.</p>

Pos.	Zielstellung	Ergebnisse
2	Praxis-Screening existierender Methoden zur Haftfestigkeitsprüfung von Beschichtungen und Zinküberzügen im Allgemeinen sowie in den Betrieben praktizierter proprietärer Methoden zur Haftungsprüfung für Feuerverzinkungsüberzüge	<p>Es wurde ein Screening verschiedener Methoden durchgeführt. Dies erfolgte unter Berücksichtigung des Lastenhefts sowie konstruktiver und wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Gemäß VDI 2225-3 wurden mit der Methode des Paarvergleichs entsprechende Gewichtungsfaktoren abgeleitet</p> <p>Als Ergebnis des Praxis-Screenings zeigte sich der Ritztest, bei dem mit steigender Kraft ein Hartmetallstift über die Oberfläche gezogen wird, am vielversprechendsten, um im nächsten Schritt die Prüfmethode basierend auf der Prüfstrategie weiterzuentwickeln. Neben der Flexibilität durch die lineare Erhöhung der Beanspruchung konnte anhand des Befundes Abplatzung / keine Abplatzung eine einfache Zuordnung zur Schichthaftung getroffen werden, welche anhand von metallographischen Schliffen validiert wurde.</p>
3	(Weiter-) Entwicklung praxisgeeigneter Prüfmethoden, Umsetzung des Pflichtenhefts	<p>Es wurde eine Weiterentwicklung des Ritztests zur Anwendung an Feuerverzinkungsüberzügen durchgeführt. Dazu wurde als Eindringkörper ein Flowdrill-Fließbohrer an einen vorhandenen Ritztester adaptiert. Für die verschiedenen Bauteile wurden sowohl die Prüfkraftbereiche identifiziert als auch Einflüsse auf das Prüfergebnis in Form einer Schrägstellung der zu prüfenden Oberfläche untersucht. Die makroskopischen Befunde wurden mittels metallographischer Schliffe validiert. Bei allen geprüften Proben war anhand des makroskopischen Befundes eine eindeutige Unterscheidung zwischen gut und schlecht haftenden Zinküberzügen möglich. Unter Berücksichtigung des Lastenhefts wurde ein Prototyp für eine mechanische Prüfeinrichtung konzipiert.</p>
4	Sicherstellung der praktischen Anwendbarkeit bei Verbindungselementen (Schraube, Mutter, Scheibe) unterschiedlichster Abmessungen	<p>Die Probenaufnahme des Prototyp für eine mechanische Prüfeinrichtung ermöglicht die Prüfung von Schrauben, Muttern und Scheiben unterschiedlicher Abmessungen. Eine im T-Träger der Probenaufnahme eingebrachte Nut ermöglicht eine Positionierung des Prüfteils in Abhängigkeit der aufzubringenden Prüfkraft. Die zur prüfenden Bauteile werden dabei mit Hilfe von Parallelanschlügen zwischen T-Träger und Schwalbenschwanzführung geklemmt.</p>
5	Eingang der entwickelten Methode in Normen / Richtlinien, z.B. ISO 10684	<p>Gemeinsam mit dem DIN Normenausschuss Schmelztauchüberzüge sowie Firmen des pbA soll die Prüfmethodik weiterentwickelt werden und in die Normung einfließen. Es ist beabsichtigt, sobald die neue WIPANO Förderrichtlinie 2024 erschienen ist, dies im Rahmen eines Anschlussprojekts umzusetzen.</p>

5. Praktischer Nutzen / Wirtschaftlichkeit

- Wissenschaftlich-technisch validiertes Verfahren zur Prüfung der Produktqualität hinsichtlich der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen und zur Erhöhung der Prozesssicherheit
- Sicherstellung der Funktion des Zinküberzugs, insbesondere des Korrosionsschutzes
- Reduzierung von Nacharbeit bzw. Reklamationen
- Vertrauensgewinn bei den Kunden durch bessere Beratung und verbesserte Produktqualität
- Verbesserung der Prüfmethodik für die Prozesskontrolle und -freigabe
- Verbindliche Prüfmethode zur Beurteilung der Produktqualität hinsichtlich der Haftfestigkeit durch Transfer der Ergebnisse in Richtlinien und Normen

6. Umsetzung / Ergebnistransfer

Auf den Treffen des projektbegleitenden Ausschusses (pbA) bzw. des „Arbeitskreises Gemeinschaftsforschung“ des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V. (GAV) sowie des Arbeitskreises Gemeinschaftsforschung des Deutschen Schraubenverbands e.V. (DSV) erfolgte eine regelmäßige Berichterstattung über die aktuellen Ergebnisse. Die Ergebnisse wurden weiterhin auf Fachtagungen (IKS Korrosionsschutztag 2021, EGGA Assembly 2023) präsentiert und veröffentlicht.

Auf Basis der umfangreichen Tests und der intensiven Abstimmung mit dem pbA erfolgte die Konstruktion eines Prototyp, dessen Herstellung sich zum Zeitpunkt des Kurzberichts in Abschluss befindet.

Die Erprobung findet im Anschluss bei Firmen des pbA statt, und die Ergebnisse werden an die MPA-Darmstadt rückgekoppelt. Ziel ist es, in Zusammenarbeit mit dem DIN Normenausschuss Schmelztauchüberzüge die Methodik in die Normung zu überführen.

Der Ergebnistransfer und die industrielle Umsetzung ist durch die Erprobung und die gemeinsame Weiterentwicklung des Prototypen für die Haftfestigkeitsprüfung gegeben.

7. Hinweis auf Förderung

Das IGF-Vorhaben 21160 BG des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V. (GAV) und des Deutschen Schraubenverbands e.V. (DSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann beim GAV, Mörsenbroicher Weg 200, 40470 Düsseldorf, angefordert werden.