

Die Schraube im Wandel der Zeit

**Dr. Ingo Klüppel, Dr. Marcel Roth
Dörken MKS-Systeme GmbH & Co. KG**

Zusammenfassung

Schrauben sind bereits seit dem 3. Jahrhundert v. Chr. bekannt. Eine der bekanntesten Anwendungen ist dabei die archimedische Schraube zum Pumpen von Wasser. Die Verwendung als Befestigungsschraube kam erst im 15. Jahrhundert auf. Mittlerweile ist die Schraube aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken (1).

Dabei spielt der Korrosionsschutz, der größtenteils aus Stahl gefertigten und anschließend verzinkten Schrauben, eine wichtige Rolle. Im Zuge der immer kritischeren Gesetzgebung und dem Wunsch nach umweltverträglicheren Systemen wird verstärkt an Cr(VI)- und Co-freien Passivierungstechnologien für verzinkte Schrauben gearbeitet. Hier zeigen zweischichtige Passivierungen auch in der mechanisch stark belasteten Massenschüttgutfertigung hervorragende Korrosionsschutzergebnisse.

Stichworte

Verzinkung, Korrosionsschutz, Passivierungssysteme, Schraube, Massenschüttgut

Einleitung

Schrauben befinden sich bereits seit zwei Jahrtausenden in der Verwendung und sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. In früheren Zeiten zum Pumpen (archimedische Schraube) oder Bewegen von Lasten (Weinpressen, etc.) in Verwendung, dienen sie aktuell hauptsächlich als Befestigungselement mit einer hohen technischen Anforderung (1). Diese Anforderungen umfassen die Festigkeit, hauptsächlich beeinflusst durch die Substratlegierung und die Schraubengeometrie, die Korrosionsbeständigkeit, beeinflusst durch das Beschichtungssystem und die Verarbeitungseigenschaften beim Verschrauben, beeinflusst durch die oberste Beschichtungsschicht und die Gegenlage, in die verschraubt wird. Die gesetzlichen Bestimmungen erfordern gerade bei den Beschichtungssystemen in den letzten Jahren ein grundlegendes Umdenken. Für die weitverbreiteten Cr(VI)-basierten Korrosionsschutzkonzepte werden Alternativen entwickelt die aktuell auf Cr(III)- und oftmals auch Kobalt basieren. Auch diese Alternativen können nur Übergangslösungen darstellen, da Cr(III) über Cr(VI) hergestellt wird und die Basischemikalien bzw. die eingesetzten Salze als ähnlich kritisch zu betrachten sind wie die reinen Cr(VI)-Systeme.

Historie der Schraube

Die bekannteste Anwendung ist die archimedische Schraube [Abb. 1] zum Pumpen von Wasser (3. Jahrhundert v. Chr.). Weiter Anwendungen waren Holzschrauben in z.B. Weinpressen. Grundsätzlich handelte es sich bei allen Schrauben um Einzelfertigungen, die durch Schnitzen und Feilen hergestellt wurden. Aufgrund der eingeschränkten Werkzeuge konnten nur weiche, leicht zu bearbeitende Materialien verwendet werden. Die erzeugten Schrauben wiesen keine hohe Festigkeit auf.

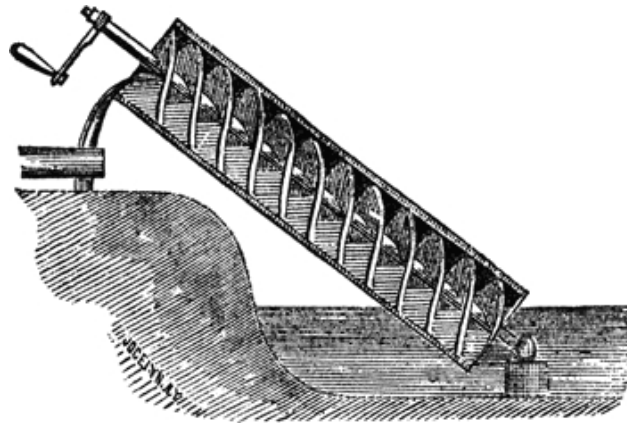


Abb. 1: Archimedische Schraube zum Pumpen von Wasser (1)

Im Mittelalter wurde erstmals die Schraube im größeren Umfang als Befestigungsschraube, so wie wir sie heute kennen, bei Rüstungen eingesetzt. Hierbei kamen Stahlschrauben zum Einsatz die durch Schmiede als Einzelstücke angefertigt wurden. Der Stahl wurde während der Fertigung gehärtet und mit der Schraube das Gegengewinde geschnitten (2).

Die industrielle Revolution und die damit verbundene Verbreitung der Dampfmaschinen erforderte viel höhere Stückzahlen, die durch Einzelanfertigungen nicht mehr abgedeckt werden konnten. Erste Maschinen zur Schraubenherstellung wurden gefertigt, aber jede Schraubenfabrik hatte ihr eigenes Gewinde entwickelt. Das erste genormte Gewinde war das Whitworth 1841 in England. Weitere internationale Normungen entstanden durch die Alliierten in den beiden Weltkriegen, um die Fertigung von Rüstungsgütern und deren Kompatibilität in verschiedenen Ländern zu gewährleisten. Mittlerweile existieren eine Vielzahl von Normen im Bereich der Gewinde, Festigkeiten und Korrosionsschutzüberzüge.

Schraubenherstellung

Die Schraubenherstellung erfolgt heutzutage größtenteils voll automatisiert im Kaltießpressverfahren. Dabei kommt Draht zum Einsatz, der auf die entsprechende Länge geschnitten und dann in mehreren Schritten umgeformt wird [Abb. 2]. Die Umformung beginnt mit dem Prägen des Schraubenkopfes. Anschließend wird der Schaft geformt und das Gewinde gewalzt. In der Regel schließt sich an den Schraubenfertigungsschritt noch ein Härtungsschritt an. Mittels dieses Verfahrens können Schrauben bis zu einer Größe von ca. M 36 hergestellt werden.



Abb. 2: Herstellungsschritte der Schraube vom Drahtabschnitt bis zum fertigen Produkt

Schrauben oberhalb von M 36 werden durch das Warmpressverfahren hergestellt. Dabei wird der abgelängte Rohling auf Schmiedetemperatur erwärmt und anschließend umgeformt. Nach dem Abkühlen wird das Gewinde mittels zerspanenden Abtrags geschnitten. Hierbei sind Schraubengrößen bis ca. M 200 herstellbar.

Funktion und Einsatz von Schrauben

Für die Funktion einer Schraube -die Befestigung- sind das Gewinde und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs von entscheidender Bedeutung. Dabei nimmt das Gewinde der Schraube und des Gegenstücks die mechanische Haltekraft auf. Die Haftreibung zwischen diesen verhindert das Lösen der Schraube.

Während des Eindrehens wird die Schraube gedehnt. Hierbei darf das Anzugsmoment nur so groß sein, dass man sich noch im Bereich der elastischen Verformung befindet. Im Bereich der plastischen Verformung würde sich die Schraube dauerhaft verlängern und die auf das Gewinde aufgebrachte Haftreibung nimmt ab. Die sichere Verbindung ist damit nicht mehr gewährleistet.

Um das richtige Anzugsmoment beim automatischen Verschrauben zu gewährleisten, ist die Reibzahl der Schraubenoberfläche von entscheidender Bedeutung. Der Schraubroboter erkennt über das anliegende Drehmoment den Endpunkt des Schraubvorgangs. Nur wenn sich die Schraube gleichmäßig einschrauben lässt ist dieser sicher zu erkennen.

Schrauben finden nahezu in allen Bereichen des täglichen Lebens Anwendung und sind daher unverzichtbar. Dies spiegelt sich in der Größe der deutschen Schraubenproduktion wider, deren Schwerpunkt zusammen mit den entsprechenden Drahtzulieferern im Sauerland liegt. Die deutsche Schraubenproduktion lag 2014 bei ca. 808.000 Tonnen mit einem Umsatz von ca. 3,1 Mrd. € und einem Exportanteil von ca. 83% (3). Die größten Abnehmer sind die Automobilindustrie und deren Zulieferer.

Aktuelle Korrosionsschutzverfahren und Einstellung der Verarbeitungseigenschaften

Um die Funktion der Schraube über einen möglichst langen Zeitraum zu gewährleisten, ist es notwendig den eingesetzten Stahl vor Korrosion zu schützen. Hierfür wurde eine Vielzahl von Beschichtungsverfahren entwickelt. Einige dieser Verfahren zeichnen sich durch einen hervorragenden Korrosionsschutz aus, sind aber auf Grund der eingesetzten toxischen Inhaltsstoffe in die Kritik geraten.

Grundsätzlich kann man zwischen metallischen und nicht metallischen Überzügen unterscheiden. Bei den metallischen Überzügen sind das Verzinken (galvanisch und schmelztauchen) und das Verzinnen die bekanntesten und noch am häufigsten verwendeten Verfahren. Das Kadmieren ist auf Grund der starken Toxizität des eingesetzten Cadmiums weitestgehend aus der Anwendung genommen und findet nur noch vereinzelt im Flugzeugbau Verwendung.

Während die Verzinnung hauptsächlich in der Lebensmittelindustrie für Verpackungen Verwendung findet, wird die Verzinkung großtechnisch für den Korrosionsschutz der Schraube eingesetzt. Dabei wird der mit Abstand größte Teil mittels galvanischer Abscheidung verzinkt. Die eingesetzten Elektrolyte sind sauer bzw. alkalisch und mittlerweile weitestgehend cyanidfrei.

Saure Elektrolyte zeichnen sich durch ihre hohe Stromausbeute von über 95% und der hohen Abscheidegeschwindigkeit aus, zeigen allerdings einen ausgeprägten Knocheneffekt bedingt durch variierende Stromdichten aufgrund der Teilegeometrie. Dies bedeutet bei der Schraube eine hohe Schichtdicke in den Randbereichen und eine geringere im mittleren Bereich. Dagegen zeigen die aktuellen alkalischen Elektrolyte eine deutlich gleichmäßigere Schichtdickenverteilung aber eine geringere Stromausbeute. Dies hat weitere Nebeneffekte wie unter Umständen die aktive Badkühlung zur Folge.

Die Beschichtung erfolgt in der Regel bei kleineren Schrauben (< M 14) in Trommeln. Diese werden während der Abscheidung kontinuierlich gedreht, um eine möglichst gleichmäßige Beschichtung zu gewährleisten. Hierbei sind die Schrauben einer mechanischen Belastung

durch Reibung und Schlägen ausgesetzt. Aus diesem Grund werden größere Teile (> M14) in Gestellen verzinkt.

Bei fast allen Verzinkungsvarianten wird die Korrosionsbeständigkeit durch eine nachfolgende Passivierung verbessert. Hier kamen und kommen zum Teil noch heute sogenannte Chromatierungen zum Einsatz. Diese werden auf Basis ihrer Farbe in blau, gelb, oliv und schwarz Chromatierung unterteilt. Die Färbung ergibt sich aus Eigenfärbung und Interferenz determiniert durch die aufgetragene Schichtdicke. Daneben gibt es mittlerweile Cr(VI)-frei Varianten, bei denen oftmals Co-Salze zum Einsatz kommen, um den Korrosionsschutz zu erhöhen.

Für die Wirkungsweise der Cr(VI)-basierenden Passivierungsschicht wird ein Mechanismus mittels Selbstheilung diskutiert [Abb. 3]. Die Korrosion des Zinküberzuges und der dabei entstehende Wasserstoff initiiert die Reduktion des Chrom(VI) zu Cr(III) und führt zu einer pH-Werterhöhung was letztlich zur Ausfällung führt. Bei der Abscheidung bildet sich ein Gelfilm, der je nach Dicke unterschiedliche Verhältnisse an Cr(III) und Cr(VI) enthält. Die Ausfällungsprodukte sind Hydroxide, Oxide des Chroms und Zinks und Mischoxide aus Zink und Chrom. Die Selbstheilung wird über die Wiederauflösung des Cr(VI) und die anschließende Reduktion zum Cr(III) und die erneute Ausfällung als Hydroxid zu erklären versucht (4).

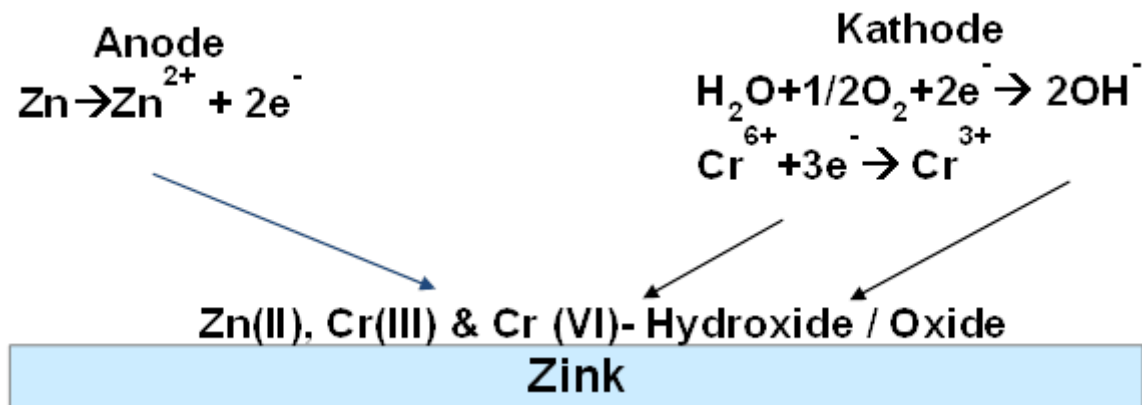


Abb. 3: Korrosionsschutzmechanismus auf Basis von Chrom(VI)-haltigen Passivierungssystemen

Die Cr(VI)-Passivierungen sind auf Grund ihrer Toxizität in die Kritik geraten. Da die Nutzung dieser Verbindungen in Zukunft stark eingeschränkt wird, gibt es eine Vielzahl von alternativen Entwicklungen. Diese basieren in der Regel auf Cr(III). Da hier der Selbstheilungsmechanismus entfällt, sind die Schichten deutlich empfindlicher und führen bei mechanischen Belastungen früher zum korrosiven Versagen. Um die Leistungsfähigkeit dieser Korrosionsschutzsysteme zu verbessern, werden oftmals Co-Salze eingesetzt.

Neben den bereits genannten Zinküberzügen fanden seit Mitte der 70er Jahre des vergangenen Jahrtausends sogenannte Zinklamellenüberzüge Verbreitung. Hierbei handelt es sich um eine synergetische Nutzung der Vorteile eines Lacksystems und von kathodisch wirksamen Zinklamellen [Abb. 4]. Dabei sind die Zinklamellen in einer maßgeschneiderten Bindemittelmatrix eingebunden. Durch die plättchenförmige Morphologie der Pigmente und einer kontrollierten Vernetzungsdichte des Bindemittels sowie einer optimalen Bindemittelanbindung an die Pigmente, wird der korrosive Angriff mittels einer Barrierschicht reduziert; dennoch ist der Füllgrad des System so hoch, dass die Zinklamellen elektrochemisch aktiv sind. Um den Korrosionsschutz dieser Systeme weiter zu steigern, wurden und werden zum Teil noch heute Cr(VI)- und Cr(III)-Verbindungen eingesetzt (5). Daneben gibt es bereits seit mehr als 30 Jahren auch Systeme, die höchsten Korrosionsschutz ohne den Einsatz von Cr(VI) oder Cr(III) gewährleisten (6) (7).

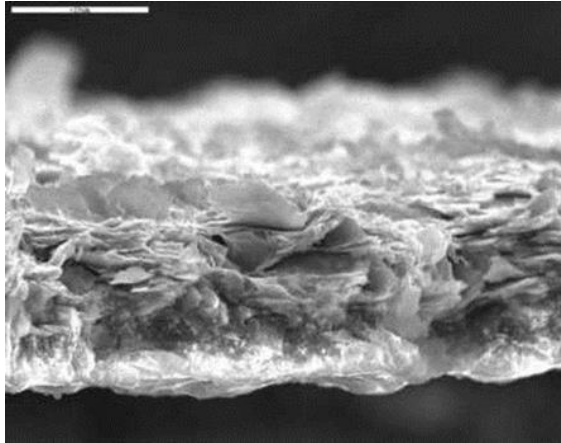


Abb. 4: REM-Querschliff einer Zinklamellenbeschichtung

Neben den metallischen und den hybridischen Zinklamellenüberzügen gibt es noch metallfreie Beschichtungen, bei denen es sich in der Regel um Lacküberzüge handelt. Dabei steht oftmals der dekorative Ansatz im Vordergrund. Nichtsdestotrotz bieten aber auch diese einen Korrosionsschutz für die Schraube. Der Lack stellt dabei eine Barrierschicht für den korrosiven Elektrolyten und insbesondere für Sauerstoff da. Darüber hinaus werden Lacke in der Regel mit verschiedensten Korrosionsschutzinhibitoren versehen. Auch hier kamen lange Zeit Cr(VI)-Verbindungen zum Einsatz, werden in den letzten Jahren aber vermehrt durch silikathaltige, umweltfreundlichere Systeme verdrängt.

Im Anschluss an die Korrosionsschutzschicht unabhängig ob diese aus einem metallischen Überzug oder einer Zinklamellenbeschichtung besteht wird oftmals ein Decklack / Topcoat appliziert. Aufgabe dieser Beschichtung ist es ein definiertes Reibzahlfenster einzustellen und somit die automatisierte Verschraubung sicher zu gewährleisten. Bei den Top Coat handelt es sich um Lacksysteme, bei denen mittels Wachs- und Teflonadditive die Gleiteigenschaften eingestellt werden.

Neue Passivierungskonzepte

Um den Anforderungen nach umweltverträglicheren Systemen gerecht zu werden, wurde eine Vielzahl von Entwicklungsaktivitäten angestoßen. Ziel war es die Cr(VI) und Co-haltigen Systeme zu ersetzen. In der Stahlindustrie finden chromfreie Systeme bereits seit mehr als 15 Jahren sowohl in der Vorbehandlung zu einer nachfolgenden Lackierschicht als auch zu Passivierung des Bandstahls ihren Einsatz.

Aufgrund der hohen mechanischen Belastung bei der Stückverzinkung und den damit einhergehenden Beschädigungen der Oberflächen haben diese Systeme bislang noch keine Akzeptanz im Bereich Massenschüttgut erhalten.

Speziell für die hier geforderten Eigenschaften nach erhöhter mechanischer Widerstandskraft wurden neuartige Zweischichtpassivierungssysteme entwickelt [Abb. 5]. Die erste Passivierungsschicht stellt dabei eine speziell weiterentwickelte Cr(III)-basierte Konversionschicht da. Hier wurde bewusst auf den Einsatz von Co-Salzen oder anderen toxischen Kationen verzichtet.

Die Applikation erfolgt wie bei galvanischen Massenschüttgutprozessen üblich in der Verzinkungstrommel, alternativ kann die Beschichtung auch in der Gestellanlage erfolgen. Anschließend erfolgen zwei Spülschritte und die Applikation der zweiten Passivierung. Die zweite Passivierungsstufe basiert dabei auf einer Silanchemie basierenden Formulierung. Diese kann bei Kleinteilen im Tauch-Schleuderverfahren oder bei größeren Teilen ebenfalls im Gestell beschichtet werden. Nach diesem Prozessschritt werden die Teile getrocknet. Ein weiterer Spülschritt entfällt an dieser Stelle.

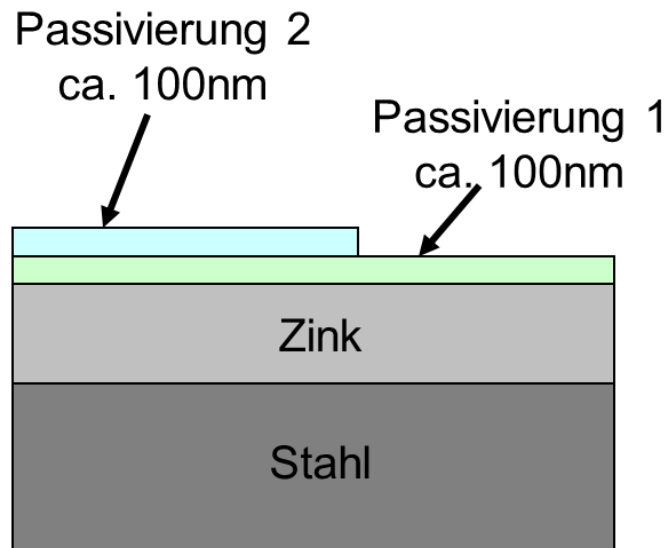


Abb. 5: Schematischer Aufbau einer Cr(VI)- und Co-freien Zwischichtpassivierung

Der abgeschiedene Schichtverbund ist mit ca. 200 nm nicht dicker als eine klassische Passivierung [Abb. 6]. Das GDOES-Tiefenprofil zeigt die Ausbildung der ersten Cr(III)-haltigen Passivierungsschicht im Bereich zwischen 100 und 200 nm. Darauf aufbauend ist die zweite, silikatische Passivierungsschicht zwischen 0 und 100 nm erkennbar. Diese Schicht wirkt als Barriere und reduziert hierdurch die Auswaschung und den korrosiven Angriff der ersten Schicht deutlich. Darüber hinaus wird die Schlagempfindlichkeit der Teile deutlich reduziert.

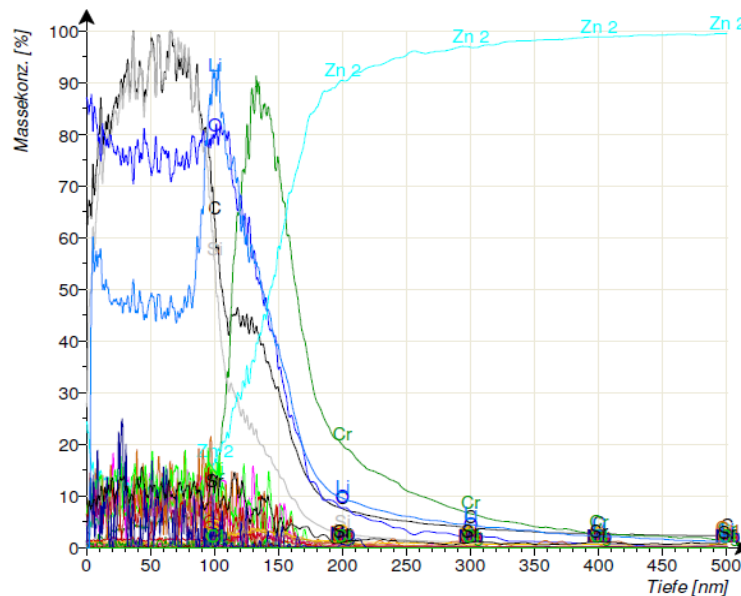


Abb. 6: GDOES-Tiefenprofil einer Zwischichtpassivierung

In der REM-Aufnahme ist eine gleichmäßige Schichtausbildung erkennbar [Abb. 7]. Im Gegensatz zu den bekannten Passivierungssystemen erkennt man allerdings eine leicht poröse Struktur, die auf die zweite silikatische Schicht zurückzuführen ist.

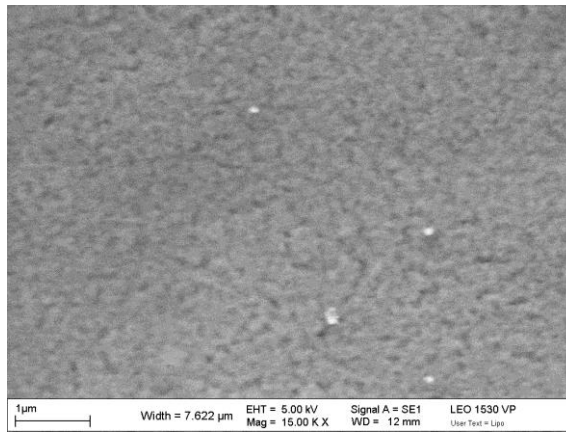


Abb. 7: REM-Aufnahmen einer Zweischiichtpassivierung

Die Prüfung der Korrosionsbeständigkeit erfolgt bei Schrauben nach wie vor im neutralen Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227. Hierbei werden von klassischen verzinkten und gelbchromatierten Schrauben Korrosionsbeständigkeiten von 96h gegen Weißrost erreicht. Das neue Zweischiichtpassivierungssystem erreicht dabei auf Schrauben bis zu 240h Stunden gegen Weißrost und übertrifft den Cr(VI)-Standard damit um ein vielfaches. Bei der Betrachtung, dass die beiden Schicht für sich eine deutlich geringere Korrosionsschutzwirkung haben. Dabei zeigt die erste Passivierungsstufe nach 240h bereits deutliche Weißrostbildung. Erst durch die synergetische Wirkung der beiden Schichten wird der Korrosionsschutz deutlich erhöht.

	Ausgangszustand	240 SST
Einstufig		
Zweistufig		

Abb. 8: Schrauben vor (links) und nach 240h (rechts) im neutralen Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227. Dabei wurde die erste Stufe des Passivierungssystems und der Gesamtaufbau geprüft

Neben der Anwendung auf Schrauben ist die zweistufige Passivierung, wie bereits oben beschrieben, auch auf Gestellware anwendbar. Auch hier zeigen sich die überragenden Korrosionsschutzeigenschaften mit über 360h bis zum Auftritt des ersten Weißrosts [Abb. 9].

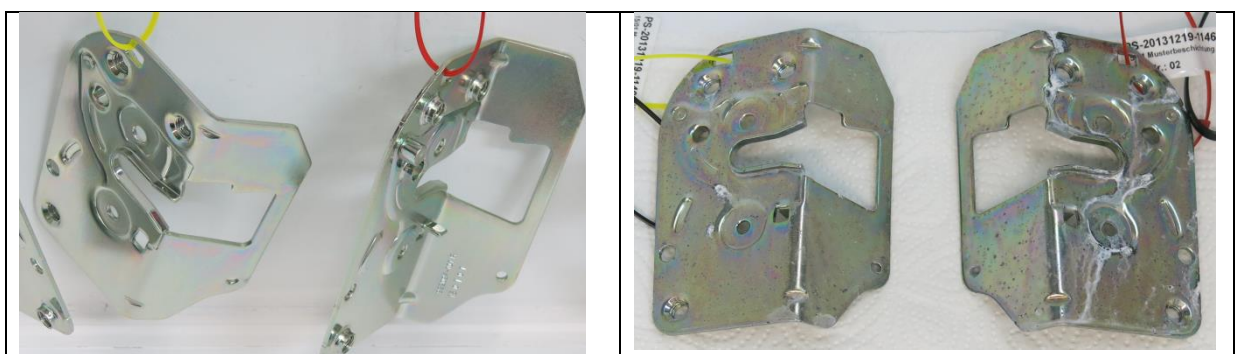


Abb. 9: Gestellteile vor (links) und nach 360h (rechts) im neutralen Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die aktuellen Zweischichtpassivierungen erlauben durch ihre synergetische Wirkung auch bei Massenschüttgut Anwendung eine deutliche Verbesserung in Hinblick auf den Korrosionsschutz. Im Vergleich mit den klassischen am Markt verfügbaren Cr(VI)-Systemen übertreffen sie diese um ein vielfaches. Durch den Verzicht auf Cr(VI) und Co wurden die Passivierungssysteme deutlich umweltfreundlicher und sicherer handhabbar.

Die weiteren Entwicklungen zielen nun darauf ab vergleichbare Eigenschaften in Hinblick auf mechanische Widerstandskraft und Korrosionsbeständigkeit durch vollständig Cr-freie Systeme zu erreichen.

Literaturverzeichnis

1. **Treue, Rudolf Kellermann und Wilhelm.** *Die Kulturgeschichte der Schraube.* München : F. Bruckmann KG, 1962.
2. **Wikipedia.** Archimedische Schraube. [Online] [Zitat vom: 1. Oktober 2015.] [https://de.wikipedia.org/wiki/Archimedische_Schraube.](https://de.wikipedia.org/wiki/Archimedische_Schraube)
3. **Deutscher Schraubenverband e.V.** Branche in Stichworten. [Online] [Zitat vom: 1. Oktober 2015.] [http://www.schraubenverband.de/verband/informationen/branche-in-stichworten/.](http://www.schraubenverband.de/verband/informationen/branche-in-stichworten/)
4. **Jelinek, T. W.** *Galvanische Verzinkung.* Bad Saulgau : Eugen G. Leuze Verlag, 2003.
5. **NOF Metal Coatings Europe.** DACROMET. [Online] [Zitat vom: 1. Oktober 2015.] [http://www.nofmetalcoatings.com/europe/en/coatings/dacromet/dacromet.xhtml.](http://www.nofmetalcoatings.com/europe/en/coatings/dacromet/dacromet.xhtml)
6. *DELTA-TONE, eine anorganische Beschichtung mit hohen Korrosionsschutzeigenschaften.* **Belz, H. W.** 6, Saulgau : Eugen G. Leuze Verlag, 1992, Bd. 83.
7. **Dörken MKS-Systeme GmbH & Co. KG.** Dörken MKS. [Online] [Zitat vom: 1. Oktober 2015.] [http://www.doerken-mks.de/de/mikroschicht-korrosionsschutz-systeme.html.](http://www.doerken-mks.de/de/mikroschicht-korrosionsschutz-systeme.html)
8. **Verena Grossmann, Ingo Klüppel, Christopher Köster Gerhard Reusmann, Marcel Roth.** *Verfahren zum Herstellen eines mit einer Chrom-VI-freien und kobaltfreien Passivierung versehenen Substrats.* EP000002907894A1 EP, 13. Februar 2014 .