



# DVM

Deutscher Verband für  
Materialforschung und -prüfung e.V.

DVM-Tag 2016 - Bauteil verstehen.

## Schraubenverbindungen





**DVM**

Deutscher Verband für  
Materialforschung und -prüfung e.V.

DVM-Bericht 1683

## **Schraubenverbindungen**

DVM-Tag 2016 – Bauteil verstehen.

20. bis 22. April 2016, Berlin

## **Mitglieder des Programmausschusses**

*Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner*  
(Vorsitzender des Ausschusses)

Technische Universität Darmstadt

*Dr. Manfred Bacher-Höchst*

Robert Bosch GmbH, Stuttgart

*Dr. S. Beyer*

Deutscher Schraubenverband e.V., Hagen

*Dipl.-Ing. S. Chereau*

BMW AG, München

*Dipl.-Ing. M. Decker*

IABG mbH, Ottobrunn

*Dipl.-Ing. R. Heim*

Fraunhofer LBF, Darmstadt

*Dipl.-Ing. L. Krüger*

DVM, Berlin

*Dr. K. Mädler*

Deutsche Bahn AG, Kirchmöser

*Dr. C. von Minden*

Mercedes-Benz, Hamburg

*Prof. Dr.-Ing. H. A. Richard*

Universität Paderborn

*Dipl.-Ing. B. Stirn*

AUDI AG, Ingolstadt

Vorwort DVM-Tag 2016

## **Schraubenverbindungen**

Schraubenverbindungen sind ein Schlüsselement, um Konstruktionen im Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau zuverlässig und wirtschaftlich miteinander zu verbinden. Neue und angepasste Werkstoffkonzepte sowie eine fertigungs-, beanspruchungs- und montagegerechte Gestaltung der Verbindungselemente sind die Voraussetzungen für eine hohe Funktions- und Betriebssicherheit und ermöglichen eine robuste sowie eine effiziente, präzise und störungsfreie Montage von Schraubenverbindungen.

Der Deutsche Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. widmet nach 2004 in 2016 zum zweiten Mal seinen DVM-Tag dem Thema Schraubenverbindungen. Forschungseinrichtungen, Hersteller sowie Anwender aus dem Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau diskutieren gemeinsam den Stand der Wissenschaft und Technik, Herausforderungen sowie Perspektiven. Die Beiträge betrachten insbesondere innovative Konzepte im Bereich der Werkstoffe und Herstellungstechnologien, die Auslegungsmethodik in Berechnung und Versuch, das Phänomen des selbsttätigen Losdrehens sowie das Gebiet der Schadensanalyse.

Die Veranstaltung richtet sich an Ingenieure und Techniker, die in der Entwicklung, Auslegung und Konstruktion sowie in der Fertigung und Anwendung von Schraubenverbindungen arbeiten und ihr Wissen über neueste Erkenntnisse und Entwicklungen zu diesen Themen vertiefen und erweitern möchten.

Ein herzlicher Dank geht an den Deutschen Schraubenverband e.V., insbesondere dem Geschäftsführer des Verbandes, Herrn Dr. Stefan Beyer, für die Unterstützung der Veranstaltung. Der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sei für die Bereitstellung der Veranstaltungsräume gedankt.

*Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner*  
Institut für Werkstoffkunde  
Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA)  
Technische Universität Darmstadt

**Innovative Konzepte**

Zukünftige Werkstoff- und Prozesskonzepte - / Entwicklungen in der Verbindungstechnik

*R. JENNING*

Leichtbau durch ultrahochfeste Schrauben im Automobilbau

*H. DIETERLE, G. HARTMANN*

Kalibrierwalzen von Drähten aus Magnesiumlegierungen zur Herstellung von Verbindungselementen  
(Beitrag lag zur Drucklegung nicht vor)

*J. DEMBINSKA, M. ULLMANN, M. GRAF, K. NEH, R. KAWALLA*

Experimentelle Analyse des Vorspannkraftverhaltens von Schraubenverbindungen mit endlosfaserverstärkten Kunststoffen

*M. JENNE, C. BÄR, C. FRIEDRICH*

Experimentelle Charakterisierung von gefurchten Mutterngewinden

*F. KRAEMER, J. BEYER, M. OECHSNER*

Einsatz gewindefurchender Schrauben im Automobilbau

*N. HORNBOSTEL*

**Auslegungsmethodik – Modellierung und Versuch**

Guideline für die Schraubfallentwicklung und ihre Einbindung in den Fahrzeugentwicklungsprozess

(Beitrag lag zur Drucklegung nicht vor)

*R. HARTL*

Auslegung von Schraubenverbindungen bei MAN anhand von Beispielen aus dem LKW-Chassis

*S. NEUMAIER*

VDI 2230 Blatt 2 – Mehrschraubenverbindungen: Inhalt und Ziele  
(Beitrag lag zur Drucklegung nicht vor)

*W. LORI*

Zentralverschraubung von PKW-Rädern

*I. KRAUSE, S. ALLOUCH, R. HEIM*

Untersuchung des Radverbunds hinsichtlich der Beanspruchung von Radschrauben

*A. SORG, J. UTZINGER, E. LENGEL, B. SEUFERT*

Betriebslastversuche an nicht vorgespannten Rundgewinden unter Zug- und Querbelastrungen

*B. SCHLECHT, K. NEIKES*

### **Selbsttätiges Losdrehen**

Selbsttätiges Losdrehen – ein bedeutender Schadensmechanismus im Leichtbau

*C. FRIEDRICH, S. K. MANOHARAN*

Untersuchung des Einflusses konstruktiver Parameter auf das Losdrehverhalten und deren Berücksichtigung in der Prüfvorschrift für Sicherungselemente

DIN 25201-4

*T. HÜBING, M. KLÖCKER, R. FRANKE*

Synthetische Prüfmethode zur Untersuchung des selbsttätigen Schraubenlösen an Fahrwerksverschraubungen

*M. KAATZ, M. MEYWERK, S. SPITTLER*

Selbsttätiges Losdrehen von Schraubenverbindungen unter transversaler Beanspruchung

*A. EBERHARD, S. BEYER, J. BEYER, M. OECHSNER*

## **Schadensanalysen**

Schadensanalyse an Schraubverbindungen

*C. HEERMANT*

Durchführung einer systematischen Schadensanalyse nach VDI  
Richtlinie 3822 an verzinkten Zylinderschrauben

*M. EIBER, M. DECKER*

Spannungsrisskorrosion an hochfesten Schrauben  
(Beitrag lag zur Drucklegung nicht vor)

*H. HOCHÉ*

# **DURCHFÜHRUNG EINER SYSTEMATISCHEN SCHADENSANALYSE NACH VDI RICHTLINIE 3822 AN VERZINKTEN ZYLINDERSCHRAUBEN**

**M. Eiber, M. Decker**

IABG mbH, Ottobrunn

## **Zusammenfassung:**

Die Durchführung von systematischen Schadensanalysen ist für alle Industriezweige von entscheidender Bedeutung, um Schadensmechanismen und ihre Ursachen zu bestimmen, zu verstehen und richtig zu bewerten. Daraus können geeignete Maßnahmen hinsichtlich Abhilfe und Prävention definiert und langfristig Schadensraten gesenkt werden. Fundiert untersuchte Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Schadensanalysen ermöglichen ein korrigierendes Eingreifen in Produkt- und Prozessentwicklung im Bereich der Auslegung und Konstruktion und der Herstell- und Fertigungsverfahren. Sie bilden eine wichtige Grundlage für die Erstellung von qualitätssichernden Spezifikationen und Abläufen. Für identifizierte Schwachstellen können gezielte Gegenmaßnahmen eingesetzt und Wiederholungsschäden verhindert werden. Richtig umgesetzt bedeuten qualitativ hochwertige Bewertungen von Schadensereignissen einen effizienten Weg zur Verbesserung von Produktqualitäten, stabilen Prozessketten und einem sicheren und langfristigen Anlagenbetrieb.

**Stichwörter:** Systematische Schadensanalyse, Wasserstoffversprödung, VDI Richtlinie 3822

## **PERFORMANCE OF A ROOT CAUSE INVESTIGATION ACC. TO VDI GUIDELINE 3822 ON ZINC-COATED SOCKET HEAD BOLTS**

### **Abstract:**

The performance of a structured root cause investigation is of great importance for all industrial fields in order to determine the actual failure mechanism and the possible root causes. This enables the definition of effective countermeasures for correction and prevention. In the long term, failure rates can be reduced. Results and conclusions that are soundly researched are the basis for corrective measures concerning the development of products and processes in design, dimensioning and production. They are also a fundamental prerequisite for proper definition of an effective quality control. For correctly determined weak spots of a system, precise countermeasures can be derived in order to reliably and efficiently prevent failures. If applied correctly, root cause analysis of failures can play an important role in optimizing the quality of a product, in stabilizing the production process and in guaranteeing a long and safe service life of a system or plant.

**Keywords:** Root cause investigation, hydrogen induced stress, VDI guideline 3822



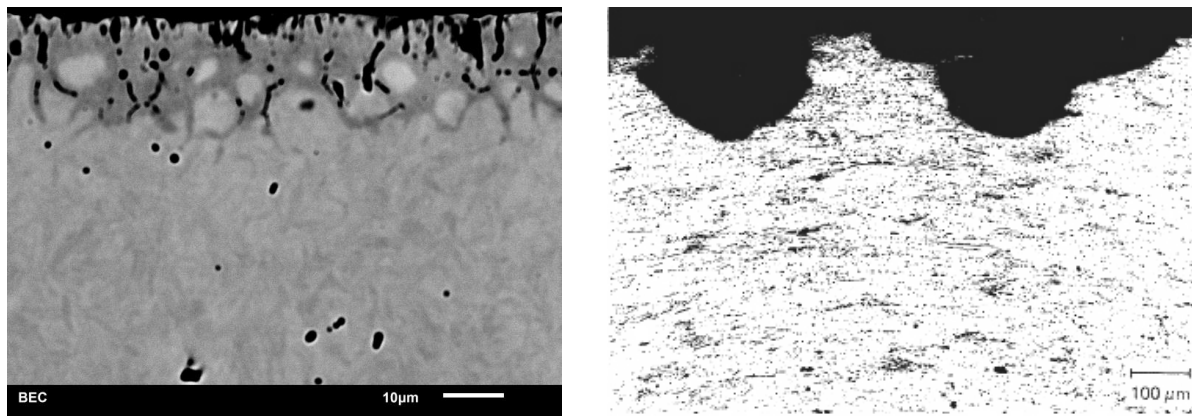
## Einleitung

Jährlich entstehen weltweit hohe wirtschaftliche Verluste, die durch technische Schäden verursacht werden. Zusätzlich zum Wert der geschädigten Anlagen/Systeme treten meist Folgekosten durch Ausfallzeiten von Produktion und Prozessen, Reparatursätze sowie Ersatzbeschaffungen auf. Allein durch den Schadensmechanismus der Korrosion entstehen in Industrienationen jährlich Kosten, deren Höhe ca. 3 Prozent des jeweiligen Bruttoinlandsprodukts betragen [1]. Im Jahr 2015 waren das in Deutschland somit ca. 90 Milliarden Euro.

Das Wort „Schaden“ ist definiert als jeder materielle oder immaterielle Nachteil, den eine Person oder Sache durch ein Ereignis erleidet [2]. Das bisher größte Unglück in der Geschichte Deutschlands vor der Stadt Eschede 1998 war die Folge einer Materialermüdung an einem Radreifen. Im Jahr 2008 trat in einem ICE im regulären Betrieb ein Radsatzwellenbruch auf, der nur durch glückliche Umstände keine schlimmeren Folgen hatte. Im Kraftwerk Irsching kam es an Silvester 1987 zu einem Zwischenfall. Der Niederdruckläufer eines 330 MW-Dampfturbosatzes barst während eines Kaltstarts. Insgesamt 35 Bruchstücke des 60 Tonnen schweren Läufers verteilten sich in der Umgebung, das mit 1,3 Tonnen schwerste Teilstück landete in 1,3 Kilometer Entfernung zum Kraftwerk auf einem Acker [3]. Maschinenschäden wie diese verursachen hohe Kosten und gefährden die Gesundheit der sie umgebenden Menschen. Um eine Wiederholung von Schadensereignissen zu vermeiden und ihre Entstehung zu verhindern, ist es erforderlich, den ursächlichen Einflüssen auf den Grund zu gehen. Der chinesische Philosoph Konfuzius war sich vor mehr als zweitausend Jahren sicher: „Wer einen Fehler begeht und ihn nicht korrigiert, begeht einen zweiten“. Damit Korrekturen gezielt angewendet werden können, müssen Schadensereignisse systematisch und fundiert untersucht werden. Die Ergebnisse von komplementären Untersuchungsmethoden führen zur Bestimmung der vorherrschenden Schadensmechanismen, aus denen mögliche Schadensursachen abgeleitet werden. Dabei spielt die Verwendung einer einheitlichen Nomenklatur zusammen mit ihrer korrekten Anwendung eine sehr wichtige Rolle für die Qualität und die Vergleichbarkeit von Schadenanalysen. Unstrukturierte Untersuchungen und fehlerhafte Bewertungen von detektierten Merkmalen führen zu falschen Schlussfolgerungen.

Ein Beispiel hierfür ist ein durch metallografische Untersuchungen in einem externen Labor detektierter chemischer Angriff der Oberfläche im Verzahnungsbereich eines einsatzgehärteten Zahnrades. Rasterelektronenmikroskopisch dokumentiert wurde die Schädigung der Zahnfußoberfläche als Lochkorrosion mit einer Ausdehnung von ca. 15 µm Werkstofftiefe bewertet (Bild 1, links). Das tatsächliche Erscheinungsbild von Lochkorrosion (Bild 1, rechts), wie in [5] dargestellt, zeigt jedoch eine muldenförmige Ausprägung mit ca. 150 µm Tiefe. Vielmehr handelt es sich bei der in dem Untersuchungsbericht als Schadensursache dargestellten Lochkorrosion, um eine an den Korngrenzen verlaufende Randoxidation. Ein Abgleich mit den Zeichnungsangaben hätte ergeben, dass die durch die Einsatzhärtung prozessbedingte Randoxidation bis zu einer Werkstofftiefe von 30 µm zulässig ist, da der Zahnfußbereich nicht mehr mechanisch nachbearbeitet wurde. Beim Hersteller hat diese Fehlinterpretation und die daraus abgeleiteten Maßnahmen hinsichtlich des Korrosionsschutzes zu hohen Aufwänden und zur Beauftragung von zusätzlichen Analysen geführt. Die in großer Stückzahl verbauten Bauteile fielen weiterhin in regelmäßigen Abständen aus und erzeugten weitere Kosten aufgrund von Systemausfällen und Reparaturen. Eine im Materiallabor der IABG durchgeführte systematische Schadensanalyse ergab, dass der tatsächlich vorliegende Schadensmechanismus auf einen abrasiven Ver-

schleiß der Zahnflanken zurückzuführen ist, dessen Ursache schnell, effektiv und nachhaltig beseitigt werden konnte.



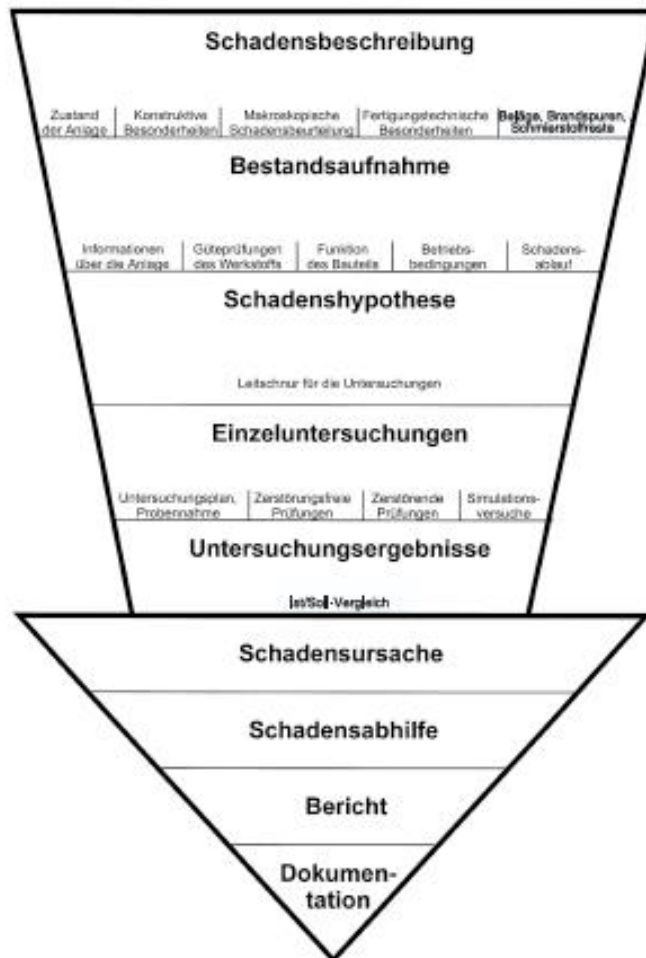
**Bild 1: Randoxidation mit 15 µm Tiefe (links) versus Lochkorrosion [5] mit 150 µm Tiefe (rechts)**

In einem anderen Fall wurden aufwendige chemische Analysen durchgeführt, um die Zusammensetzung eines Bauteiles aus faserverstärktem Kunststoffes festzustellen, welches unter geringer Beanspruchung durch Rissbildung versagte. Hier wurde anschließend ein Soll/Ist-Vergleich mit der vorgegebenen Spezifikation durchgeführt. Da alle Angaben im Bereich der Sollwerte lagen, wurde im Bericht vermerkt, dass die Schadensursache nicht aufklärbar ist. Eine Bruchflächenanalyse an einem aufgebrochenen Riss mit der Detektion der makro- und mikroskopischen Bruchmerkmale hätte aufgezeigt, dass die Risse an herstellprozessbedingten Hohlräumen initiiert wurden und die Schadensursache in den fehlerhaften Prozessparametern begründet ist.

Beide Beispiele zeigen Fehlinterpretationen bezüglich des Schadensmechanismus, die darauf zurückzuführen sind, dass Befunde nicht zutreffend interpretiert, Randbedingungen nicht berücksichtigt oder ungeeignete Untersuchungsmethoden gewählt wurden. Eine korrekte Beurteilung auf Basis geeigneter Untersuchungsmethoden, die die möglichen Schadensmechanismen zuverlässig belegen oder ausschließen können, hätte in beiden Fällen zu einer wesentlich früheren Feststellung des Schadensmechanismus geführt, so dass frühzeitig die Ursache erkannt und geeignete Abhilfemaßnahmen hätten ergriffen werden können. Dies belegt die Wichtigkeit eines systematischen Vorgehens in der Schadensanalyse, das im Folgenden an einem Fallbeispiel erläutert werden soll.

### **Systematische Schadensanalyse nach VDI Richtlinie 3822**

Zur Vermeidung solcher Fehler zeigt die VDI Richtlinie 3822 [4] eine systematische Vorgehensweise auf, die für eine effektive Bearbeitung der durchzuführenden Untersuchungen erforderlich ist. Die unterschiedlichen Schadensarten sind hier einheitlich benannt und entsprechend beschrieben, was die deutliche Zuordnung von Analyseergebnissen wesentlich vereinfacht. Weiterhin weist die Richtlinie auf das Erfordernis einer einheitlichen und stringenten Dokumentation der Ergebnisse hin, um eine laborübergreifende Vergleichbarkeit von Schadensanalysen zu gewährleisten. Bevorzugt gilt sie für Schäden an metallischen Bauteilen, die durch ein Versagen während des Betriebs entstehen. Die Systematik der Vorgehensweise ist jedoch auf andere Werkstoffe und auch auf Schäden aus Herstellung, Transport, Lagerung etc. übertragbar und nachfolgend bildlich in Form eines Pfeils dargestellt.



**Bild 2: Systematische Schadensanalyse nach VDI-Richtlinie 382 – Der Schadenspfeil [4]**

Der Beginn jeder Schadensanalyse besteht in der Beschreibung des Schadensereignisses. Hierzu ist es erforderlich, eine Dokumentation des Schadens in Form einer makroskopischen Abbildung oder Skizze vorzulegen. Meist handelt es sich um eine in ein System eingebundene und während des Betriebs ausgefallene Komponente, beaufschlagt mit aus Betriebsparametern resultierenden oder konstruktiv bedingten Lasten. Informationen zum Zustand der Anlage, die Sicherstellung etwaig vorhandener Beläge und Schmierstoffreste sowie konstruktive wie fertigungstechnische Besonderheiten sind für eine Beschreibung des Schadens wichtig [4].

### **Fallbeispiel gebrochene Zylinderschrauben**

Am Beispiel eines realen Schadensfalls werden im Folgenden die einzelnen Schritte einer systematischen Schadenanalyse nach VDI Richtlinie 3822 vorgestellt. Dabei wird streng der vorgeschriebene Ablauf eingehalten und besonderer Wert gelegt auf: die korrekte Unterscheidung von Schadensmechanismus, Schadenshergang und Schadensursache.

### **Schadensbeschreibung**

Untersucht werden im Einsatz gebrochene M 6-Zylinderschrauben mit einem 180 mm langen Schaft und einem Innensechskant-Kopf. Nach einem aus Kostengründen veranlassten Wechsel des Unterlieferanten traten vermehrt Ausfälle der Schrauben im Betrieb auf. Es wurde festgestellt, dass Schraubenköpfe „abplatzen“ und die zu fixierenden Funktionskomponenten gelockert werden, was zu einem hohen Risiko

einer sekundären Schädigung im Fahrzeug führt. Durch eine vergleichende Schadensanalyse von Gut- und Schadteilen soll nun die Schadensursache ermittelt werden, um gezielte Maßnahmen zur Abhilfe ergreifen zu können.

### **Bestandsaufnahme**

Die in großer Stückzahl verbauten Standardschrauben dienen in einer Automotive-Anwendung als Halteschrauben und sind im Wesentlichen auf Zug beansprucht. Auf Grund des anwendungsbedingten Risikos eines Angriffs durch Korrosion wurden sie in der verzinkten Ausführung bestellt. Die verwendeten Schrauben wurden mit der Festigkeitsklasse 10.9 spezifiziert, ohne eine entsprechende Vorgabe zur Werkstoffzusammensetzung.

### **Schadenshypothese**

Die festgestellten Schraubenbrüche traten unabhängig vom Fahrzeugtyp und etwaigen Umwelteinflüssen bereits innerhalb weniger Tage nach der Montage auf. Die Brüche fanden ausschließlich bei Schrauben aus der ersten Charge des neuen Lieferanten im Übergang von Schaft zu Schraubenkopf statt. Es wird vermutet, dass es sich um Einflüsse handelt, die aus der Herstellung stammen.

### **Untersuchungsplan**

Vor Beginn der Untersuchungen werden unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung und aller verfügbaren Informationen die erforderlichen Analysemethoden festgelegt und in einem Untersuchungsplan dargestellt. Dieser sieht zunächst eine makroskopische Dokumentation der Prüflinge im Anlieferungszustand vor. Eine metallografische Untersuchung an Querschliffen aus den schadensrelevanten Schraubenbereichen soll eventuell vorhandene mikrostrukturelle Unterschiede zwischen Gut- und Schadteilen aufzeigen. Die Morphologie der Schichten und Oberflächen, etwaig vorhandene Fehlstellen und Inhomogenitäten sowie die jeweilige Gefügeausbildung und die Ermittlung der Werkstoffhärte bilden den Fokus der lichtmikroskopischen Untersuchung. Die freiliegenden Bruchflächen werden auf ihre makroskopischen und mikroskopischen Bruchmerkmale hin fraktografisch untersucht. Des Weiteren wird die chemische Zusammensetzung des Schraubenwerkstoffes analysiert und im Soll/Ist-Vergleich bewertet.

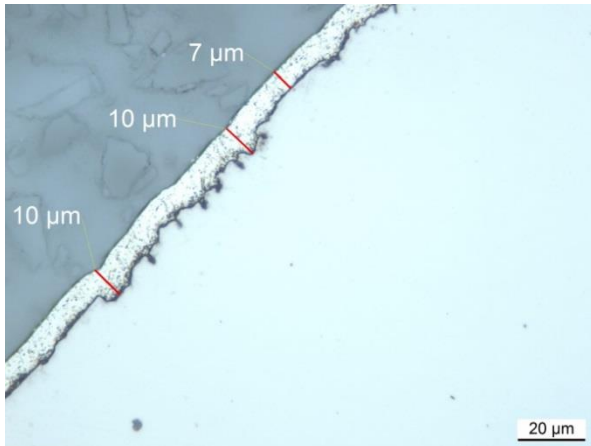
### **Methode - Makroskopie**

Auf Grund der geringen Abmessungen der Bruchflächen erfolgte die Untersuchung der makroskopischen Bruchmerkmale im Rasterelektronenmikroskop. Die Schrauben weisen makroskopisch glatte Bruchoberflächen auf, die zur Querschnittsmitte hin etwas rauer werden (Bild 9). Die Bruchebene verläuft jeweils 90° zur Schraubennachse direkt unterhalb des Schraubenkopfes.

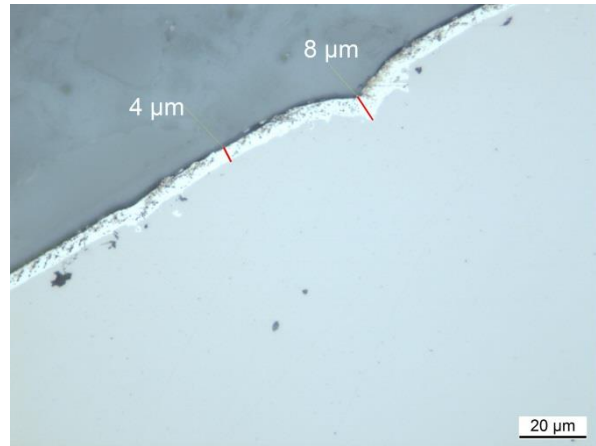
### **Methoden - Metallografie**

Die lichtmikroskopische Untersuchung der als Querschliff präparierten Schraubenteilstücke erfolgte sowohl im ungeätzten, als auch geätzten Zustand. Gut- und Schadteil unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der Schichtdicken der Zinkbeschichtung und der jeweiligen Diffusionszonen voneinander. Die gemessenen Schichtdicken betragen zwischen 7 und 10 µm am Gutteil, während am Schadteil etwas geringere Schichtdicken mit Werten zwischen 4 und max. 8 µm gemessen wurden (Bild 3 und Bild 4). Die Diffusionszone ist am „Gutteil“ durch eine verzahnte, schwärzlich ausgeprägte Fe/Zn Zone gekennzeichnet, während die Zinkschicht am

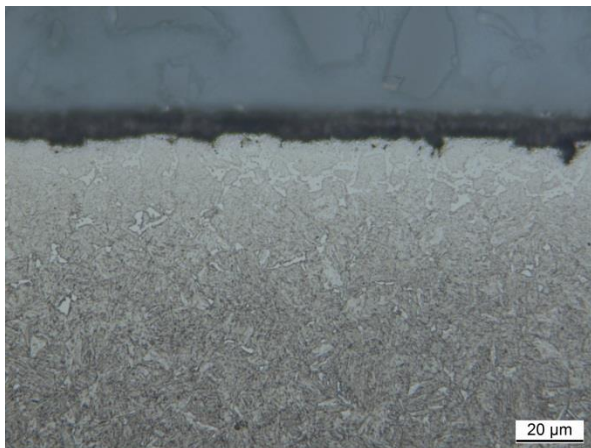
Schadteil direkt ohne erkennbare Zwischenzone an die Stahloberfläche anschließt. Im geätzten Zustand wurde ein Vergütungsgefüge festgestellt, welches im Gutteil (Bild 7) etwas feiner strukturiert ist, als im Schadteil (Bild 8). Des Weiteren weist der Schadteilquerschliff über den Umfang verteilte, muldenförmige Ausbuchtungen der Schraubenoberfläche auf, die einen muldenförmigen chemischen Angriff darstellen (Bild 6).



**Bild 3: Gutteil – Zinkschicht im Querschliff**



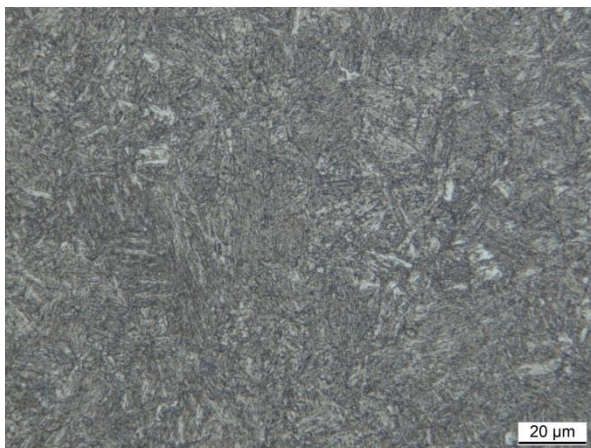
**Bild 4: Schadteil – Zinkschicht im Querschliff**



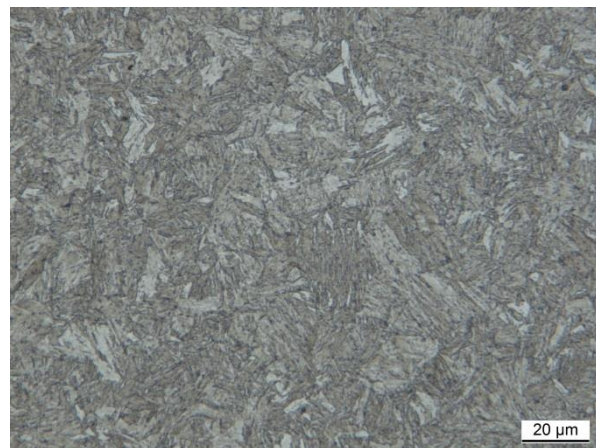
**Bild 5: Gutteil – Substratoberfläche mit leichten Aufrauungen**



**Bild 6: Schadteil – Substratoberfläche mit chemischen Angriff**



**Bild 7: Gutteil – Kerngefüge, Bainit**



**Bild 8: Schadteil – Kerngefüge, Bainit**

## Methode - Härteprüfung

Die nach Vickers HV1 [7] ermittelten Kernhärten ergeben einen Mittelwert von 357 HV1 für das Gutteil und 369 HV1 im Schadteil. Eine Umwertung der Ergebnisse nach Norm [8] ergeben Zugfestigkeiten von 1128 MPa für das Gutteil und 1159 MPa am Schadteil.

## Methode - Chemische Werkstoffanalyse

Über eine funktenspektrometrische Analyse wird die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe eines „Gutteils“ und eines Schadteils bestimmt. Die ermittelten Werte korrespondieren bei beiden Proben mit dem eines 19MnB4 (Wst.-Nr. 1.5523) Werkstoffes.

## Methode - Fraktografie

Die Übersicht der Bruchoberfläche zeigt drei durch ihr Erscheinungsbild zu unterscheidende Bruchbereiche auf (Bild 9). Ein sich über den halben Umfang erstreckender Bruchflächenbereich (a) besitzt eine Tiefenausdehnung von ca. einem Millimeter und weist eine glatte Struktur auf. Er ist gekennzeichnet durch mehrere am Außendurchmesser radial orientierte Bruchausgänge (rote Linien in Bild 9) und einer vorwiegend interkristallin ausgebildeten Bruchstruktur mit vereinzelt auftretenden, transkristallin gebrochenen Körnern (Bild 10). Bei höherer Vergrößerung werden weitere mikroskopische Bruchmerkmale, wie aufgeweitete Korngrenzen, aufgeraute Kornflächen und Mikroporen sichtbar (Bild 11). Die Ausprägung duktiler Waben in einer etwas rauer erscheinenden Struktur wurde in der zweiten Bruchzone (b) festgestellt, die den größten Flächenanteil aufweist (Bild 12). Diese bildet zusammen mit dem schmalen, glatt ausgeprägten Saum des dritten Bruchbereiches (c) den Restgewaltbruch, der ungefähr 80 Prozent der Bruchfläche umfasst.

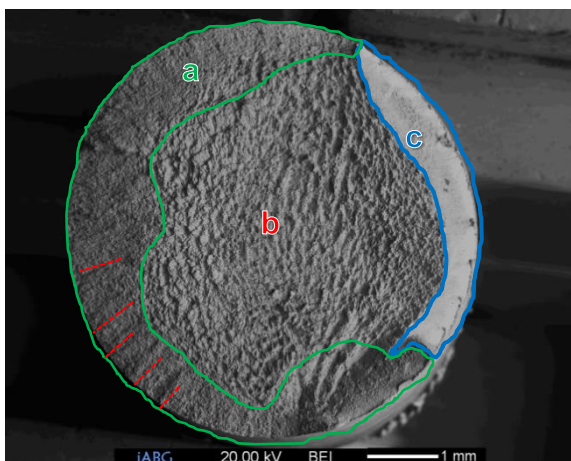


Bild 9: Schadteil – Bruchzonen (a, b, c)

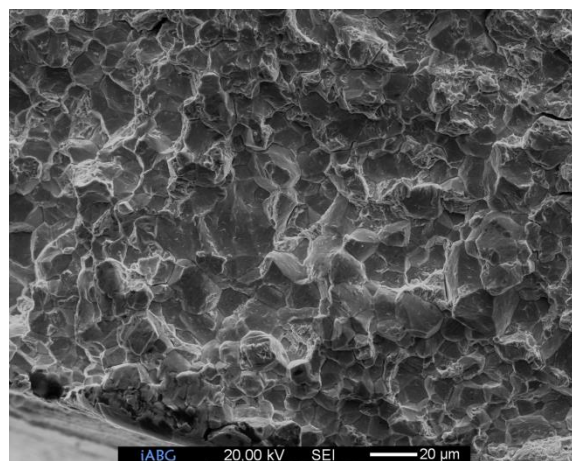
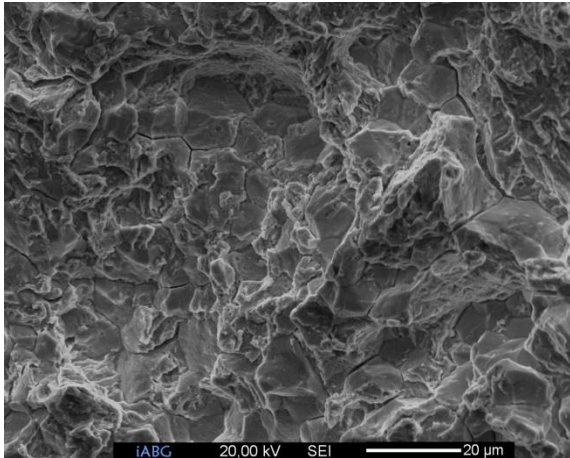
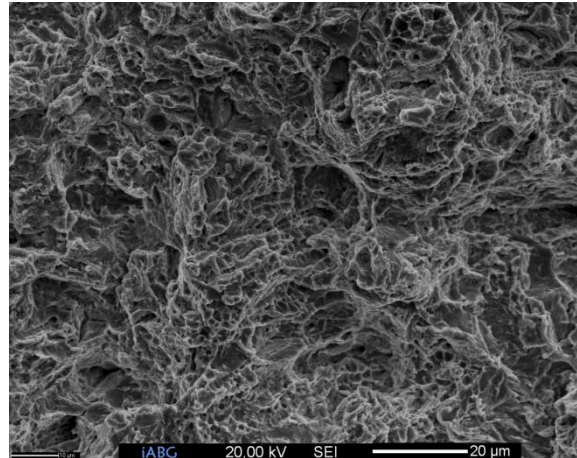


Bild 10: Schadteil – interkristalline Bruchstruktur



**Bild 11: Bruchbereich mit Versprödung**



**Bild 12: Restgewaltbruch mit Wabenstruktur**

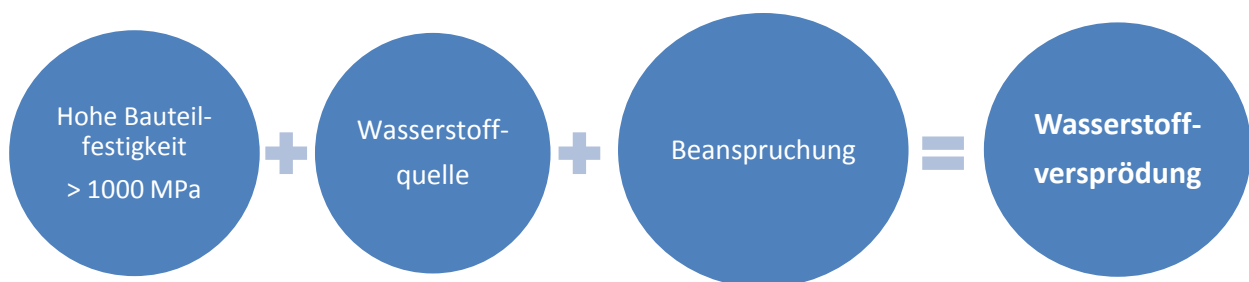
### Schadensbewertung – Mechanismus

Die Bruchfläche ist gekennzeichnet durch ein makroskopisch glattes Erscheinungsbild. Klaffende Korngrenzen, mikroductile Kornflächenanteile (Krähenfüße) und Mikroporen auf den Kornflächen sind die gegebenen mikroskopischen Bruchmerkmale. Die metallografische Untersuchung ergab außer einer gegenüber dem Gutteil leicht vergrößerten Ausbildung des Vergütungsgefüges zudem einen muldenförmigen, chemischen Angriff der Schadteil Oberflächen. Mit Hilfe der chemischen Analyse konnten beide Schrauben einem 19MnB4 Werkstoff zugeordnet werden, welcher korrespondierend mit den gemessenen Werten für die Härte und der Gefügestruktur in einem vergüteten Zustand vorliegt. Die aus den Härtewerten umgewerteten Festigkeiten zeigen, dass die geforderte Zugfestigkeit der Klasse 10.9 von nominal 1000 MPa [10] für beide Fälle mit 1128 MPa und 1159 MPa gegeben bzw. überschritten ist. Damit zählt der verwendete vergütete Schraubenwerkstoff bereits zu den höherfesten Stählen. Alle detektierten mikroskopischen Bruchmerkmale weisen auf den Schadensmechanismus der Wasserstoffversprödung [6] hin.

Die untersuchte Schädigung an den gebrochenen Zylinderkopfschrauben ist dem Schadensmechanismus des wasserstoffinduzierten verzögerten Sprödbruchs zuzuordnen.

### Abgeleiteter Schadenshergang

Für das Auftreten des Schadensmechanismus der Wasserstoffversprödung müssen folgende Voraussetzungen gegeben sein:



**Bild 13: Korrosionssystem der Wasserstoffversprödung**

Bei den vorliegenden Schrauben kommt es im Fertigungsprozess beim Beizen in Mineralsäuren, bei der kathodischen elektrolytischen Reinigung sowie bei der elektrolytischen Verzinkung zu Wasserstoffentwicklung. Dabei handelt es sich in allen Fällen um eine kathodische Reduktion [13]. Wenn die kathodische Metallabscheidung von der kathodischen Wasserstoffabscheidung überlagert ist, entsteht als Zwischenprodukt atomarer Wasserstoff, der mit einem definierten Bedeckungsgrad als Adsorptionsschicht auf der Metalloberfläche vorliegt. Aus dieser Adsorptionsschicht wird atomarer Wasserstoff in das Metallinnere (Substrat) absorbiert ( $H_{ad} \rightarrow H_{ab}$ ). Dort finden komplexe lokale Wechselwirkungen, ein Zusammenwirken von chemischen, kinetischen, thermodynamischen und metallkundlichen Prozessen mit sogenannten Fallen auf, welche die Festigkeitseigenschaften wesentlich beeinflussen [11]. Gitterleerstellen, Versetzungen, Poren und Lunker wirken hierbei häufig als Wasserstoff-Fallen. Wasserstoff reichert sich an elastisch aufgeweiteten Gitterebenen an und lagert sich als Fremdatom auf Zwischengitterplätzen ein. Die Kohäsionskräfte des Gitters werden deutlich gesenkt, wodurch Versprödungseffekte auftreten und unter äußeren oder inneren Zugspannungen Risse entstehen, die in Konsequenz zu einem Versagen des Bauteils führen [6].

### **Schadensbewertung – Ursache**

Ungünstige Prozessparameter bei der Vorbehandlung der galvanisch beschichtenden Schrauben wie zum Beispiel eine zu lange Einwirkdauer der Beizlösung und/oder ein nicht vollständiges Abreinigen der Beize wurde als mögliche Schadensursache abgeleitet. Des Weiteren kann eine fehlerhafte Prozessführung während der Galvanisierung der Auslöser für eine Wasserstoffabscheidung auf der Metalloberfläche sein [10]. Einzeln oder auch in Kombination auftretend führten diese Einflüsse zusammen mit den äußeren Zugspannungen zur Schädigung durch Wasserstoffversprödung der Schraubenrandzone im verbauten Zustand. Aufgrund der vorliegenden hohen Festigkeitsklasse sind bereits geringste Mengen an Wasserstoff (ca. 2 ppm) ausreichend, um eine Schädigung auszulösen.

### **Abhilfemaßnahmen**

Bauteile, die von einer reversiblen Wasserstoffversprödung betroffen sind, können durch einen Diffusionsglühprozess regeneriert werden. Die Effusion des im Metallgitter vorliegendem Wasserstoffes erfolgt bei einer Temperatur von ca. 210°C über eine je nach Bauteiloberfläche einstellbare Zeitdauer von > 30 min. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass Beschichtungen je nach Struktur, Dicke und Homogenität als Diffusionssperren wirken können [12]. Aus diesem Grund wird ein Nachweis über eine unkritische Wasserstoffkonzentration durch einen Verspannungsversuch (Zeitstandversuch mit 80% Vorspannung) der Schrauben empfohlen. Des Weiteren kann der Restgehalt an Wasserstoff analytisch bestimmt werden.

### **Schadensprävention**

Um das Risiko einer Wasserstoffschädigung zu verringern oder gänzlich zu vermeiden, muss korrigierend in den Beschichtungsprozess eingegriffen werden. Die zu beschichtende Bauteile dürfen keine Werkstoff-, Bearbeitungs- und Oberflächenfehler enthalten, die den Korrosionsschutz und/oder das Aussehen der Überzüge ungünstig beeinflussen [10]. Allgemein sollte der Bedeckungsgrad mit atomarem Wasserstoff bei den Prozessschritten Beize, elektrolytische Entfettung und Verzinkung möglichst klein und die Expositionszeiten jeweils so kurz wie möglich gehalten sein [13]. Eine unmittelbar an die Beschichtung angeschlossene Warmbehandlung führt



zu einer Effusion von atomarem Wasserstoff an der Phasengrenze Zink/Substrat und stellt damit einen zwingend durchzuführenden Nachbehandlungsschritt an höher- und hochfesten Schrauben dar, um einer Versprödung entgegenzuwirken.

Zinklamellenbeschichtungen eignen sich als alternative Schichtsysteme. Anders als beim Verzinken wird die Zinkschicht nicht elektrolytisch aufgebracht, wodurch auch keine Beladung durch Wasserstoff erfolgen kann. Die 4 - 15 µm dicken Schichten bieten einen kathodischen Schutz des Substrats gegen Korrosion [14].

### **Qualitätssicherungsmaßnahmen**

Durch Parameteroptimierung mit einer anschließenden Verspannungsprüfung der verzinkten Schrauben und einer metallografischen Untersuchung an Querschliffen kann ein reproduzierbarer Beschichtungsprozess sichergestellt werden.

### **Schadensgutachten**

Nach Abschluss aller im Untersuchungsplan vorgesehenen Untersuchungen und Analysen werden die relevanten Ergebnisse in einem Schadensgutachten zusammengefasst und entsprechend bewertet. Hier müssen alle projektrelevanten Daten, wie Auftraggeber, Untersuchungsobjekte, eingesetzte Anlagen, Kalibrierungen, zu berücksichtigende Normen und Spezifikationen sowie die beteiligten Bearbeiter vermerkt sein. Bei der Bilddokumentation ist auf räumliche Zuordnung der Detailbilder im gesamten Untersuchungsobjekt inkl. Angabe des Maßstabs bzw. der Vergrößerung sowie eine logisch aufgebaute und strukturierte Abfolge zu achten. Der daran anschließende Textteil wird von einer Beschreibung der Ausgangssituation, den Randbedingungen und der abgestimmten Aufgabenstellung mit den geplanten Untersuchungsmethoden angeführt. Makroskopische Aufnahmen der Untersuchungsobjekte im Anlieferungszustand ermöglichen eine eindeutige Darstellung der Ausgangssituation, die Zuordnung zu Untersuchungsbereichen und der Probenentnahmepositionen. Anschließend erfolgt eine strukturierte Aufstellung der durchgeführten Teiluntersuchungen mit einer Beschreibung der Probenentnahme, etwaiger Präparationsschritte und Besonderheiten. In der Ergebnisdarstellung ist es erforderlich, die vorliegenden Fakten in Form von detektierten Merkmalen und in Bezug zu der entsprechenden Bilddokumentation zu beschreiben und ohne eine Bewertung vorzunehmen.

Unter den Teilabschnitten der Untersuchungsdurchführung werden ausschließlich nachweisbare Tatsachen festgehalten, die in der Zusammenfassung unter Berücksichtigung aller vorliegenden Angaben und nach Durchführung von Soll/Ist-Vergleichen in Schlussfolgerungen umformuliert werden. Daraus folgen die Bestimmung des vorliegenden Schadensmechanismus und die Ableitung möglicher Schadensursachen als zwingend erforderliche Angaben einer abschließenden Schadensbewertung, die Ziel und Absicht einer Schadensanalyse ist. Es wird aufgezeigt, ob eine Schädigung Folge von Auslegung und Konstruktion ist, durch Herstell- und Fertigungsverfahren verursacht wurde oder aus ungünstigen Betriebsparametern resultieren. Nicht selten sind es unterschiedliche Kombinationen aus den genannten Bereichen, die zu einem Versagen führen. Zusätzliche Aspekte wie die Definition von Abhilfemaßnahmen, Empfehlungen hinsichtlich Schadensprävention und etwaiger qualitätssichernder Empfehlungen bilden je nach Anforderung und Aufgabenstellung den Abschluss des Gutachtens.

## Nutzen einer Schadensanalyse

Das Ergebnis einer systematischen Schadensanalyse stellt eine Bewertung des Schadensereignisses dar und ist eine wichtige Grundlage, um gezielte Maßnahmen zur Verbesserung eines Systems zu definieren und Wiederholungsschäden zu vermeiden. Neben den Hinweisen zu Abhilfemaßnahmen und Schadensprävention können die Ergebnisse verwendet werden, um korrigierend in die Entwicklungs- und Herstellkette des Bauteils einzugreifen. Aufgedeckte Schwachstellen können zukünftig in Qualitätssicherungsvorschriften und Spezifikationen berücksichtigt werden. Aufgeklärte Schäden führen des Weiteren zu einem vertieften Systemverständnis und damit zu einer erhöhten Sensibilität für mögliche Einflussparameter und deren Auswirkungen. Prozesse können zielgerichtet überwacht und die Sicherheit eines Systems erhöht werden. Eine stringente Vorgehensweise, die zu verlässlichen Ergebnissen und verbindlichen Aussagen führt, sorgt dafür, dass der Wert einer Schadensexpertise ihren Aufwand bei weitem übersteigt.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausführungen zeigen, dass systematische und fundierte Schadensanalysen einen Mehrwert für alle von Schadensereignissen betroffenen Bereiche der Industrie bedeuten. Es zeigt sich bislang häufig, dass eine unstrukturierte Vorgehensweise, die Vernachlässigung in der Einhaltung der definierten Nomenklatur hinsichtlich Begriffen und Mechanismen, sowie fehlerhafte Bewertungen zu Verständigungsschwierigkeiten führen, die einer „Sprachverwirrung“ babylonischem Ausmaßes gleichkommt. Besonders die Begriffe Mechanismus, Hergang und Ursache eines Schadens werden so beliebig verwendet, dass es oft schwerfällt, den wahren Sinn hinter den Worten zweifelsfrei zu erkennen.

Durch die Einführung einer gemeinsamen Sprache und Vorgehensweise hat die VDI Richtlinie 3822 den Grundstein für eine klare Verständigung mit geringem Aufwand durch Reibungsverluste gelegt. Die gewonnenen Erkenntnisse und freigewordenen Energien können gezielt in die Ursachenbeseitigung einfließen, wodurch Schadensfolgekosten und Schadensraten gesenkt werden. Vielleicht entsteht dadurch so viel Freiraum zur Bearbeitung der wichtigen Fragen, dass sogar der Turmbau zu Babel vollendet werden kann.

## Literatur

- [1] [http://www.dechema.de/19\\_2011+Weltkorrosionstag+2011-p-123972.html](http://www.dechema.de/19_2011+Weltkorrosionstag+2011-p-123972.html), 21.04.2011
- [2] Schädigung In: WAHRIG.digital - Deutsches Wörterbuch, Wissen Media Verlag GmbH, Gütersloh/München, 2005
- [3] G. Lange und M. Pohl, Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle, März 2014, Wiley-VCH Verlag Co, Weinheim, S. 7-12
- [4] VDI Richtlinie 3822 Schadensanalyse Grundlagen, Begriffe, Definitionen, Ablauf einer Schadensanalyse (März 2004), Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- [5] VDI Richtlinie 3822 Schadensanalyse, Blatt 3, Schäden durch Korrosion in Elektrolyten (März 2007), Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- [6] Erscheinungsformen von Rissen und Brüchen metallischer Werkstoffe, Verein deutscher Eisenhüttenleute, 1996, Verlag Stahl Eisen GmbH, Düsseldorf, S. 6, 69-74

- [7] DIN EN ISO 6507-1, metallische Werkstoffe, Härteprüfung nach Vickers, 2006-03, Beuth Verlag GmbH
- [8] DIN ISO 18265, Tabelle B2, metallische Werkstoffe, Umwertung von Härtewerten, 2014-02, Beuth Verlag GmbH
- [9] DIN EN ISO 898-1:2013-05, Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde, Beuth Verlag GmbH, Seite 13
- [10] DIN EN ISO 2081:2009-05, Galvanische Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlicher Behandlung, Beuth Verlag GmbH
- [11] Kaesche: Die Korrosion der Metalle, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990, S. 364 – 375
- [12] Prof. Dr.-Ing. M. Pohl, Wasserstoff in metallischen Bauteilen, 39. Jahrestagung Schadensanalyse, 8.-9. Oktober 2013, Würzburg
- [13] Rolf Jansen und Patricia Preikschat Technischer Brief 08 Wasserstoffversprödung, 3. Auflage, Januar 2016, SurTec, Zwingenberg
- [14] DIN EN ISO 10683:2014-10, Nichtelektrolytisch aufgetragene Zinklamellenüberzüge, Beuth Verlag GmbH