

Kurzbericht

zu dem IGF-Vorhaben

**SicherHAEit - Erhöhung der Sicherheit beim Einsatz hochfester Stähle
gegenüber Wasserstoff (H)-Versprödung durch ein verbessertes Verständnis
des H-Absorptions- und –Einlagerungsverhaltens**

(Bewilligungszeitraum: 01.01.2020 – 31.12.2022)

der Forschungseinrichtung

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Darmstadt, TU-Darmstadt

Das IGF-Vorhaben 20929 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, 25.09.2023

Prof. Dr-Ing. Matthias Oechsner

Ort, Datum

Name des Institutsleiters an der Forschungseinrichtung

1. Motivation

Der steigende Bedarf an hoch- und höchstfesten Stählen treibt die innovative Werkstoffentwicklung und -prüfung in allen Branchen des Maschinen- und Anlagenbaus stetig voran. Mit dem Einsatz hochfester Stahlbauteile mit Zugfestigkeiten > 1000 MPa steigt jedoch das Risiko eines Versagens durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion (H-ind. SpRK bzw. H-SpRK). Dazu müssen sich die Schnittmengen der drei Faktoren Werkstoffzustand – Beanspruchung – Wasserstoffangebot überschneiden (**Abbildung 1**). Die Ursache für das Auftreten einer H-SpRK ist stets ein dafür anfälliger Werkstoffzustand. Das (kritische) Wasserstoffangebot sowie die überlagerten Zugspannungen sind die Auslöser bzw. stellen die Gefährdungspotenziale dar.

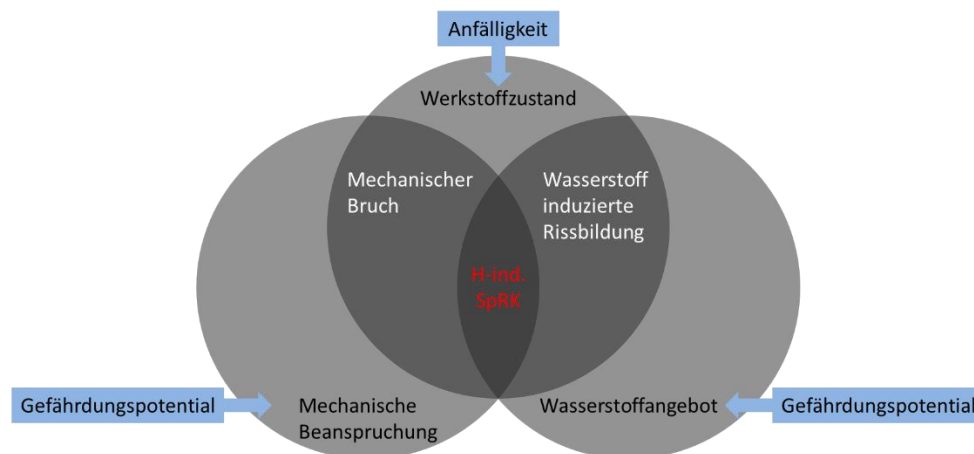


Abbildung 1: Voraussetzungen für das Auftreten einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion (H-ind. SpRK bzw. H-SpRK)

Demnach ist die Bewertung der Anfälligkeit eines Werkstoffzustands in der Werkstoffentwicklung- und -prüfung eine grundlegende Voraussetzung für den sicheren Einsatz hochfester Bauteile. Dazu kommen oft die in DIN 50969-3, DIN EN ISO 7539, ASTM F-519, ASTM F-1624 oder ASTM F2660 beschriebenen Prüfmethode im Zeitstandversuch, bei einer stufenweisen Laststeigerung oder im Langsamzugversuch bei geringen Dehnraten zum Einsatz. Die Voraussetzung für die Durchführung und Beurteilung der Prüfmethode ist eine reproduzierbare Beladung der Werkstoffe bzw. Proben mit Wasserstoff.

Bezüglich der Beladung existieren aber weder Normen noch Richtlinien. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die komplexen Mechanismen des H-Aufnahme- und Effusionsverhaltens, insbesondere unter Einwirkung einer gleichzeitigen mechanischen Beanspruchung sowie unter Berücksichtigung von Beladungsbedingungen, Werkstoff, Oberflächen- und Vergütungszustand noch weitgehend unbekannt sind.

Daher werden heute Prüfungen zur Untersuchung der Werkstoffanfälligkeit nach wie vor auf phänomenologischer Basis durchgeführt. Dazu werden die Beladungs- und Prüfparameter so eingestellt, dass eine Vergleichbarkeit der Werkstoffe unter den eingestellten Systembedingungen möglich ist. Aufgrund des fehlenden Wissenstands um die komplexen Zusammenhänge der H-Adsorption, -Absorption, -Rekombination, -Diffusion und -Effusion sowie der Schädigungskinetik fehlt jedoch die wissenschaftlich-technische Grundlage der Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf das Verhalten unter Betriebsbedingungen.

Während die Werkstoffentwicklung hochfester Stähle stetig vorangetrieben wird, bleiben die grundlegenden Mechanismen der H-Aufnahme und der Schädigungskinetik nach wie vor unverstanden. Dieses Verständnis bildet jedoch die Grundlage für die Auswahl und Entwicklung von Werkstoffen und der Sicherheit gegenüber H-Versprödung in der Anwendung. Daraus ergibt sich heute noch ein signifikantes Hemmnis für den Einsatz hoch- und höchstfester Stähle, weil auf Anwenderseite aufgrund dieses fehlenden Wissens berechnete Bedenken bezüglich der Bauteilsicherheit im Betrieb bestehen.

In dem beantragten Projekt sollte dieses fehlende Verständnis erarbeitet werden, mit dem die heute existierenden Normen und Richtlinien bezüglich der Prüfmethode gegenüber H-Versprödung um die Aspekte der H-Beladung ergänzt werden sollen. Darüber hinaus wurden bezüglich der Bauteilsicherheit unter einer Korrosionsbeanspruchung auch die Auswirkungen mechanischer Beanspruchungen sowie die Diffusionsmechanismen des absorbierten Wasserstoffs im Bauteil in Abhängigkeit vom Ort der H-Absorption berücksichtigt und mit der H-bedingten Eigenschaftsdegradation verknüpft.

Dabei wurden die in vergangenen und aktuellen Forschungsvorhaben, z.B. IGF 17815/N, IGF 17816/N und IGF 19218/N [1, 2, 3] entwickelten Prüfmethode zur Wasserstoffanalytik und zur Bestimmung der Degradation der mechanischen Eigenschaften angewendet und im Hinblick auf die Problemstellung weiterentwickelt. Damit liefert das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Bauteilsicherheit gegenüber Wasserstoffversprödung bei der Anwendung hoch- und höchstfester Stähle.

2. Forschungsziele

Die Zielsetzung des beantragten Forschungsprojekts ist, ein mechanismenbasiertes Verständnis des Wasserstoff-Absorptions- und Einlagerungsverhaltens und der resultierenden Auswirkungen auf die Bauteilsicherheit hochfester Stähle unter Berücksichtigung von Werkstoff und Vergütungszustand sowie unter gleichzeitiger Einwirkung mechanischer Beanspruchungen zu erarbeiten. Dieses erlaubt dem Anwender, nach einem weiteren Entwicklungsschritt die Prüfstrategien zur Bewertung der Werkstoffanfälligkeit und des Wasserstoffgefährdungspotenzials zu optimieren und die Sicherheit der Produkte zu erhöhen.

Zur Erreichung der Zielsetzung sind die folgenden Projektschwerpunkte vorgesehen:

- Untersuchung des Wasserstoff-Absorptions-, -Diffusions- und Einlagerungsverhalten in Abhängigkeit von Werkstoff und Wärmebehandlung
- Untersuchung des Einflusses einer mechanischen Beanspruchung auf das H-Bindungs- und -Effusionsverhalten
- Quantitative Bewertung des Einflusses einer korrosionsbedingten (lokalen) Wasserstoffaufnahme auf die Degradation der mechanischen Eigenschaften
- Bestimmung der Schädigungskinetik während zyklischer Beladungs- und Auslagerungsversuche bei unterschiedlichen Beanspruchungsprofilen
- Identifikation von Wirkmechanismen und Einflussgrößen zum H-Absorptions-, Desorptions- und Schädigungsverhalten unter Berücksichtigung der verschiedenen Prüf- und Beladungsmethoden

3. Vorgehensweise

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

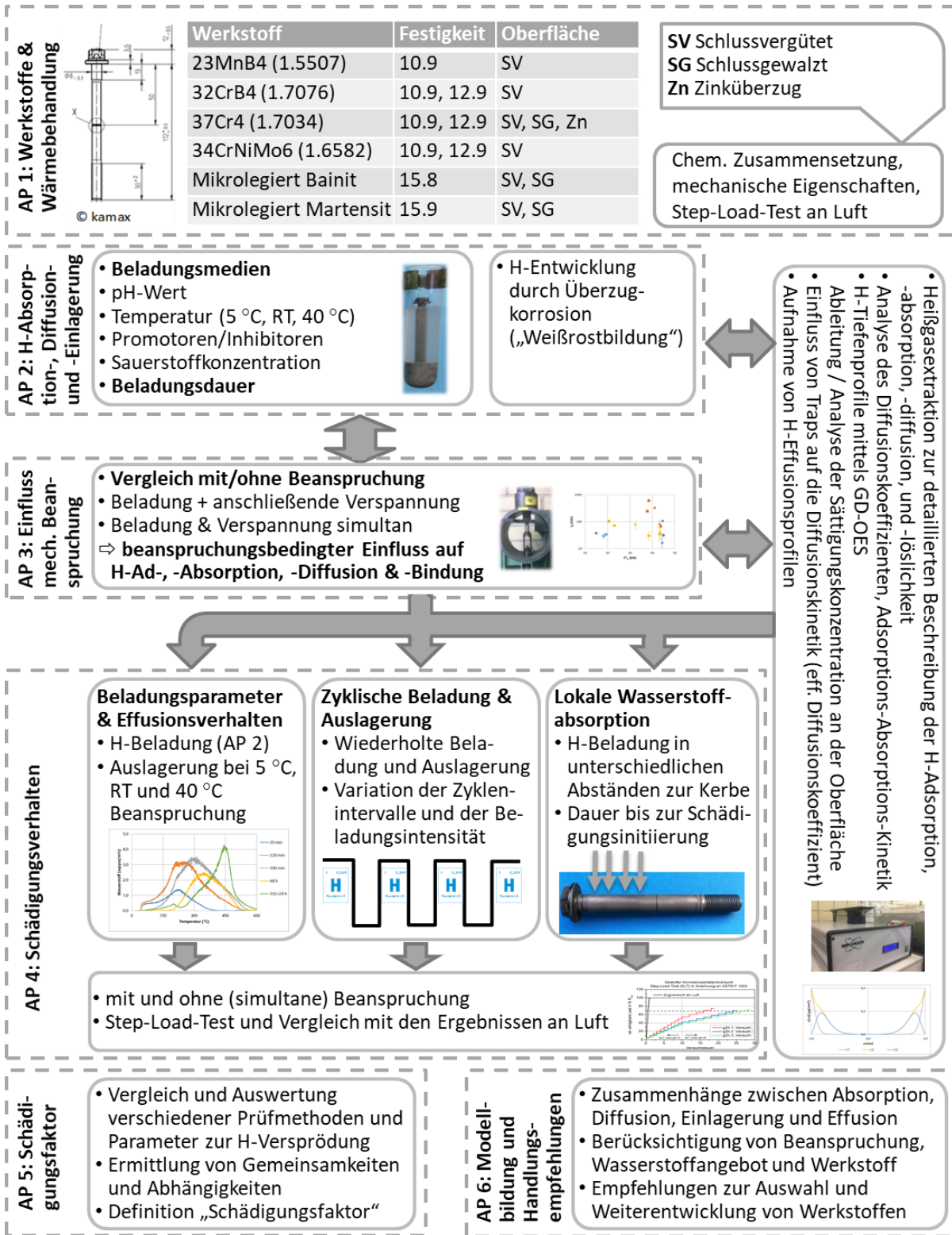


Abbildung 2: Projektstruktur

4. Ergebnisse

Die übergeordnete Zielsetzung des beantragten Forschungsprojekts ist, ein mechanismenbasiertes Verständnis des Wasserstoff-Absorptions- und Einlagerungsverhaltens und der resultierenden Auswirkungen auf die Bauteilsicherheit hochfester Stähle unter Berücksichtigung von Werkstoff und Vergütungszustand sowie unter gleichzeitiger Einwirkung mechanischer Beanspruchungen zu erarbeiten. Dieses erlaubt dem Anwender, die Prüfstrategien zur Bewertung der Werkstoffanfälligkeit und des Wasserstoffgefährdungspotenzials zu optimieren und die Sicherheit der Produkte zu erhöhen. Zur Entwicklung dieses mechanismenbasierten Verständnisses wurden im Rahmen dieses Projektes 12 Typen hochfester Schrauben untersucht, die sich im Werkstoff, der Festigkeitsklasse, der Wärmebehandlung und der Schraubengeometrie unterscheiden. Im gewindefreien Schaft der Schrauben wurde eine umlaufende Kerbe eingerollt, an der die mechanischen Prüfungen hinsichtlich der Anfälligkeit der Schrauben gegenüber einer Wasserstoffversprödung vorgenommen wurden.

Nach einer Grundcharakterisierung der Schrauben hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, der Mikrostruktur und der chemischen Zusammensetzung wurde das Wasserstoffabsorptionsverhalten der Schrauben bei unterschiedlichen Wasserstoffbeladungsbedingungen bewertet. Zur Quantifizierung der Wasserstoffbeladungsbedingungen wurden Wasserstoffanalysen mittels Trägergasheigasextraktion (TGHGE) durchgeführt. Für eine erste Abschätzung verschiedener Einflussfaktoren auf das Wasserstoffabsorptionsverhalten wurden Zylinderproben mit einer definierten Geometrie verwendet. Hierbei wurden folgende Erkenntnisse zu den untersuchten Einflussfaktoren gewonnen:

- | | |
|----------------|---|
| Umrühren | Bei der ersten Wasserstoffbeladung in der verwendeten Beize werden mit Rhren und ohne Rhren die gleichen Wasserstoffkonzentrationen erhalten. Somit hat das Rhren keinen zusätzlichen, quantifizierbaren Nutzen beim Wasserstoffeintrag.

Die Beladungsbeize altert mit steigender Anzahl durchgeführter Beladungen. Die Alterung der Beladungsbeize wird durch das Rhren beschleunigt. Ein Erklärungsansatz hierfür ist die Beschleunigung der Reaktionskinetik auf der Probenoberfläche durch die Kinetik des Umrührens. Aufgrund der stndigen Umspülung der Probenoberfläche beschleunigt auch die Kinetik der Bildungsreaktion von Schwefelwasserstoff auf der Probenoberfläche, wodurch sich das Natriumsulfid der Beladungsbeize schneller verbraucht. |
| Promotortyp | Natriumsulfid (Na_2S) ist ein starker Promotor der Wasserstoffabsorption bei dem, im Gegensatz zu NH_4SCN , nur geringe Konzentrationen ausreichen, um einen signifikanten Effekt hinsichtlich der Erhöhung der absorbierten Wasserstoffmenge zu erzielen. Mit steigender Promotorkonzentration steigt die Menge an absorbiertem Wasserstoff. Zu berücksichtigen ist, dass die Promotorkonzentration sich mit steigender Wasserstoffbeladungsdauer verbraucht (Alterung der Beladungsbeize). Mit steigender Wasserstoffbeladungsdauer nimmt der positive Effekt der anfänglich hohen Promotorkonzentration ab. |
| Beladungsdauer | Die Beladungsdauer weist den zweithöchsten standardisierten Effekt auf die Erhöhung der absorbierten Wasserstoffmenge auf. Hierbei ist jedoch zu be- |

achten, dass dieser Effekt sich auf die über die gesamte Probenmasse gemittelte Wasserstoffkonzentration und nicht auf die lokale Wasserstoffkonzentration bezieht. Der Effekt muss daher mit der steigenden Wasserstoffeindringtiefe und der Tiefenverteilung des Wasserstoffs im Probeninneren in Verbindung gebracht werden.

Temperatur	Eine Erhöhung der Temperatur hat ebenfalls einen positiven Effekt auf die absorbierte Wasserstoffmenge, solange die Wasserstoffbeladungsdauer hinreichend kurz gehalten wird. In Kombination mit einem Promotor beschleunigt eine erhöhte Temperatur die Alterung der Beladungsbeize, wodurch der positive Effekt der erhöhten Temperatur nur für geringere Beladungsdauern genutzt werden kann.
Säurekonzentration	Die HCl-Konzentration hat im untersuchten Konzentrationsbereich zwischen 2 % und 16 % keinen signifikanten Einfluss auf die absorbierte Wasserstoffmenge. Der kombinierte Effekt aus der HCl-Konzentration und den Faktoren Beladungsdauer, Promotorkonzentration oder Temperatur ist stets signifikant.

Anschließend wurde die TGHGE in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe und der Wasserstoffbeladungsdauer durchgeführt, um Wasserstoffkonzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Wasserstoffbeladungsdauer quantifizieren zu können. Die Wasserstoffbeladung der Zylinderproben wurde in 9%iger HCl, versetzt mit 3 g/l Na₂S durchgeführt. Hierbei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Für jeden Werkstoff existiert ein spezifischer Beladungsbereich in Beizen, in dem quasi-statische Beladungsbedingungen gelten, d.h. dass die oberflächennahe Randkonzentration c_i während der Wasserstoffbeladung konstant bleibt.
- Die Wasserstoffbeladung unter quasi-statischen Beladungsbedingungen resultiert in einem zweigeteilten Konzentrationsprofil, welches sich aus der Konzentrationsverteilung c_D des bei 200 °C diffusionsfähigen Wasserstoffs und der Konzentrationsverteilung c_T des bei 200 °C an Wasserstofffallen gebundenen „getrappten“ Wasserstoffs zusammensetzt.
- Bei der Wasserstoffbeladung in Beizen wird der gleiche Zusammenhang zwischen der oberflächennahen Konzentration c_i und dem Wasserstoffdiffusionskoeffizienten D_H gefunden, wie er für elektrochemische Permeationsmessungen oder andere allgemeine Diffusionsprobleme bereits bekannt ist. Dabei verhält sich c_i reziprok proportional zu D_H , wobei die Proportionalitätskonstante die Löslichkeitsrate dm_H/dt enthält. Mit dem in Gl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigten Zusammenhang kann das Wasserstoffabsorptionsverhalten verschiedener Werkstoffe in verschiedenen Beizen – unter Zuhilfenahme des zweigeteilten Konzentrationsprofils – vollständig mit physikalischen und chemischen Kennwerten bewertet und quantifiziert werden.
- Für alle in dieser Arbeit untersuchten Stähle wurde die gleiche Löslichkeitsrate dm_H/dt innerhalb der Beladungsbeize (9%ige HCl versetzt mit 3 g/l Na₂S) erhalten. Unterschiede im Absorptionsverhalten sind auf D_H und c_i zurückzuführen.
- Der Wasserstoffdiffusionskoeffizient wird durch die Zugabe von Legierungselementen

reduziert. Demnach hat von den untersuchten Elementen Molybdän den größten Einfluss auf die Reduktion des Wasserstoffdiffusionskoeffizienten, gefolgt von Chrom und Mangan. Der Einfluss von Bor konnte nicht aufgezeigt werden, da bis auf die Werkstoffe W1, W6, W7 und W8 jeder der untersuchten Werkstoffe signifikante Mengen an Bor enthält.

- Der Materialabtrag α wurde rechnerisch über den prozentualen Massenverlust bestimmt und hat die Längeneinheit μm . Es wurde aufgezeigt, dass der Materialabtrag vernachlässigbar klein gegenüber der Wasserstoffeindringtiefe ist. Somit wird ein negativer Einfluss des Materialabtrags auf die Menge an absorbiertem Wasserstoff ausgeschlossen. Um durch den Beizangriff entstandene Oberflächenfehler zu vermeiden, sollten stets kurze Wasserstoffbeladungsdauern in Beizen gewählt werden, die idealerweise innerhalb der quasi-statischen Beladungsbedingungen liegen.

Die TGHGE in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe wurde weiterhin infolge einer elektrochemischen Wasserstoffbeladung, bei der die Probe kathodisch polarisiert wird, durchgeführt. Die Beladung erfolgte in 5%iger Schwefelsäure, versetzt mit 3 g/l Na_2S . Als Stromstärke wurden 20 mA gewählt. Für alle untersuchten Zylinderhöhen wurden bei der elektrochemischen Wasserstoffbeladung die gleichen Ergebnisse erzielt, wie bei der nasschemischen Beladung in 9%iger Salzsäure mit 3 g/l Na_2S .

Mit dem AP „zyklische Wasserstoffbeladung“ sollten die Proben in Anlehnung an die natürlichen Korrosionszyklen eines Verbindungselementes im Labormaßstab für eine Dauer t_H beladen und anschließend für eine Dauer t_a an Laborluft wieder ausgelagert werden. Damit sollte untersucht werden, inwiefern es in Abhängigkeit von Werkstoff und einwirkender mechanischer Beanspruchung bei einem (zwischenzeitlichen) Stopp des H-Angebots an der Oberfläche zu einer „Regeneration“ kommen kann. Es wurde gezeigt, dass bei einer zyklischen Wasserstoffbeladung ein Teil des absorbierten Wasserstoffs in das Probeninnere diffundiert wodurch höhere Wasserstoffeindringtiefen vorliegen. Dies verdeutlicht die Relevanz eines Effusionstemperns in Anschluss an jeden industriellen Fertigungsprozess, bei dem Wasserstoff von der Probe absorbiert werden könnte. Weiterhin haben die Untersuchungen gezeigt, dass mit abnehmendem Wasserstoffdiffusionskoeffizienten des Werkstoffs der Wasserstoff deutlich länger und in höheren Konzentrationen im Probeninneren verweilen kann, als bei vergleichsweise geringeren Diffusionskoeffizienten.

Der Einfluss einer mechanischen Beanspruchung auf das Wasserstoffdiffusions- und effusionsverhalten konnte mit der hier durchgeführten Analytik nicht nachgewiesen werden. Genauer gesagt wurden für Proben, die bei einer mechanischen Beanspruchung ausgelagert wurden und solchen, die ohne eine mechanische Beanspruchung für die gleiche Dauer ausgelagert wurden, die gleichen Ergebnisse hinsichtlich der Wasserstoffeffusionsprofile erhalten. Folglich ist die Auflösung der verwendeten Analytik und der zugehörigen experimentellen Vorgehensweise nicht ausreichend, um den Effekt der mechanischen Beanspruchung auflösen zu können.

Mit der Erkenntnis, dass die Bewertung der Anfälligkeit hochfester Schrauben gegenüber einer Wasserstoffversprödung das Wasserstoffkonzentrationsprofil und insbesondere die Wasserstoffeindringtiefe berücksichtigen muss, wurde ein Modell zum Schädigungshergang der Wasserstoffassistierten Rissbildung (HAC) in Abhängigkeit von der Wasserstoffeindringtiefe entwickelt. Die Theorie basiert auf dem *Griffith*-Kriterium für Sprödbrüche und einer einfachen Abschätzung der Diffusionslänge. Innerhalb des Arbeitspaketes 5 (Schädigungsverhalten) wurde der Vorspannkraft-Verlust-Test (VVT) entwickelt, mit dem die Plausibilität der Modellvorstellung belegt werden konnte. Mithilfe des VVT und dem Modell zur HAC in Abhängigkeit von der

Wasserstoffeindringtiefe können Verspannprüfungen unter gewissen Bedingungen hinsichtlich des Wasserstoffdiffusionskoeffizienten D_H , der Schwellenwertspannungsintensität K_{IHAC} und der kritischen Spannungsintensität K_{Ic} ausgewertet werden.

Die Schwellenwertspannungsintensität K_{IHAC} wurde als Schädigungsfaktor definiert, da diese aus bruchmechanischer Sicht sowohl für die wasserstoffassistierte Rissinitiierung, als auch für das wasserstoffassistierte Risswachstum überschritten werden muss, gleichwohl welches mechanische Prüfverfahren angewendet wird. Nichtsdestotrotz sind nur die wenigsten Prüfverfahren geeignet, um K_{IHAC} bestimmen zu können. Mit dem VVT wurde im Rahmen dieses Projektes ein Prüfverfahren entwickelt, welches die Bestimmung von K_{IHAC} ermöglicht. Die Kombination aus dem VVT, der zugehörigen Modellvorstellung zum Schädigungsmechanismus und den gewonnenen Erkenntnissen zum Wasserstoffabsorptions- und Einlagerungsverhalten infolge verschiedener Beladungsbedingungen ermöglichen eine umfassende Bewertung der Wasserstoffversprödung hochfester Schrauben aus ferritischem Stahl.

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

Ziele/durchgeführte Arbeiten	Ergebnisse
Untersuchung des Wasserstoff-Absorptions-, -Diffusions- und Einlagerungsverhaltens in Abhängigkeit von Werkstoff und Wärmebehandlung	Wurde im Rahmen des AP 2 mittels Wasserstoffanalytik untersucht. Hierbei kamen insbesondere die TGHGE bei einer konstanten Ausheiztemperatur im IR-Quarzrohrfen sowie die TGHGE in Abhängigkeit von der Proben dicke und der H-Beladungsdauer zum Einsatz. Die Methoden wurden an unterschiedlichen Proben (AP 1) durchgeführt.
Untersuchung des Einflusses einer mechanischen Beanspruchung auf das H-Bindungs- und -Effusionsverhalten	Der Einfluss der mechanischen Beanspruchung wurde mittels TGHGE im IR-Quarzrohrfen in Kombination mit einer zyklischen Wasserstoffbeladung durchgeführt. Nach jeder Wasserstoffbeladung wurden Auslagerungen im verspannten Zustand durchgeführt und die Auswirkungen der Verspannung auf das gemessene Thermodesorptionsprofil aufgezeigt.
Quantitative Bewertung des Einflusses einer korrosionsbedingten (lokalen) Wasserstoffaufnahme auf die Degradation der mechanischen Eigenschaften	Der Einfluss einer korrosionsbedingten Wasserstoffaufnahme wurde im Rahmen des AP 4 untersucht. Als Prüfverfahren wurde der Vorspannkraft-Verlust-Test (VVT) entwickelt, mit dem die Plausibilität des in AP 6 entwickelten Modells der H-assistierten Rissbildung in Abhängigkeit von der Wasserstoffeindringtiefe aufgezeigt wurde.

<p>Bestimmung der Schädigungskinetik während zyklischer Beladungs- und Auslagerungsversuche bei unterschiedlichen Beanspruchungsprofilen</p>	<p>Die Schädigungskinetik bei zyklischer Beanspruchung wurde im Rahmen des AP 4 mit Hilfe des VVT untersucht. Bei einer zyklischen Wasserstoffbeladung müssen die Phasen der H-Effusion deutlich länger gewählt werden, als die Phasen der H-Absorption, um die Schädigungskinetik zu verlangsamen oder zu stoppen. Dies ist darin begründet, dass das Konzentrationsprofil des absorbierten H sowohl einen Konzentrationsgradienten in das Probeninnere als auch einen Konzentrationsgradienten zur Oberfläche aufweist und deshalb sowohl zur Diffusion an die Probenoberfläche als auch zur Diffusion in das Probeninnere neigt.</p>
<p>Identifikation von Wirkmechanismen und Einflussgrößen zum H-Absorptions-, Desorptions- und Schädigungsverhalten unter Berücksichtigung der verschiedenen Prüf- und Beladungsmethoden</p>	<p>Im Bereich der Wirkmechanismen auf das H-Absorptions- und Desorptionsverhalten wurde dieses infolge unterschiedlicher Beladungsbedingungen mittels H-Analytik untersucht. Hierbei wurde insbesondere der Einfluss der Art und Konzentration der Säure, der Art und Konzentration des Promotors sowie der Einfluss der Temperatur, der Beladungsdauer und einer Umspülung der Probenoberfläche (Umrühren des Beladungsmediums) aufgezeigt.</p> <p>Im Bereich der Wirkmechanismen auf das Schädigungsverhalten wurde ein Modell der H-assistierten Rissbildung und des diffusionskontrollierten Risswachstums in Abhängigkeit von der Wasserstoffeindringtiefe entwickelt, welches das Schädigungsverhalten in Abhängigkeit vom H-Diffusionskoeffizienten, der Schwellenwertspannungsintensität und der Bruchzähigkeit beschreibt (AP 6).</p>

5. Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit

Der sichere Einsatz von hochfesten Werkstoffen ist entscheidend für den Leichtbau und die Erreichung von Emissionszielen im Kraftfahrzeugbau, insbesondere in Bezug auf Wasserstoffversprödung. Aktuelle Forschungsaktivitäten zielen darauf ab, Werkstoffe mit geringerer Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung zu entwickeln und verbesserte Prüfmethoden zu schaffen.

Allerdings sind die Zusammenhänge von Wasserstoffadsorption, -absorption, -rekombination, -diffusion und -effusion sowie Schädigungskinetik noch nicht vollständig verstanden, Die

im Projekt erzielten Ergebnisse ermöglichen ein besseres Verständnis des werkstoffspezifischen H-Absorptions- und Einlagerungsverhaltens sowie des damit verknüpften Schädigungs-hergangs. Dies ermöglicht der Industrie, die Sicherheit ihrer Produkte zu erhöhen. Die Ergebnisse ermöglichen es Werkstoff- und Schraubenherstellern sowie Wärmebehandlungsbetrieben insbesondere, ihre Prüfstrategien zu optimieren und die Anwenderakzeptanz zu steigern, was zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit beiträgt.

Das Projekt birgt folgenden Nutzen:

- Erhöhung der Sicherheit hochfester Schrauben gegenüber „Wasserstoffversprödung“ durch die Optimierung der Prüfstrategien zur verbesserten Korrelation zwischen dem Verhalten in den H-Versprödungsprüfungen und der tatsächlichen Sicherheit im Betrieb
- Wissenschaftlich-technische Grundlage für die Auswahl und Optimierung von Werkstoffen sowie die Auswahl geeigneter Oberflächenschutzsysteme
- Vertrauensgewinn bei den Kunden durch die Kenntnis und Beherrschung der Problematik „H-Versprödung“ sowie durch verbesserte Beratung und optimierte Prozesse
- Verbesserung der Akzeptanz bezüglich des Einsatzes hochfester Schrauben
- Ableitung von Maßnahmen zur Schadensverhütung / Schadensminimierung

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 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 2021 (Webinar) und der Fachtagung „Wasserstoffversprödung hochfester Stähle – Herausforderungen und Lösungen“ in Darmstadt statt.

7. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20929 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] Abschlussbericht IGF 17815 N: „Entwicklung einer Methode zur Untersuchung und Bewertung des fertigungsbedingten Wasserstoffgefährdungspotenzials moderner Korrosionsschutzsysteme für hochfeste Bauteile aus Stahl“, TU-Darmstadt 2017
- [2] Abschlussbericht IGF 17815 N: „Umgebungseinfluss auf den korrosionsbedingten Wasserstoffeintrag in hochfeste Stähle bei Anwendung von modernen Korrosionsschutzsystemen auf Zinkbasis: Darmstadt, TU-Darmstadt 2016.
- [3] IGF 19218 N: „Bewertung der Anfälligkeit von Vergütungsstählen für hochfeste Schrauben gegenüber wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion“, MPA-Darmstadt, 11/2016 bis 5/2019