

Schäden an galvanisierten Bauteilen

Schadenfälle aus der Praxis
Fehlerquellen, Ursache und Abhilfe



EUGEN G. LEUZE VERLAG · D-7968 SAULGAU

Verlag der Fachzeitschrift „Galvanotechnik – Leiterplattentechnik“

Schäden an galvanisierten Bauteilen

Schadenfälle aus der Praxis

Von Ing. F. W. Hirth, Prof. Dr.-Ing. H. Speckhardt und Dipl.-Ing. K. Stallmann

Mitteilung aus dem Institut für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt (Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. K. H. Kloos).

Vorbemerkung

Die hiermit vorgelegte Darstellung von Schadenfällen aus der Praxis, deren Kenntnis nicht nur für den Galvaniseur, sondern auch für den Konstrukteur, Werkstofffachmann und Fertigungstechniker äußerst wichtig ist, soll weiter ausgebaut werden. Wir bitten daher unsere Leser, die Bemühungen der Autoren um noch größere Funktionssicherheit galvanisierter Bauteile zu unterstützen und insbesondere durch eigene Beiträge aktiv am Ausbau der Schadenkartei mitzuwirken.

Dies kann in einfacher Weise unter Berücksichtigung des hier vorgestellten Ordnungssystems in unserer Fachzeitschrift *Galvanotechnik* erfolgen.

Die Redaktion

Einführung

Die vorliegende Zusammenstellung von Schäden an galvanisierten Bauteilen, basierend auf einer Veröffentlichung in der Fachzeitschrift *Galvanotechnik* *) soll Anregung geben zur weiteren Sammlung von Schadensbeispielen mit dem Ziel der Aufstellung einer Schadenkartei.

Sie soll weiterhin typische Schadensursachen vorstellen und auf die Zusammenhänge zwischen Grundwerkstoff, Überzug und Beanspruchung, zwischen Fertigung und Bauteilverhalten hinweisen.

Schließlich ist es ihre Aufgabe, das unbedingt notwendige Gespräch zwischen Konstrukteur, Werkstofffachmann, Fertigungstechniker und Galvaniseur schon im Stadium der Planung anzuregen, damit durch die Berücksichtigung elementarer Regeln der Galvanotechnik Schäden von vornherein weitgehend ausgeschlossen werden.

Dieser Anspruch erscheint vielleicht etwas hoch, doch wird er verständlich, wenn man bedenkt, daß z. B. eine Vielzahl von Schäden nur deshalb auftritt, weil die galvanische Behandlung erst ganz zum Schluß der Konzipierung eines Bauteils festgelegt wurde oder weil dem Galvaniseur die wirklichen Betriebsbeanspruchungen nicht bekannt waren, während ihm die Schichtdicke und vielleicht noch die Härte des herzustellenden Überzugs von seinem Kunden vorgeschrieben wurden.

Auch für die Schadensklärung ist oftmals das Gespräch zwischen den genannten Fachleuten notwendig. Nur so lassen sich bei komplexen Beanspruchungen die Schadensursache herausfinden, die Schädigungsmechanismen erkennen und verstehen sowie Abhilfemaßnahmen diskutieren und auf ihre Wirksamkeit hin überprüfen. Besonders unter diesen Gesichtspunkten ist die Führung einer Schadenkartei hilfreich; in ihr sammeln sich mit der Zeit wertvolle Erfahrungen, die genutzt werden können

- zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit galvanisierter Bauteile,
- zur Gewährleistung ihrer Betriebssicherheit,
- zur Verlängerung ihrer Lebensdauer,
- zur Optimierung der Werkstoff-, Bauteil- und Systemeigenschaften.

1. Allgemeines

Wie in allen Bereichen der Technik, so treten auch bei galvanisierten Bauteilen immer wieder Schäden dadurch auf, daß bestimmte Regeln – sei es bei der Herstellung oder beim Einsatz der Teile – nicht beachtet werden, die Betriebsbeanspruchungen weitgehend unbekannt sind, die Wechselwirkungen zwischen Überzug und Grundwerkstoff bei Planung und Auslegung unberücksichtigt bleiben oder auf Ergebnisse von Prüfverfahren vertraut wird, die auf die Belange der Praxis nicht übertragbar sind.

Bevor typische Schadensbeispiele vorgestellt werden, sollen in Kurzform wesentliche Grundlagen erörtert werden, auf die bei der Diskussion von Schadensfällen

*) Speckhardt, H.: Schäden an galvanisierten Bauteilen. *Galvanotechnik* 69 (1978) Nr. 10, S. 866 – 876.

immer wieder zurückgegriffen werden muß.

1.1 Zweck des Galvanisierens

Das Aufgabengebiet der Galvanotechnik umfaßt sowohl den dekorativen als auch den funktionellen Bereich. Es gilt, Oberflächen mit bestimmtem Aussehen und mit definierten chemischen, physikalischen, mechanisch-technologischen Eigenschaften herzustellen. Hierbei besteht je nach Einsatzzweck unterschiedliche Gewichtung, z. B. hohe Leitfähigkeit in der Elektrotechnik und Elektronik, gleichzeitig hohe Härte bei lösbaren Kontakten, hohe chemische Beständigkeit in der Nahrungsmittelindustrie, zusätzlich hohe Festigkeit und Beständigkeit gegen Abrieb in der Druck- und Papiermaschinenindustrie.

Wie im Flugzeugbau, so wird die Galvanotechnik auch in vielen anderen Fällen sowohl zur Herstellung als auch zur Wartung und Reparatur von Bauteilen eingesetzt. Dazu ist es notwendig, die Eigenschaften des Überzugs und die Auswirkungen des Galvanisierens auf das Bauteilverhalten – also die Eigenschaften des galvanisierten Teils – genau zu kennen.

1.2 Ermittlung der Eigenschaften von Grundwerkstoff, Überzug und Bauteil

Zur Feststellung der Werkstoffeigenschaften sind im wesentlichen die einschlägigen Normen und Prüfvorschriften anzuwenden. Dabei – und besonders im Hinblick auf die Bauteileigenschaften – sind jedoch folgende Zusammenhänge zu berücksichtigen:

- Die Eigenschaften eines galvanisierten Teils sind nicht durch getrennte Erfassung der Eigenschaften von Grundwerkstoff und Überzug zu bestimmen, sondern können exakt nur am Verbundwerkstoff selbst ermittelt werden.
- Die Werkstoffkennwerte, an einfachen und sorgfältig bearbeiteten Proben gemessen, werden im Bauteil durch Werkstückform und Fertigung zum Teil erheblich verändert; die Systemeigenschaften schließlich (das betreffende Bauteil arbeitet mit anderen Teilen zusammen) weichen vielfach noch weiter von den Werkstoff- und Bauteileigenschaften ab. Das bedeutet, daß die ursprünglich ermittelten Werkstoffkennwerte beim Arbeiten des Teils im System unter Umständen nicht mehr in vollem Umfang zur Verfügung stehen.
- Mit einfachen Prüfmethoden wird das Auftreten kombinierter physikalisch-chemisch-mechanischer Beanspruchungen in der Regel nicht in ausreichendem Maße simuliert, das Werkstoffverhalten bei sogenannter Komplexbeanspruchung (Schwingungsrißkorrosion,

Kavitation, Korrosionsverschleiß) wird dadurch nicht erfaßt.

Daher empfiehlt es sich, zusätzlich zu standardisierten Prüfmethoden auch möglichst praxisnahe Versuche durchzuführen, um besonders die Bauteil- und Systemeigenschaften unter Betriebsbedingungen oder wenigstens unter betriebsnahen Bedingungen zu erfassen.

Von einer Zeitraffung (Ergebnisse fallen nach kurzen Versuchszeiten an) sollte dabei abgesehen werden, weil sie nur durch eine Verschärfung der Prüfbedingungen möglich ist, die jedoch den Schädigungsmechanismus und das Schadensbild entscheidend verändern kann; dies muß zu falschen Voraussetzungen im Hinblick auf die Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer und die eventuell zu treffenden Maßnahmen zur Vermeidung eines Schadens führen.

1.3 Normen

Die für die Galvanotechnik wichtigsten Normen sind von G. Oelsner und H. Plog in dieser Zeitschrift *) zusammengestellt worden. Dort wird unterteilt in:

- Begriffe und Grundlagen der Meßtechnik,
- Anforderungen und Lieferbedingungen, allgemein,
- Allgemeine Prüfnormen,
- Geometrie und Rauheit von Oberflächen,
- Oberflächenbehandlung und Oberflächenschutz (Allgemeine Verfahren der Überzugsprüfung, Schichtdickenmessungen),
- Korrosion und Korrosionsprüfung.

2. Mögliche Schadensursachen

Die Ursachen für Schäden an galvanisierten Bauteilen sind zwar außerordentlich vielfältig, lassen sich jedoch durchaus in eine gewisse Ordnung bringen. Danach ist es möglich, Fehlerquellen z. B. bei der Konstruktion, Auslegung und Fertigung der Teile zu erkennen und sie durch Beachtung bestimmter Grundregeln sowie durch Einsatz verbesserter Methoden und Verfahren abzustellen.

Dies wird allerdings erschwert durch die Verknüpfung zwischen den Auswirkungen von Konstruktion, Dimensionierung, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren einschließlich z. B. einer Wärmebehandlung.

Daher ist eine Optimierung des Bauteilverhaltens nur durch Kenntnis derartiger Zu-

*) Oelsner, G., und H. Plog: Stand der Normung auf dem Gebiet der Oberflächentechnik. Galvanotechnik 70 (1979) Nr. 4, S. 305 – 322.

sammenhänge und gegebenenfalls durch ergänzende Versuche möglich.

Aus diesem Grund muß schon zu Beginn einer Konstruktion das Gespräch stattfinden zwischen Konstrukteur, Fertigungs-techniker, Werkstoffachmann und Galvaniseur, in dem unter Berücksichtigung der Fertigungs- und Anwendungsanforderungen an das zu galvanisierende Bauteil die wichtigsten Randbedingungen festgelegt werden.

Hierauf wird in der Folge eingegangen.

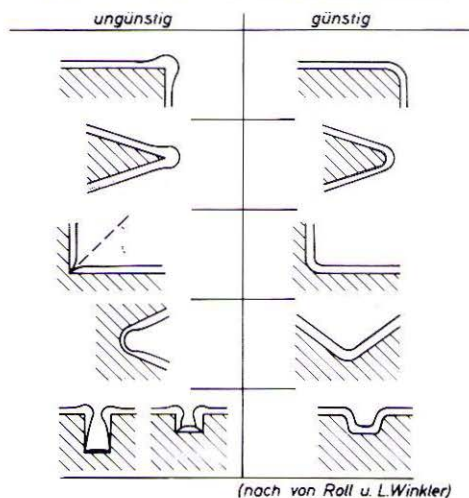
2.1 Konstruktion

Das galvanisiergerechte Konstruieren sollte genau so beachtet werden wie das werkstoffgerechte, das fertigungsgerechte, das beanspruchungsgerechte und das prüfgerechte Konstruieren. Das bedeutet, daß schon bei der Konstruktion eines Bauteils entschieden werden muß, ob es galvanisiert werden soll oder nicht.

Wurde festgelegt, daß von der Oberfläche zu fordernde Eigenschaften durch einen galvanischen Prozeß erzielt werden sollen, dann müssen Regeln beachtet werden, die in der besonderen Eigenart der betreffenden Verfahren begründet sind, z. B. im Hinblick auf Makro- und Mikrostruktur, Textur und Struktur der Überzüge.

So zeigt *Abb. 1* eine Gegenüberstellung ungünstiger und günstiger konstruktiver Gestaltung zur Vermeidung von Fehlern wie

- *Aufwachsen des Überzugs an Ecken und Kanten* mit Maßüberschreitung und Gefahr des Abscherens und Ausbrechens im Betrieb;



(nach von Roll u. L.Winkler)

Abb. 1: Detailbeispiele für galvanisiergerechtes Konstruieren

- *gestörte Schichtausbildung* an Querschnittsübergängen und in Hohlkehlen;
- *Unterschreitung der Mindestschichtdicke.*

In *Abb. 2* sind beachtenswerte Hinweise zusammengestellt:

- Die *Voraussetzung zur sicheren Kontaktierung* der Ware, zur *Halterung* und zur *Positionierung* im Elektrolyten ist zu schaffen.
- *Schöpfende Teilformen* und damit *Elektrolytverschleppung* sind zu vermeiden.
- *Luft- oder Gaseinschlüsse* z. B. in Sackbohrungen dürfen nicht auftreten können.
- *Rauhe Oberflächen*, an denen der Überzug gestört aufwächst und eventuelle Badverunreinigungen bevorzugt angelagert werden, sind auszuschließen.
- *Enge Spalte*, in denen ein Elektrolytaustausch nicht in ausreichendem Maße gewährleistet ist und zudem die zur Erzeugung eines einwandfreien Überzugs notwendige kathodische Stromdichte sich nicht einstellt, müssen vermieden werden.
- *Massenteile* sollen *ausreichende Eigenfestigkeit* haben, damit sie sich in der Trommel oder in der Glocke nicht verbiegen; sie müssen so geformt sein, daß sie sich nicht verhaken oder aufeinander kleben.
- *Zinkdruckgußteile*, die galvanisiert werden sollen, müssen zunächst *vollständig verkupfert* werden können, da nicht abgedeckte Stellen, z. B. in Spalten oder Bohrungen, beim anschließenden weiteren Galvanisieren korrodieren.
- Schließlich muß in manchen Fällen die *Möglichkeit zum mechanischen Polieren* (Zugänglichkeit der betreffenden Oberflächenbereiche, Halterung der Ware) beachtet werden.

Galvanisiergerechtes Konstruieren (nach INCO)

Halterung, Kontaktierung, Positionierung

Schöpfen, Lufteinschließen

Rauhe Oberflächen - unlösl. Badbestandteile

Scharfe Ecken, Vorsprünge und Kanten

Enge Spalte

Massenteile: Festigkeit, Kleben, Verhaken

Zinkdruckgußteile

Mechanische Polierbarkeit

Abb. 2: Beim galvanisiergerechten Konstruieren zu beachtende Punkte

2.2 Betriebsbeanspruchungsanalyse

Es versteht sich von selbst, daß eine Analyse der Betriebsbeanspruchungen nicht erst nach eingetretenem Schaden, sondern bereits im Vorstadium der Konstruktion vorgenommen werden sollte.

Hierzu gehört die möglichst genaue Ermittlung aller im Betrieb, bei Stillstand oder beim An- und Abfahren einer Anlage – aber auch bei ihrer Reinigung – auftretenden Beanspruchungen. Auch mögliche Überla-

stungen bei Betriebsstörungen sind zu berücksichtigen. Vor allem ist auf die Erfassung kombinierter Beanspruchungen Wert zu legen, also z. B. gleichzeitiger Korrosion und mechanischer Beanspruchung oder thermisch-mechanischer Beanspruchung. Die Betriebsbeanspruchungsanalyse erfolgt entweder theoretisch oder besser in Verbindung mit Messungen während Simulations- oder Betriebsversuchen. Sie wird dadurch erschwert, daß der Betreiber, oftmals in Unkenntnis der Auswirkungen der getroffenen abweichenden Maßnahmen, sich nicht immer genau an die Betriebsanweisungen hält (z. B. zu rasches Hochfahren auf Betriebstemperatur, mechanische Überlastungen, fehlende Konservierung bei Stillstand, Verwendung zu aggressiver Reinigungsmittel).

Hier kann nur umfassende Aufklärung und Betriebsüberwachung Abhilfe schaffen.

2.3 Werkstoffauswahl für Substrat und Überzug

Die Werkstoffauswahl sollte fertigungs- und beanspruchungsgerecht erfolgen. Das bedeutet, daß die Kombination Grundwerkstoff/Überzug nicht nur auf die zu erwartenden Beanspruchungen abgestimmt werden muß, sondern auch auf die spezifischen Gegebenheiten der Galvanisierverfahren.

Der Grundwerkstoff sollte ein möglichst gleichmäßiges Gefüge aufweisen; Feinkorn führt zu wesentlich gleichmäßigerer Schichtausbildung als Grobkorn. Ausgeprägte Korngrenzsäume, wie sie z. B. bei Korngrenzferrit und Korngrenzzementit auftreten, sind zu vermeiden, da sie ebenso wie nichtmetallische Einschlüsse (Sulfide, Karbide, Nitride, Karbonitride) zu Störungen im Schichtaufbau führen. Außerdem können sie Ursache sein für das Auftreten von Ätzgrübchen in der Metalloberfläche beim Beizen oder auch beim Elektropolieren, die wiederum Fehler (Poren, Risse) im Überzug zur Folge haben.

Seigerungen nahe der Oberfläche führen zur Blasenbildung infolge eindiffundierten Wasserstoffs, ebenso Überwetzungen und Dopplungen; angeschnittene Poren, Lunken und Gasblasen im Stahl verhindern den gleichmäßigen Aufbau eines galvanisch abgeschiedenen Überzugs; sie führen wie die nichtmetallischen Einschlüsse zur Entstehung von Poren und Rissen.

Schließlich ist zu beachten, daß der Grundwerkstoff im Falle erhöhten Wasserstoffangebotes beim galvanischen Prozeß und besonders bei der Vorbehandlung, wenn

scharf gebeizt werden muß, um z. B. unsachgemäß ausgewählte Ziehhilfsmittel von der Substratoberfläche zu entfernen, eine ausreichende Restzähigkeit besitzt. Andernfalls können sich schon vor dem Tempern zum Zweck eines Wasserstoff-austreibens innere Spaltrisse bilden, die im Betrieb zu verzögertem Sprödbruch führen. Sicherheit schafft in solchen Fällen die Auswahl hochlegierter Stähle, die auf wesentlich höhere Festigkeit vergütet werden könnten, als sie im Betrieb gefordert wird. Bei den dort benötigten Festigkeiten sind derartige Stähle ausreichend zäh, so daß die Gefahr eines verzögerten Sprödbruchs (Wasserstoffversprödung) nicht besteht. Es ist falsch, sogenannte abgemagerte Stähle auf die höchste noch erreichbare Zugfestigkeit zu vergüten und dann noch galvanisieren zu wollen, da schon geringste Mengen eindiffundierenden atomaren Wasserstoffs, wie sie übrigens auch bei Korrosion im Betrieb auftreten können, zur Auslösung eines Sprödbruchs genügen.

Die Auswahl des Überzugswerkstoffs richtet sich bevorzugt nach den Betriebsbeanspruchungen, da an der Bauteiloberfläche bestimmte Eigenschaften gefordert werden. Durch Variation der Abscheidungsbedingungen lassen sich Kompromisse zwischen Schichteigenschaften und Beeinflussung des Grundwerkstoffs im Sinne einer Optimierung des Bauteilverhaltens herbeiführen.

2.4 Dimensionierung

Bei der Dimensionierung zu galvanisieren der Bauteile sind besonders zwei Parameter zu beachten:

- *die elastische Verformung des Teils* bei Betriebsbeanspruchung unter Berücksichtigung der Verformungsfähigkeit des Überzugs (Gefahr der Ribbildung im Überzug bei überelastischer Verformung und mangelndem plastischen Verformungsvermögen);
- *die Festlegung der notwendigen – aber auch ausreichenden – Schichtdicke.*

Zur Lösung beider Probleme kann der Einsatz von Schichtsystemen hilfreich sein.

2.5 Fertigung des Bauteils vor dem Galvanisieren

Wie ganz allgemein ein für einen bestimmten Anwendungsfall an sich geeigneter Werkstoff durch unsachgemäße Fertigung ungeeignet werden kann (Weichfleckigkeit, Härterisse, Versprödung durch Ausscheidungen, zu hohe Rauigkeit der Ober-

fläche), so gilt dies im besonderen für zu galvanisierende Bauteile.

Vor allen Dingen die Oberflächenfein-
gestalt und der Eigenspannungszustand der
Oberflächenzone sind für die Ausbildung
des Überzugs und die Beeinflussung des
Grundwerkstoffverhaltens durch die galva-
nisch abgeschiedene Schicht von Bedeu-
tung.

Der Einfluß der Mikrogeometrie auf die
Schichtstruktur geht aus *Abb. 3* hervor. Po-
ren, Risse und Schwachstellen, die schon
bei geringfügiger chemischer oder mecha-
nischer Beanspruchung zu bis zum Grund-
werkstoff reichenden Rissen führen kön-
nen, sind die Folge nicht ausreichender
Glätte der Substratoberfläche. Mittlerweile
hat sich in der Praxis die Erkenntnis durch-
gesetzt, daß die maximale Rauigkeit der
Grundwerkstoffoberfläche bei hochwertigen
Bauteilen unter $R_t = 1 \mu\text{m}$ liegen sollte,
um optimale Schichtausbildung zu gewähr-
leisten.

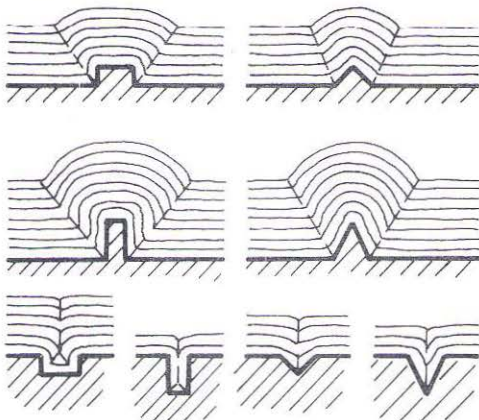


Abb. 3: Oberflächenrauigkeit des Substrates
und Schichtausbildung (nach Nonn)

Bearbeitungszugeigenspannungen in der
Oberflächenzone sollten vermieden wer-
den, da sie in Verbindung mit Zugeigens-
pannungen im Überzug zu einem beträcht-
lichen Abfall z. B. der Dauerfestigkeit des
Bauteils führen können. Druckeigenspan-
nungen hingegen sind anzustreben, daher
bewährt sich vielfach das Kugelstrahlen
vor dem Galvanisieren. Hierbei bringt aller-
dings das Strahlen mit Stahlschrot die Ge-
fahr mit sich, daß Fremdpartikel in die
Werkstückoberfläche eingeschlagen wer-
den, die zur Entstehung von Ätzgrübchen,
zur Porenbildung und zur Unterkorrosion
führen können. Deshalb hat sich in der
Praxis die Verwendung von (gegebenen-
falls stets frischen) Glasperlen eingeführt.

2.6 Vorbehandlung

Ziel der Vorbehandlung eines Werkstücks
vor dem Galvanisieren muß es sein, eine
rückstandsfreie, metallisch reine, aktive
Oberfläche zu schaffen, in der die atomaren
Bindekräfte zwischen Überzug und Grund-
werkstoff voll zum Tragen kommen und
damit optimale Haftfestigkeit sicherstellen.
Verunreinigungen – auch nur im moleku-
laren Bereich – führen zur lokalen Störung
im Schichtwachstum, zu Poren, Wachs-
tumsgrenzen senkrecht zur Grundwerk-
stoffoberfläche, zur Blasenbildung, Unter-
korrosion und zum örtlichen Abplatzen des
Überzugs.

Besonderes Augenmerk ist darauf zu ver-
wenden, daß bei der Kaltumformung zu
galvanisierender Teile Ziehhilfsmittel ver-
wendet werden, die sich durch die üblichen
Vorbehandlungsmethoden leicht entfer-
nen lassen, um die Gefahr eines zwangs-
läufigen Überbeizens mit eventueller Was-
serstoffversprödung als Folge zu vermei-
den.

Das Beizen mit Schwefelsäure kann zu
Wasserstoffversprödung und zur Ablage-
rung von Beizbast – wenn auch nur in sehr
dünner Schicht – auf der Oberfläche füh-
ren. Daher ist salzsauren Beizlösungen der
Vorzug zu geben.

Ein für die Galvanisierung ungeeignetes
Werkstoffgefüge läßt sich spätestens bei
der Vorbehandlung – beim Beizen und
gegebenenfalls auch beim Elektropolieren –
erkennen. Es entstehen Ätzgrübchen;
Karbide und dergleichen ragen aus der
Oberfläche hervor; die Walzstruktur wird
durch Freilegen von Zeilen erkennbar (Be-
trachtung mit dem Stereomikroskop).

In diesem Zusammenhang ist auf die Not-
wendigkeit einer Eingangskontrolle in der
Galvanik hinzuweisen. Nicht nur die Elek-
trolytchemikalien sind sorgfältig zu prüfen,
sondern selbstverständlich auch die einge-
lieferten Werkstücke, um mögliche Fehler-
quellen im Oberflächenbereich festzustel-
len und somit spätere Schäden am galva-
nisierten Teil auszuschließen. In vielen Fäl-
len hilft schon eine Probegalvanisierung
unter Fertigungsbedingungen.

2.7 Galvanisierung

Die Erfahrung zeigt, daß Schäden an gal-
vanisierten Teilen nur zu einem sehr gerin-
gen Prozentsatz auf fehlerhafte Galvanisie-
rung zurückzuführen sind. Das spricht für
den hohen Ausbildungsstand der Fachbe-
triebe und für die Zuverlässigkeit der Ver-
fahren.

Die *Überzugseigenschaften* werden bestimmt durch

- die Elektrolytzusammensetzung,
- die Elektrolyttemperatur,
- die kathodische Stromdichte,
- die Strömungsverhältnisse im Elektrolyten, besonders im Bereich der Warenoberfläche.

Wichtige *Kriterien* sind

- die Eigenspannungen im Überzug,
- die Schichtdicke,
- die Schichtdickenverteilung auf der Warenoberfläche,
- die Freiheit von Poren und Rissen,
- die Härte,
- die elektrische Leitfähigkeit und gegebenenfalls magnetische Eigenschaften,
- die Verformbarkeit
- im Zusammenhang mit der Vorbehandlung die Haftfestigkeit.

Neben der selbstverständlichen Elektrolytüberwachung und Kontrolle der Abscheidungsbedingungen sollten auch diese Kriterien, je nach Anwendungszweck mit verschiedener Gewichtung, ständig überprüft werden, um Störungen im Verfahrensablauf sofort feststellen und die Schadensursache ermitteln zu können. Hat die Ware erst einmal die Galvanik verlassen, dann sind Reklamationen ungleich schwieriger zu bereinigen.

Eine derartige ständige Überprüfung hat überdies noch den Vorteil, daß Werkstoffchargen, die für das Galvanisieren nach der bisherigen Verfahrensweise oder überhaupt für eine galvanische Behandlung ungeeignet sind, sofort erkannt werden können.

2.8 Nachbehandlung

Auch die Nachbehandlung, vom Spülen und Trocknen über das Tempern bis hin zum Schleifen und Polieren, entscheidet über Funktionstüchtigkeit und Betriebsbewahrung galvanisierter Bauteile.

Verunreinigtes Spülwasser führt nicht nur zu Trocknungsflecken, sondern auch zur Korrosion schon während der Lagerung, da die Rückstände in Verbindung mit der Luftfeuchtigkeit entweder den Überzug selbst oder durch Poren im Überzug den Grundwerkstoff angreifen können.

Wird beim Tempern zum Zwecke des Wasserstoff austreibens zu rasch aufgeheizt, dann können Metallhydride, besonders Chromhydrid, so schnell zerfallen, daß unter den sich daraus ergebenden inneren Spannungen der Überzug aufreißt. Es entstehen Risse, die bis zum Grundwerkstoff reichen; ein Korrosionsschutz ist dann nicht mehr gegeben. Zudem wird durch die

Kerbwirkung dieser Risse die Dauerfestigkeit des Bauteils gesenkt.

Auch Schleifen und mechanisches Polieren können durch zu hohe Wärmebringung zur Rißbildung führen und die Homogenität des Überzugs zerstören.

Das Tempern aus Gründen einer Veränderung der Schichteigenschaften, wie es z. B. bei außenstromlos abgeschiedenen Nickelüberzügen angewandt wird, verdient als Verfahren der Werkstoffbehandlung wie das Härten und Vergüten des Grundwerkstoffs Stahl besonderes Interesse. Es bietet die Möglichkeit, Härte und Duktilität zu variieren und sie so den Einsatzbedingungen anzupassen. Dabei ist jedoch stets darauf zu achten, daß man nicht nur die Optimierung einer Eigenschaft unter Vernachlässigung der Wechselwirkungen mit anderen Eigenschaften anstrebt. Höchste Härte ist z. B. immer verbunden mit maximaler Sprödigkeit, Empfindlichkeit gegen Schlag und Stoß, geringster Verformbarkeit.

Die Nichtbeachtung dieser fundamentalen Zusammenhänge hat bekanntlich bei der industriellen Einführung der stromlosen Vernicklung zunächst zu erheblichen Rückschlägen geführt.

2.9 Auswahl der Prüfverfahren zur Fertigungskontrolle

Schon bei der Konstruktion der Teile unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Betriebsbeanspruchungsanalyse sollten die erforderlichen Prüfverfahren festgelegt werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Werkstoff-, Bauteil- und Systemprüfung und solchen Versuchen, die allein zur Kontrolle der Fertigung dienen.

Wurden die Beziehungen zwischen den Ergebnissen solcher Kontrollverfahren und den Ergebnissen aus der Werkstoff- und Bauteilprüfung hergestellt, dann läßt sich die Fertigungsüberwachung mit relativ einfachen Mitteln betreiben:

- Zur Ermittlung der Eigenspannungen im Überzug reicht die Plättchenmethode aus, bei der die Eigenspannungen 1. Art aus der Durchbiegung eines einseitig galvanisierten Plättchens errechnet werden.
- Die Messung der Schichtdicke an bestimmten Punkten der Bauteiloberfläche gibt Aufschluß über Abscheidungs geschwindigkeit und Schichtverteilung.
- Tests zur Feststellung durchgehender Poren und Risse geben Aufschluß über die Dichtheit der Schicht.
- Selbst Kurzzeit-Korrosionsprüfverfahren haben hier ihre Berechtigung, da sie nicht nur

Schwachstellen der Konstruktion (unter dem Aspekt des Korrosionsschutzes), sondern auch Schwachstellen des Überzugs erkennen lassen.

- *Einfache Biegetests* geben Hinweise auf die Verformbarkeit von Überzug und Grundwerkstoff.

2.10 Verpackung und Transport

Ein nicht unbeträchtlicher Teil von Schäden ist darauf zurückzuführen, daß Reaktionen zwischen der Metalloberfläche und dem Verpackungsmaterial eintreten konnten. So waren die Teile entweder nicht völlig getrocknet, oder sie kamen mit feuchtem Verpackungsmaterial in Berührung; auch wurden die schon verpackten Teile während der Lagerung oder beim Transport befeuchtet (Regenwasser, Streusalznebel auf offener Lkw-Ladefläche, Seewasser).

Unter solchen Voraussetzungen stellen sich in der Regel aggressive Schwitzwasserbedingungen ein, korrosionsförderliche Produkte können sich aufkonzentrieren, aus Verpackungspapier können Chlorid- und Sulfat-Ionen freiwerden, und Verpackungsmaterial kann sauer oder auch alkalisch reagieren.

All das bedeutet, daß Teile während der Lagerung in einer Verpackung und beim Transport durchaus Beanspruchungen – meist chemischen Einflüssen – ausgesetzt sein können, die im eigentlichen Betrieb nicht auftreten. Besonders kritisch sind Seetransport und häufige Temperaturwechsel in Verbindung mit hoher Luftfeuchtigkeit.

Die Galvanik sollte unter Berücksichtigung derartiger Sachverhalte für sichere Verpackung Sorge tragen, wozu nicht zuletzt auch die sachgemäße Lagerung und Abstützung von Bauteilen gehört, die sich während des Transports unzulässig – und sei es nur elastisch – verformen könnten. Dies ist schon deshalb wichtig, weil nicht immer geklärt werden kann, ob es sich im gegebenen Fall wirklich um einen Transportschaden handelt oder ob nicht vielleicht doch eine unsachgemäße Behandlung der Ware in der Galvanik vorlag.

2.11 Montage

Für die Montage gilt im Prinzip das gleiche wie für Verpackung und Transport. Galvanisierte Bauteile dürfen nicht höheren Beanspruchungen ausgesetzt werden, als bei der Auslegung und bei der Auswahl von Überzug und Galvanisierverfahren zugrun-

de gelegt wurden. Dies gilt vor allem im Hinblick auf für die Schicht überelastische Verformungen, die zu örtlichem Aufreißen führen können.

In der Montageanleitung sollte hierauf unbedingt Rücksicht genommen und die Montage sollte entsprechend überwacht werden.

Die Bedeutung dieser Forderung wird besonders dann einsichtig, wenn man bedenkt, daß montagebedingte Schäden nur schwerlich als solche erkannt werden können, wenn sie z. B. erst im Betrieb zum Versagen des Bauteils führen.

3. Aufklärung von Schäden – Schadensanalyse

3.1 Aufgaben

Die Aufgaben der Schadensanalyse lassen sich wie folgt umreißen:

- *Klärung eines Schadensfalles* mit Ermittlung der Schadensursache, des Schadensablaufes und der Schädigungsmechanismen;
- *Ermittlung des Schadensverursachers* (Hersteller, Monteur, Betreiber).

Daraus abzuleiten sind Folgerungen für die Zukunft und Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden; hierzu gehört auch die Festlegung von Prüfverfahren und Versuchsbedingungen zur Überprüfung des Erfolgs dieser Maßnahmen.

3.2 Grenzen der Schadensaufklärung

Die Aufklärung eines Schadens ist oftmals nicht allein aufgrund der Untersuchung des schadhafte Bauteils möglich, sondern man benötigt zusätzlich detaillierte Angaben über Montage, Betriebsablauf, Betriebsstörungen und Reparaturarbeiten.

Dies gilt um so mehr, wenn folgende Sachverhalte gegeben sind, mit denen man in der Praxis häufig konfrontiert wird:

- *Bei der Schadensentstehung wirkte eine Vielzahl von Einflußgrößen zusammen*, wobei sich die Einzelwirkungen überdecken.
- *Korrosionsprodukte* liegen nur in geringsten Mengen vor und können daher nicht analysiert werden.
- *Die ursprünglich korrosionsauslösenden Substanzen sind ausgewaschen*.
- *Leicht flüchtige Substanzen* wie z. B. Ammoniumverbindungen und Wasserstoff, die für den Schaden ursächlich waren, sind nicht mehr nachweisbar.

- Sekundäre Korrosion hat die ursprünglich vorliegenden Reaktionsprodukte und das Schadensbild verändert. Die Flanken von Anrissen arbeiteten während des Rißfortschritts gegeneinander, wodurch sekundäre plastische Verformung eintrat, die den Mechanismus der Rißentstehung nicht mehr erkennen läßt.
- Das Schadensbild wurde durch unsachgemäßes Heraustrennen des betreffenden Bereiches aus dem Bauteil verändert.
- Das Gefüge wurde thermisch beeinflusst durch während des Schadensablaufs freiwerdende Energie oder durch nicht sachgemäßes Heraustrennen des Schadensbereiches.
- Folgeschäden haben das ursprüngliche Schadensbild verändert.

3.3 Durchführung der Schadensanalyse

Grundsätzlich ist anzustreben, mit der Untersuchung sofort nach Eintritt eines Schadens zu beginnen, um Veränderungen, wie sie zuvor genannt wurden, möglichst auszuschließen. Dabei verfährt man zweckmäßigerweise wie folgt, wobei je nach Art des Schadens zu entscheiden ist, welche Schritte gegebenenfalls unterlassen werden können:

- Feststellung von Lage und Umfang des Schadens (Makroaufnahmen),
- Ermittlung möglichst aller Betriebsdaten und Betriebsstörungen,
- Festlegung und Kennzeichnung der zu entnehmenden Proben,
- Probenahme ohne sekundäre Veränderung (Deformation, Wärmeeinbringung) der zu untersuchenden Bereiche,
- Probenlagerung in inerte Umgebung und so kurz wie möglich,
- Befund nach Augenschein,
- Betrachtung mit Lupe und Stereomikroskop,
- Makro- und Mikroübersichtsaufnahmen,
- chemische Analyse eventuell vorhandener Reaktionsprodukte,
- Rißprüfung (magnetisch, mit Farbeindringverfahren, chemisch – z. B. Ferroxyttest oder Kupfersulfatstest unter Reaktion mit dem Grundwerkstoff durch Risse im Überzug –, mit Wirbelstromverfahren),
- Festlegung näher zu untersuchender Bereiche,
- Ablösung von Korrosionsprodukten an Teilproben ohne Beschädigung des Untergrundes,
- Oberflächenbetrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM),
- REM-Untersuchung von Rißflanken,
- Analyse von Reaktionsprodukten auf den Rißflanken mit REM oder Mikrosonde,
- metallografische Schlicfe mit Beurteilung von Gefügeausbildung, Verbund zwischen Überzug und Grundwerkstoff, Ausbildung und Ver-

- lauf von Rissen und anderen Störungen, Unterkorrosion,
- Kleinlasthärtemessung in Überzug und Grundwerkstoff,
- Messung der Schichtdicke,
- Analyse von Reaktionsprodukten in Rissen und Störungen, von Einschlüssen und von eventuell vorhandenen Zwischenschichten und Diffusionszonen,
- Analyse von Überzug und Grundwerkstoff,
- Ermittlung der Haftfestigkeit,
- Ermittlung der physikalischen Kennwerte, z. B. der elektrischen Leitfähigkeit,
- chemische Analyse der Betriebsmedien.

Es empfiehlt sich, alle Erkenntnisse in einer Schadenskartei zusammenzufassen. Liegt eine Kartei bereits vor, so können dort niedergelegte Erfahrungen aus schon bearbeiteten ähnlich gelagerten Fällen die Arbeiten unterstützen.

Gegebenenfalls ist auch eine Literaturrecherche notwendig, um z. B. Kenntnis über grundlegende Zusammenhänge zwischen Bauteilverhalten, Fertigung und Beanspruchung zu erhalten.

Die Arbeiten werden zunächst abgeschlossen mit einer kritischen Würdigung aller Befunde unter Berücksichtigung von Grundwerkstoff, Überzugwerkstoff, Konstruktion, Fertigung und Betriebsbeanspruchungen. Ist dabei über die Schadensursache und den Schadensmechanismus keine endgültige Klarheit zu erhalten, so sollten zusätzlich Versuche durchgeführt werden mit entsprechend dem schadhaften Bauteil gefertigten Proben oder artgleichen Bauteilen. Laborversuche sollten unter möglichst praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden, die aus der Betriebsbeanspruchungsanalyse abzuleiten sind; einschlägige Prüfvorschriften und Normen sind dabei zu beachten.

Derartige ergänzende Untersuchungen sind besonders dann zu empfehlen, wenn Risse oder Brüche aufgetreten sind und die Beurteilung von Bruchbild und Rißverlauf nach folgenden Unterscheidungsmerkmalen schwierig ist:

- Gewaltbruch, Dauerbruch,
- zäh, spröde,
- transkristallin, interkristallin,
- Mitwirkung von Korrosion vor, während oder nach der Bruchentstehung,
- Rißkeim entstanden im Überzug, im Grundwerkstoff, durch Werkstoff-, Fertigungs-, Vorbehandlungs-, Galvanisier- oder Nachbehandlungsfehler, durch Betriebs- oder Stillstandsbeanspruchung.

4. Schadensfälle aus der Praxis

Die in dieser Folge vorgestellten Schadensfälle sind nach Überzugwerkstoffen alphabetisch geordnet; innerhalb der jeweiligen Werkstoffgruppe wurde nach der Schadensursache gegliedert:

1. Konstruktion und Bemessung;
2. Grundwerkstoff;
3. Überzugwerkstoff;
4. Vorbehandlung;
5. Abscheidung;
6. Nachbehandlung;
7. Verpackung und Transport;
8. Montage;
9. Betrieb.

Schadensfälle mit gleicher Ursache erhielten hinter der Ziffer der Schadensursache eine fortlaufende Numerierung, wobei die Reihenfolge keine Gewichtung darstellt. Funktionelle Überzüge sind mit f, dekorative mit d gekennzeichnet.

Die Bezeichnung bei „Chrom“

Schadensfall f – 7.2

bedeutet also beispielsweise den *zweiten* hier diskutierten Schaden an einem *funktionell verchromten* (hartverchromten) Bauteil, der durch Fehler bei *Verpackung und Transport* verursacht wurde.