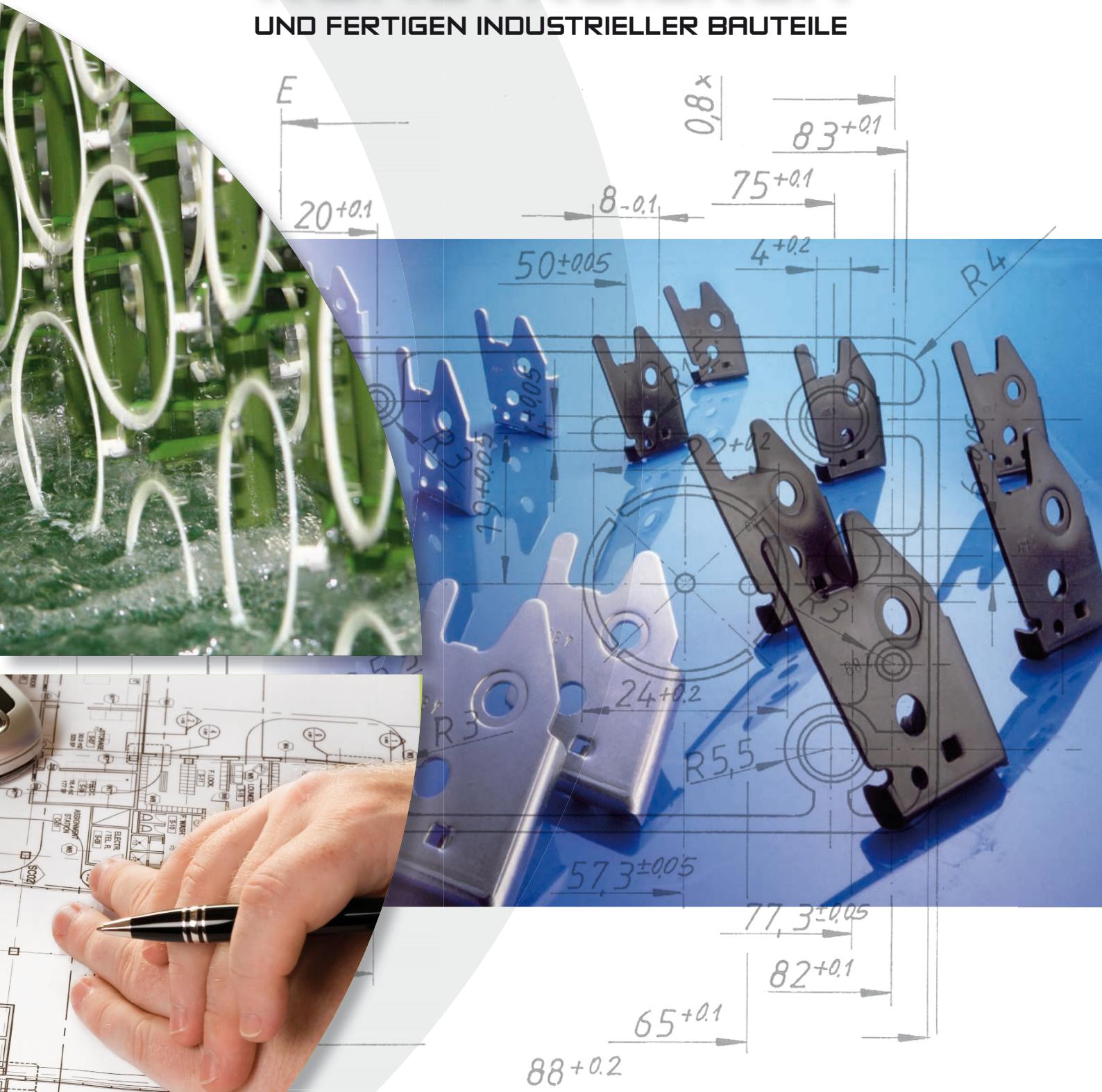
GALVANISIERGERECHTES KONSTRUIEREN

UND FERTIGEN INDUSTRIELLER BAUTEILE



Eine Information für Konstrukteure und Designer

Zentralverband
Oberflächentechnik e.V.

Zentralverband
Oberflächentechnik e.V.

Postfach 101063, 40710 Hilden
Telefon +49 (0) 2103-25 56 20
Telefax +49 (0) 2103-25 56 27
service@zvo.org

Stand: 01.02.2016

Galvanisiergerechtes Konstruieren und Fertigen industrieller Bauteile

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 5

2. Definitionen 5

3. Vorgänge des Galvanisierens 6
- 3.1 Elektrolytische Verfahren 6
  - 3.1.1 Verfahren mit löslichen Anoden 6
  - 3.1.2 Verfahren mit unlöslichen Anoden 6
  - 3.1.3 Gesetzmäßigkeiten der elektrolytischen Metallabscheidung 7
- 3.2 Außenstromlose Verfahren 7

4. Konstruktionselement Oberfläche 9
- 4.1 Zweck eines Metallüberzuges 9
- 4.2 Schichtwerkstoffe 9
- 4.3 Klassifikation technischer Oberflächen 9
- 4.4 Einfluss des Grundwerkstoffes 10
- 4.5 Verfahrensbedingte Auswirkungen auf den Grundwerkstoff 10
- 4.6 Eigenschaften metallbeschichteter Bauteile 11
- 4.7 Funktions- und Beanspruchungsanalyse 13

5. Galvanisiergerechtes Konstruieren 15
- 5.1 Festlegungen wesentlicher Flächen 15
- 5.2 Partielles Beschichten 15
- 5.3 Elektrolytische Verfahren 15
  - 5.3.1 Niederschlagsverteilung 15
  - 5.3.2 Kanten und Spitzen 16
  - 5.3.3 Vertiefungen 17
  - 5.3.4 Hohlkörper 17
  - 5.3.5 Sperrige Teile 20
  - 5.3.6 Passformen – Bohrungen 20
  - 5.3.7 Festlegen von Maßen und Bezugspunkten 21
  - 5.3.8 Aufhängen und Kontaktieren der Bauteile – Trommeln und Gestelle 21
- 5.4 Außenstromlose Verfahren 22
  - 5.4.1 Niederschlagsverteilung 22
  - 5.4.2 Beschichtungsgerechte Werkstückform 23
  - 5.4.3 Aufhängen der Werkstücke – Trommeln und Gestelle 23
  - 5.4.4 Festlegen von Maßen und Bezugspunkten 23
- 5.5 Zeichnungs- und Bestellangaben 23

6. Galvanisiergerechtes Fertigen 24
- 6.1 Grundwerkstoffe 24
- 6.2 Mechanisches Bearbeiten 25

Normenverzeichnis 27

Schrifttum 34

Übersichtstabelle: Für jeden Anspruch die richtige Schicht 18

1. Einleitung

Bauteile werden aus Gewichts- und Kostengründen in zunehmendem Maße mit immer weniger Reserven dimensioniert. Ihre Oberflächen müssen Anforderungen erfüllen, die die Möglichkeiten des Bauteilwerkstoffes übersteigen. Dies zwingt zum Veredeln mit funktionell geeigneten Schichten. Hier spielen Metallschichten aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen und Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle.
Die galvanisch oder außenstromlos („chemisch") arbeitenden Metallabscheideverfahren und deren Schichten nehmen auf die Eigenschaften von Bauteilen reversiblen oder irreversiblen Einfluss. Für das Entwickeln, Konstruieren und Fertigen eines Bauteiles ist somit die Kenntnis sowohl der Auswirkungen von Verfahren und Schichten als auch der Funktionsweise der Schichten unbedingt erforderlich. Sollen das Leistungsvermögen galvanotechnischer Fertigung voll genutzt und die technisch und wirtschaftlich bestmöglichen Eigenschaften eines oberflächenveredelten Teiles erreicht werden, so müssen Fertigungsplaner und Konstrukteure bereits im Planungsstadium mit den Metallurgen und Oberflächentechnikern reden und mit diesen alle notwendigen Informationen austauschen.
Hierzu gehört auch das Wissen über die Wechselwirkungen zwischen Bauteilform und Schichtausbildung. Feste Regeln für das Festlegen der Form von Teilen, die veredelt werden sollen, gibt es nicht. Kennt der Konstrukteur jedoch die Grundprinzipien des galvanischen oder chemischen Metallabscheidens und weiß er einiges über die Faktoren, die das Abscheiden eines Niederschlages auf Werkstücken beeinflussen, so wird er in der Lage sein, Fehler zu vermeiden und Bauteile zu entwerfen, die den Forderungen der Praxis weitgehend entsprechen.

2. Definitionen

Zur eindeutigen Verständigung zwischen den Vertretern der an der galvanotechnischen Fertigung beteiligten verschiedenen Fachdisziplinen sind häufig benutzte Begriffe im Rahmen der Gütesicherung beschrieben und definiert worden (sowie DIN EN ISO 2080 UND DIN EN ISO 8044). An dieser Stelle ist es notwendig, aus dieser Zusammenstellung drei wichtige Definitionen wiederzugeben:

- Unter galvanotechnischen Verfahren sind alle Verfahren zur Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen zu verstehen, die zum Herstellen metallischer Überzüge aus Elektrolytlösungen unter Ausnutzung eines Transportes von Ionen und Elektronen dienen. Die Überzugseigenschaften werden durch Vorbehandeln, Galvanisieren und Nachbehandeln definiert eingestellt. Damit stellen neben den eigentlichen Galvanisierverfahren auch die Vorbehandlungs- und Nachbehandlungsverfahren galvanotechnische Verfahren dar.
- Das Galvanisieren umfasst die eigentlichen Verfahren zum Abscheiden von Metallen aus Elektrolytlösungen unter Ausnutzung eines Transportes von Ionen und Elektronen. Galvanisierverfahren können demnach mit äußerer Gleichstromquelle (elektrolytisch) oder außenstromlos (chemisch) arbeiten.
- Die Funktionen eines Metallüberzuges können dekorativer und nichtdekorativer Natur sein. Steht das dekorative Aussehen einer Metallschicht neben nichtdekorativen Aufgaben wie Korrosions- und Verschleißbeständigkeit im Vordergrund, liegt eine dekorative Oberflächenveredelung vor; tritt das dekorative Aussehen hingegen gegenüber den nichtdekorativen Aufgaben in den Hintergrund, spricht man von einer funktionellen Oberflächenveredelung.

3. Vorgänge des Galvanisierens

Die zu galvanisierende Werkstückoberfläche muss völlig frei von Fett, oxidischen Schichten oder anderen Verunreinigungen sein, damit der Niederschlag gut auf dem Grundmetall haftet. Um dies zu erreichen, werden die Teile vor dem Galvanisieren in verschiedenen geeigneten Reinigungs- und Aktivierungslösungen vorbehandelt; zwischengeschaltete Spülvorgänge vermeiden Verschleppungen von einer Lösung in die nächste und sorgen dafür, dass die jeweilige Behandlung auf einer sorgfältig gereinigten Oberfläche stattfindet und ein bestmögliches Behandlunsgergebnis erzielt wird.

3.1 Elektrolytische Verfahren

3.1.1 Verfahren mit löslichen Anoden

Zum elektrolytischen Abscheiden eines Metalls taucht man das Werkstück in eine wässrige Metallsalzlösung, den Elektrolyten, und schließt es an den negativen Pol einer Gleichstromquelle an. Es ist somit als Kathode geschaltet. Gegenelektroden sind die mit dem positiven Pol der Gleichstromquelle verbundenen Anoden, die in bestimmter Entfernung zumeist auf beiden Seiten der Kathode im Elektrolyten hängen (Bild 1). Als Anodenmaterial verwendet man das Metall, das auf dem Werkstück abgeschieden werden soll; Voraussetzung ist, dass es sich unter den Verfahrensbedingungen möglichst gleichmäßig und rückstandsfrei und mit hoher Stromausbeute anodisch auflösen lässt. Gängige Anodenformen sind Platten, Stangen, Knüppel oder in Titankörben gehaltenes Stückmaterial (Squares oder Pellets).
Der Elektrolyt enthält hauptsächlich ein gelöstes Salz des Metalls, das abgeschieden werden soll. Fließt nun durch den Elektrolyten ein Gleichstrom, so werden die Metallionen durch den Elektrolyten zur Kathode transportiert und dort als Metall abgeschieden; gleichzeitig löst sich Anodenmetall in Form von Metallionen auf, so dass die Metallionenkonzentration des Elektrolyten im Wesentlichen konstant bleibt (Bild 2, [1]). Weitere Elektrolytbestandteile sorgen für wirtschaftliche Abscheidegeschwindigkeiten und Stromausbeuten durch Einschränken unerwünschter Nebenreaktionen und tragen gezielt zu den Eigenschaften bei, die die Schicht anforderungsgemäß besitzen soll. Die Abscheidetemperatur des Elektrolyten ist im Allgemeinen nicht höher als 70 °C.

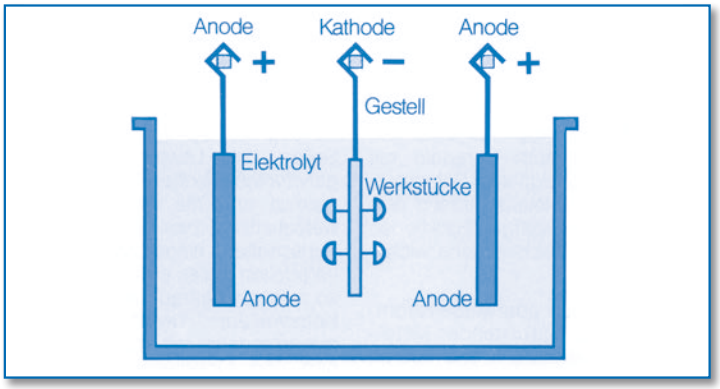


Bild 1: Schematische Darstellung eine Bades zum elektrolytischen Metallabscheiden

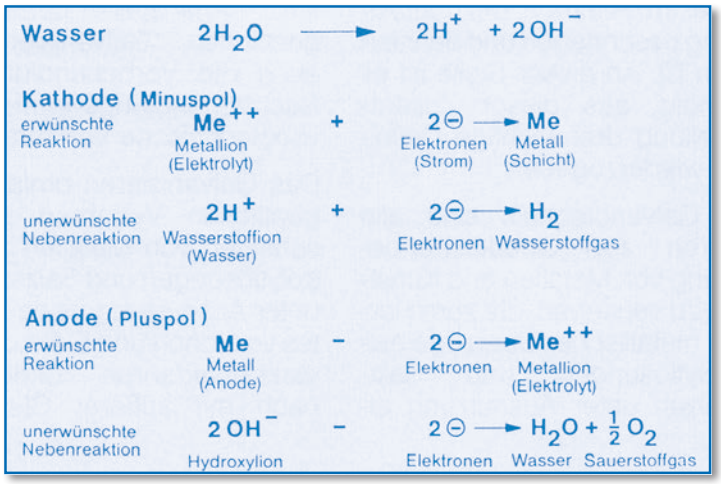


Bild 2: Elektrochemische Reaktionen des elektrolytischen Metallabscheidens [1]

3.1.2 Verfahren mit unlöslichen Anoden

Kann ein Schichtwerkstoff nicht anodisch aufgelöst werden, muss man auf unlösliche Anodenwerkstoffe, sogenannte Inertanoden, zurückgreifen. Die Konzentration der Metallionen im Elektrolyten wird nun nicht durch Anodenauflösung, sondern durch regelmäßige Zugaben des entsprechenden Metallsalzes aufrecht erhalten.
Die meisten Schichtwerkstoffe wie Gold, Kupfer, Nickel, Silber, Zink und andere sind als Anoden so aufbereitet, dass sie sich anforderungsgemäß anodisch einwandfrei auflösen. Bei Chrom hingegen ist dies nicht der Fall; zum Verchromen setzt man daher unlösliche Blei-Zinn-, Blei-Zinn-Antimon- oder platinierte Titan-Anoden ein. Die je nach Verfahren zu reduzierenden Chrom(VI)- oder Chrom(III)-Ionen werden durch geeignete Chromsalze ergänzt, deren Konzentration im Elektrolyten man regelmäßig überwachen und konstant halten muss.
Unlösliche Anoden werden auch bei anderen Verfahren eingesetzt. Beispiele sind: alkalische Zink- und Zinklegierungselektrolyte, Gold- und andere Edelmetallelektrolyte.

3.1.3 Gesetzmäßigkeiten der elektrolytischen Metallabscheidung

Die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten der elektrolytischen Metallabscheidung sind:

- Die Menge des abgeschiedenen Metalls ist nach dem 1. Faraday'schen Gesetz direkt proportional der durch den Elektrolyten hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge, also dem Produkt aus Galvanisierdauer („Expositionszeit") und Stromstärke.
- Bei einer gegebenen zu galvanisierenden Werkstückoberfläche ist die Dicke der elektrolytisch aufgetragenen Metallschicht direkt proportional der angelegten Kathodenstromdichte und der Expositionszeit. So werden z. B. bei einer Kathodenstromdichte von 1 A/dm^2 pro Stunde ca. 12 µm Nickel abgeschieden.
- Die örtliche Kathodenstromdichte hängt von der geometrischen Form der Oberfläche des zu galvanisierenden Bauteiles und deren relativer Lage zu anderen Bauteiloberflächen in der Umgebung und zur Anode ab. Entsprechend ungleichmäßig ist die von ihr abhängige Metallschichtdicke über die Bauteiloberfläche verteilt.

Die Kathodenstromdichte ist direkt proportional der Dichte der elektrischen Feldlinien zwischen den Anoden und dem als Kathode geschalteten Werkstück. Sie stehen unabhängig von der räumlichen Lage der Anoden und Kathoden stets senkrecht auf deren Oberflächen und konzentrieren sich an Spitzen, Ecken und Kanten („Blitzableiter-Effekt„), vermindern sich hingegen in Hohlräumen und Vertiefungen. Entsprechend sind Feldliniendichte und Kathodenstromdichte und somit auch die Niederschlagsdicke an Ecken, Kanten und hervorspringenden Flächen oder Punkten höher und in Vertiefungen sowie in mittleren Zonen großer Flächen niedriger als die rechnerisch ermittelten Durchschnittswerte (Bild 3). Sogar eine völlig flache Oberfläche zeigt keine gleichmäßige Stromdichteverteilung; die Stromdichte und somit auch die Niederschlagsdicke sind an ihren Kanten höher als in der Mitte der Fläche.

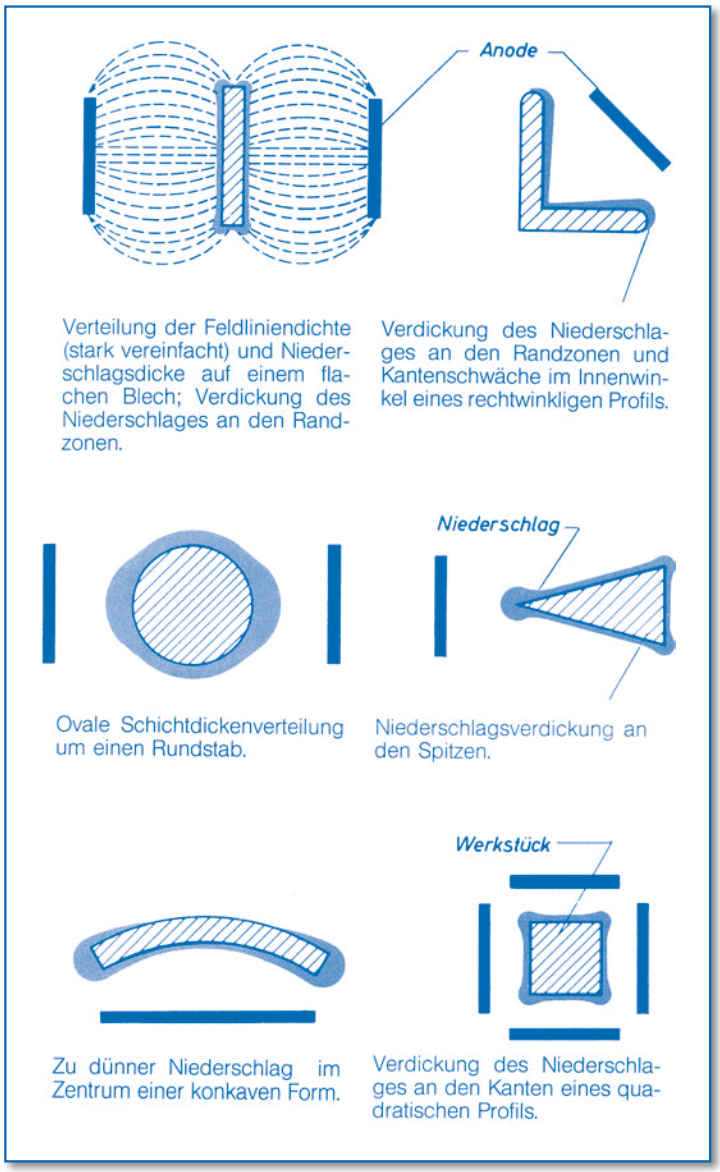


Bild 3: Typische Verteilung eines elektrolytisch abgeschiedenen Niederschlages auf Oberflächen Verschiedener geometrischer Form

3.2 Außenstromlose Verfahren

Bei elektrolytischen Verfahren reduzieren die auf der kathodisch geschalteten Bauteiloberfläche von einer äußeren Gleichstromquelle angebotenen Elektronen die Metall-Ionen des Elektrolyten zum Metall. Bei außenstromlos arbeitenden Verfahren hingegen geschieht dies durch geeignete Reduktionsmittel, die hierbei selbst oxidiert werden. Der bei solchen Redox-Reaktionen (**Red**uktions- und **Ox**idationsreaktionen) zwischen den Reaktionspartnern stattfindende Elektronenübergang stellt zwar ebenfalls einen Stromfluss dar, ist aber systemintern und unabhängig von einer äußeren Stromquelle. Zur deutlichen Unterscheidung von elektrolytischen Verfahren spricht man daher von einem außenstromlosen Metallabscheiden. Allerdings konnte sich diese Formulierung in der Praxis nicht recht durchsetzen; gängiger sind die Begriffe „stromloses" oder „chemisches" Metallabscheiden.

Die stromlosen Abscheideverfahren benutzen also Elektrolyte, die neben dem Metallsalz auch reduzierende Verbindungen enthalten. Hinzu kommen weitere Bestandteile, die für wirtschaftliche Abscheidegeschwindigkeiten und Metallausbeuten sorgen, unerwünschte Nebenreaktionen einschränken und gezielt zu den geforderten Schichteigenschaften führen.

Die Abscheidetemperaturen der Elektrolyte hängen davon ab, ob Metallwerkstoffe oder Kunststoffe beschichtet werden sollen; bei Metallwerkstoffen liegen sie im Allgemeinen im Bereich 85 – 90°C, bei Kunststoffen zwischen 25 – 40°C.

Das bekannteste Verfahren ist die stromlose Vernickelung; beim Galvanisieren von Kunststoffen setzt man wahlweise auch das außenstromlose Verkupfern ein.
Als Reduktionsmittel für das außenstromlose Vernickeln werden Natriumhypophosphit und seltener Natriumborhydrid (Natriumboranat) verwendet; entsprechend unterscheidet man Hypophosphit- und Borhydrid-Verfahren.

Hypophosphitverfahren:

Katalysator

$$NaH_2PO_2 + H_2O + NiSO_4 \longleftrightarrow Ni + NaH_2PO_3 + H_2SO_4$$

Borhydridverfahren:

Katalysator

$$NaBH_4 + 8\ NaOH + 4\ NiCl_2 \longleftrightarrow 4\ Ni + NaB(OH)_4 + 8\ NaCl + 4\ H_2O$$

Im betriebsbereiten Zustand findet keine Reaktion zwischen Metall- und Reduktionsmittel-Ionen statt; geeignete Stabilisatoren sorgen für eine entsprechende Stabilisierung des Redox-Systems. Erst durch Katalysatoren wird die Reaktion eingeleitet, und hier fügt es sich in technisch äußerst geeigneter Weise, dass die meisten der zu vernickelnden Werkstoffe katalytisch wirksam sind oder auf ihnen durch einfache Maßnahmen ein katalytischer Start herbeigeführt werden kann; somit ist es möglich, das chemische Metallabscheiden gezielt auf der Bauteiloberfläche ablaufen zu lassen. Auch das abgeschiedene Nickel ist ein Katalysator, so dass nach dem ersten Abdecken der Werkstoffoberfläche mit Nickel die Abscheidereaktion nicht unterbrochen wird.
Die durch die Abscheidereaktionen verbrauchten Reaktionspartner müssen laufend ergänzt werden, um die Sollkonzentrationsbereiche einzuhalten; man vermeidet so Schwankungen der Schichteigenschaften außerhalb der zulässigen Toleranzen. Die sich im Verlaufe des Betriebes bildenden und anreichernden Reaktionsprodukte beeinflussen die Schichteigenschaften innerhalb der Elektrolytlebensdauer nicht; überschreiten sie bestimmte Grenzkonzentrationen, muss der Elektrolyt verworfen werden.
Bestimmte Elemente wie Antimon, Arsen, Blei, Kadmium, Zink, Zinn und Schwefel wirken bereits in geringen Konzentrationen als Katalysatorgifte; sie können zum Beispiel als Legierungsbestandteile des Grundwerkstoffes in bestimmter Menge und Verteilung die katalytische Wirkung blockieren und hierdurch das Nickelabscheiden behindern oder sogar völlig unterbinden.
Parallel hierzu ablaufende Nebenreaktionen führen zur Bildung von Phosphor oder Bor, die als Phosphide oder Boride in die Nickelschicht eingebaut werden; außerdem findet eine intensive Wasserstoffentwicklung statt:
Die Teilreaktionen der mittels Natriumhypophosphit oder Natriumborhydrid ablaufenden Nickelabscheidung sind im Einzelnen noch nicht eindeutig geklärt; folgende Summenreaktionen sind bekannt:

Hypophosphitverfahren:

Katalysator

$$NaH_2PO_2 + H_2O \longleftrightarrow NaH_2PO_3 + H_2$$

Katalysator

$$NaH_2PO_2 + [H] \longleftrightarrow NaOH + H_2O + P$$

Borhydridverfahren:

Katalysator

$$NaBH_4 + 4\ H_2O \longleftrightarrow NaB(OH)_4 + 4\ H_2$$

Katalysator

$$2\ NaBH_4 + 4\ NiCl_2 + 6\ NaOH \longleftrightarrow 8\ NaCl + 6\ H_2O + H_2 + 2\ Ni_2B$$

Bei den heute eingesetzten Stromlos-Nickel-Verfahren haben Anlagentechnik und Verfahrenschemie einen hohen Standard erreicht; Nebenreaktionen werden weitgehend unterdrückt oder aber zum Einstellen bestimmter Niederschlagseigenschaften gezielt gesteuert. Letzteres gilt insbesondere für den Phoshpor- oder Borgehalt der Schichten, der ihre Eigenschaften in technisch besonders interessantem Maße beeinflusst. Da die Einbauraten von Phosphor oder Bor entsprechend obigen Reaktionen pH-wertabhängig sind, kommt der Steuerung des pH-Wertes während des Metallabscheidens große Bedeutung zu.
Das Problem der von der Oberflächengeometrie eines Werkstückes abhängigen Kathodenstromdichte und Schichtdickenverteilung, das bei elektrolytischen Verfahren eine so wichtige Rolle spielt, existiert bei den außenstromlos arbeitenden Verfahren nicht. Stromlos abgeschiedene Nickel-Schichten zeichnen sich daher gegenüber elektrolytisch abgeschiedenen Nickelüberzügen durch eine von engen Toleranzen begrenzte Schichtdickenverteilung aus (Bild 4), sofern für einen guten Elektrolytaustausch an allen Oberflächenbereichen gesorgt ist.

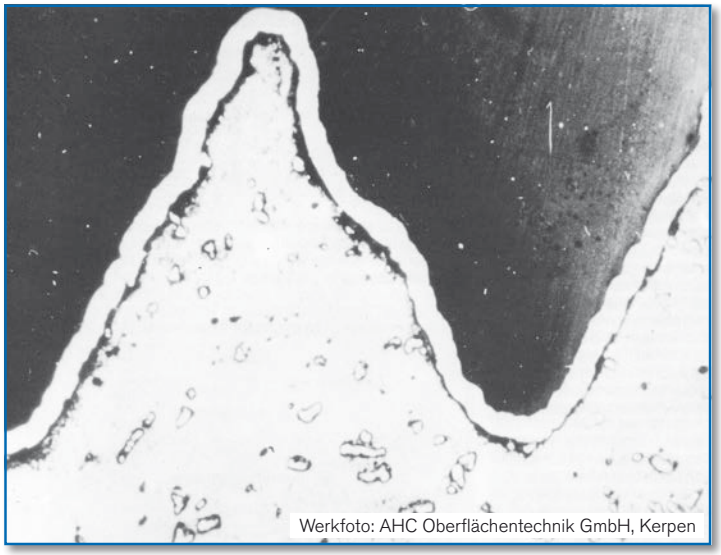


Bild 4: Sehr gleichmäßige Schichtdickenverteilung eines Chemisch-Nickel-Überzuges (Hypophosphit-Verfahren) auf der komplizierten Oberflächenform eines Gewindes.

4. Konstruktionselement Oberfläche

4.1 Zweck eines Metallüberzuges

Durch Beschichten wird ein Verbundwerkstoff erzeugt. Der Grundwerkstoff liefert die Form und die Festigkeitseigenschaften; der Überzug ist für das Oberflächenverhalten verantwortlich. Die physikalischen, chemischen, elektrochemischen und mechanischen Eigenschaften der Beschichtung bestimmen die Bauteileeigenschaften an der Oberfläche; zwischen ihr und dem Grundwerkstoff treten Wechselwirkungen auf. Auf das jeweilige Grundmetall abgestimmte Beschichtungsverfahren und -werkstoffe ermöglichen es, die Eigenschaften eines Überzugs gezielt an die erwarteten Praxisanforderungen anzupassen und somit seine optimale Funktion sicherzustellen (Tabelle 1 [2]).

	Schicht	Korrosionswiderstand[1]	Oxidationswiderstand	Verschleißwiderstand abrasiv	Verschleißwiderstand adhäsiv[2]	Gleitvermögen	Haftfestigkeit	Einfluß auf Bauteilfestigkeit	Härte HV	Maximale Anwendungstemperatur (°C)
Elektrolytisch und chemisch abgeschiedene Metallschichten	Aluminium	●●●[3]	●●	●●●[4]		●	●	—	50	400
	Chrom	●●●[5]	●●●	●●●	●●	●●	●●●	↓	900	500
	Nickel	●●	●	●	●		●●●	↓	250	500
	Nickel + Siliziumcarbid	●●	●	●●	●●	●	●●●	↓	420	400
	Stromlos Nickel	●●		●●	●●		●●●	↓	500	500
	400 °C / 1 h	●		●●●	●●●		●●●	↓	900	500
	Stromlos Nickel + Siliziumcarbid	●●		●●●	●●		●●●	↓	650	400
	Stromlos Nickel + Diamant	●●		●●●	●●		●●●	↓	700	500
	Stromlos Nickel + PTFE	●		●	●●●		●●●	↓	280	300
	Kupfer	●●	●	●	●●	●●●	●●●	—	190	350
	Messing	●●		●●	●●	●●	●●●		600	<200
	Bronze	●●		●●	●●	●●	●●●		700	<200
	Zink	●●●[6]		●	●	●●	●●●	—	80	250
	Silber	●	●	●	●●●	●●●	●●●	—	60	850
	Zinn	●●●		●	●●●	●●●	●●	—	5	100
	Blei	●●●		●	●●●	●●●	●●	—	5	200
	Blei/Zinn	●●●		●	●●●	●●●	●●	—	10	100

[1] auf Stahl, [2] gegen Stahl, [3] kathodischer Schutz, [4] anodisiert, [5] abhängig von Schichtsystem (Ni/Cr).
● niedrig, ●● mittel, ●●● hoch, — kein Einfluß, ↓ Abnahme, ↑ Zunahme. * nach 400 °C / 16 h

Tabelle 1: Funktionen und Eigenschaften von Oberflächenschichten [2]

Überwiegend werden Metallüberzüge auf Neuteilen abgeschieden. In geringerem Umfange und teilweise mit wesentlich größeren Schichtdicken setzt man sie auch zur Reparatur korrodierter, verschlissener oder fehlbearbeiteter Oberflächenbereiche ein; der Schichtwerkstoff soll hier nicht nur Oberflächenfunktionen erfüllen, sondern auch Maßabweichungen korrigieren.

4.2 Schichtwerkstoffe

Im Bereich der dekorativen Oberflächenveredelung verwendet man bevorzugt Nickel, Chrom und Zink, zum Teil auch Kupfer und Messing; als Edelmetalle spielen Gold und Silber eine große Rolle. Diese Werkstoffe werden entweder als Einzelschichten oder in Kombinationen miteinander eingesetzt. Zinkschichten erhalten zumeist noch eine korrosionshemmende Passivierung, bei Bedarf auch eine zusätzliche Versiegelung; Kupfer-, Messing- und Silberauflagen färbt man in großem Umfange antik ein oder schützt sie durch eine Klarlackierung.
Wichtige funktionelle Oberflächen sind die Kunststoffgalvanisierung (für dekorative Anwendungen), Hartchrom und außenstromlos abgeschiedenes Nickel sowie Zink und Zinklegierungen (vor allem ZnNi, ZnFe), elektrolytisch abgeschiedenes Nickel und Nickellegierungen. Aufgrund ihres Phosphor- oder Borgehaltes unterscheiden sich stromlos abgeschiedene Nickelschichten in ihren mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften zum Teil erheblich und vorteilhaft von elektrolytisch abgeschiedenem Nickel; dieser Unterschied wird von der Höhe des Phosphor-oder Boranteiles beeinflusst und kann durch ein thermisches Nachbehandeln noch vergrößert werden.
Weitere funktionell eingesetzte Schichtwerkstoffe sind Gold, Silber, Kupfer, Blei und Zinn sowie Legierungen dieser Metalle. Kadmium darf wegen seiner Umweltgefährlichkeit innerhalb der EU nur noch in Ausnahmefällen (z. B. in der Luft- und Raumfahrt) verwendet werden.
Zunehmende Bedeutung gewinnt die Beschichtung elektrischer und elektronischer Bauteile und Kontakte mit Edelmetallen, die die zuverlässige Funktion zahlreicher Maschinen und Geräte sicherstellen.

4.3 Klassifikation technischer Oberflächen

Technische Oberflächen lassen sich hinsichtlich Funktionsweise, Beanspruchungsart und Anwendungsbereich in sechs Klassen einteilen (Tabelle 2 [2]):

- Sichtflächen, Deckflächen oder Signalflächen ohne mechanische, jedoch mit klimatischen und anderen Umweltbeanspruchungen;
- Thermisch, strahlungsphysikalisch oder elektrisch beanspruchte Oberflächen;
- Oberflächen in Kontakt mit ruhenden Flüssigkeiten unter korrosionschemischer Beanspruchung;
- Oberflächen in Kontakt mit strömenden Flüssigkeiten unter Kavitations- oder Erosionsbeanspruchung;
- Oberflächen in Kontakt mit bewegten Gegenkörpern unter tribologischen Beanspruchungen;
- Oberflächen unter Einwirkung von Mikroorganismen und biologischen Beanspruchungen.

Art und Funktion technischer Oberflächen	Oberflächenbeanspruchung	Oberflächenveränderung bzw.-schädigung
Außenflächen von techn. Produkten aller Art (Sichtflächen, Deckflächen, Signalflächen, ...)	Mechanisch unbeansprucht (Klima– bzw. Umweltbeanspruchung)	Adsorption Verschmutzung Verwitterung
Oberflächen, die Wärme, Strahlung oder elektr. Strom ausgesetzt sind (Isolierflächen,elektr. Kontakte, ...)	Thermische, strahlungsphysikalische, elektr. Beanspruchung	Passivierung Oxydation Verzunderung
Oberflächen in Kontakt mit Flüssigkeiten (Behälter,Karosserie - teile, ...)	Elektrochemische Beanspruchung	Korrosion Elektrolyse
Oberflächen in Kontakt mit strömenden Medien (Rohrleitungen, Ventile, ...)	Strömungsbeanspruchung	Kavitation Erosion
Oberflächen in Kontakt mit bewegten Gegenkörpern (Lager, Bremsen, Getriebe, ...)	Tribologische Beanspruchung (Reibbeanspruchung)	Kontaktdeformation Verschleiß
Oberflächen in Kontakt mit Mikroorganismen	Biologische Beanspruchung	Biologische Schädigung

Tabelle 2: Anwendungsbereiche und Beanspruchungsarten technischer Oberflächen [2]

In der Praxis liegen die Beanspruchungsarten nicht streng nach diesen Klassen getrennt vor; Metallschichten oder Schichtsysteme aus mehreren einzelnen Metallschichten erfüllen zumeist mehrere Funktionen; so müssen im Falle von vergoldeten Kontakten die Überzüge nicht nur elektrisch leitend, sondern auch verschleißbeständig sein. Sehr oft wird zusätzlich zu funktionellen Anforderungen wie Korrosions- oder Verschleißschutz auch ein gefälliges dekoratives Aussehen oder eine Signalwirkung verlangt.

4.4 Einfluss des Grundwerkstoffes

Die zu galvanisierenden oder chemisch zu veredelnden Bauteile dürfen keine Werkstoff-, Verarbeitungs-, Bearbeitungs- und Oberflächenfehler wie zum Beispiel bei Walzerzeugnissen Risse, Porennester, Fremdstoffeinschlüsse und Doppelungen, bei Gussstücken Einfall- und Kaltschweißstellen, Schrumpf- und Kerbrisse sowie Wirbelungen und Lunker enthalten. Der Grundwerkstoff muss bezüglich Art und Zusammensetzung, Gefüge, Warmbehandlungszustand, Eigenspannung und Oberflächenfeingestalt veredelungsgerecht sein.
Ausführliche Angaben zu Einflussgrößen von Grundwerkstoff und Grundwerkstoffoberfläche, Rückwirkungen auf den abgeschiedenen Überzug und das veredelte Bauteil, Schädigungsmechanismen, Abhilfemaßnahmen und Prüfungen enthalten Arbeitsblätter der DGO [3]; eine Checkliste für zu galvanisierende Teile listet alle bedeutsamen Fragen auf, die vor Beginn der galvanotechnischen Fertigung durch Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber und Galvaniseur beantwortet sein sollen [4].

4.5 Verfahrensbedingte Auswirkungen auf den Grundwerkstoff

Das elektrolytische wie auch außenstromlose Veredeln kann die Bauteile durch Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung gefährden.
Spannungsrisskorrosion kann auftreten, wenn Werkstücke aus hochfesten Werkstoffen unter Zugspannung stehen und gleichzeitig dem Einfluss chemischer Agenzien und erhöhter Temperatur ausgesetzt sind. Zu den gefährdeten Werkstoffen zählen niedriglegierte Stähle, Chrom-Stähle und Chrom-Nickel-Stähle mit Festigkeiten über 1000 MPa, nicht hingegen Nickel- und Kobalt-Legierungen. Einwirkende chemische Agenzien sind neben den Beschichtungselektrolyten auch die Vorbehandlungslösungen. Da der galvanotechnische Fertigungsprozess auf chemische Agenzien und zumeist auch Temperatur nicht verzichten kann, müssen die Zugspannungen abgebaut werden; hier bieten sich Warmbehandeln (Tabelle 3 [1]) oder das Einbringen von Druckspannungen durch Verdichtungsstrahlen an.

	Schicht	Grundwerkstoff mit Festigkeit ≧ 1000 MPa							
		Niedriglegierter Stahl mit Anlaßtemperatur				Chrom-Stahl		Chrom-Nickel-Stahl	
		T ≧ 200 °C		T < 200 °C					
		Entspann-Parameter							
		°C	h	°C	h	°C	h	°C	h
Chemisch/ elektrolytisch abgeschiedene Schichten:	Chrom	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Nickel	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Stromlos Nickel	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Kupfer	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Stromlos Kupfer	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Messing	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Bronze	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Zink	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Silber	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Zinn	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1
	Blei	200	1	T-20	≧ 1	200	1	200	1

Tabelle 3: Entspannen metallbeschichteter hochfester Stähle – Verfahrensparameter [1]

Eine Wasserstoffversprödung (s. auch DIN 50969-1) wird durch naszierenden Wasserstoff verursacht, der als unerwünschte Nebenreaktion beim elektrolytischen und außenstromlosen Metallabscheiden sowie bei bestimmten elektrolytischen und chemischen Vorbehandlungsverfahren auftritt. Stähle mit Festigkeiten von mehr als 1000 MPa neigen dazu, den atomaren Wasserstoff aufzunehmen; diese Wasserstoffbelastung beeinflusst bestimmte Eigenschaften, so ihre Verformbarkeit, negativ. Die Rekombination von Wasserstoff-Atomen zu Molekülen an Gitterstörstellen führt zu gasgefüllten Hohlräumen mit Drücken, die die Festigkeit von Stählen übersteigen und zu Rissen und Blasen führen können. Bei mechanisch belasteten hoch-

festen Stählen oder weicheren Stählen mit ausgehärteter Oberfläche kann Wasserstoff transkristalline Risse verursachen. Selbst kleine Wasserstoffmengen können in hochfesten Stählen Anrisse und Kerben erzeugen.
Man unterscheidet zwischen reversibler und irreversibler Wasserstoffversprödung. Interstitiell gelöster Wasserstoff verursacht eine reversible Versprödung, die sich durch schlechte Verformbarkeit äußert; hierzu genügen bereits einige Zehntel ppm Wasserstoff. Höhere Wasserstoffkonzentrationen führen zu einer irreversiblen Schädigung; der rekombinierte, nicht mehr diffusionsfähige Wasserstoff lässt sich nicht mehr aus dem Werkstoffgitter entfernen.
Die Gefahr eines Wasserstoffversprödens besteht für niedriglegierte Stähle, Chrom-Stähle und Chrom-Nickel-Stähle mit Festigkeiten von über 1000 MPa; sie besteht nicht für Nickel- und Kobalt-Werkstoffe, selbst wenn diese hoch fest sind. Eine reversible Versprödung kann durch Ausgasen des Wasserstoffs mittels Wärmebehandlung beseitigt werden (Tabelle 4 [1]).

Schicht		Schichtdicke	Grundwerkstoff mit Festigkeit ≧ 1000 MPa							
			Niedriglegierter Stahl mit Anlaßtemperatur				Chrom-Stahl		Chrom-Nickel-Stahl	
			T ≧ 200 °C		T < 200 °C					
			Ausgas-Parameter							
		µm	°C	h	°C	h	°C	h	°C	h
Chemisch/ elektrolytisch abgeschiedene Schichten	Chrom	≦ 100	200	3	T-20	6	200	3	200	3
		> 100	200	6	T-20	12	200	6	200	6
	Nickel		200	1	T-20	4	200	1	200	1
	Stromlos Nickel		200	2	T-20	4	200	2	200	2
	Kupfer	≦ 100	200	1	T-20	6	200	1	200	1
		> 100	200	2	T-20	12	200	2	200	2
	Stromlos Kupfer		200	1	T-20	6	200	1	200	1
	Messing		200	1	T-20	6	200	1	200	1
	Bronze		200	1	T-20	6	200	1	200	1
	Zink	≦ 10	200	8	T-20	12	200	8	200	8
		> 10	200	12	T-20	24	200	12	200	12
	Silber	≦ 20	200	1	T-20	6	200	1	200	1
		> 20	200	6	T-20	12	200	6	200	6
		> 10	200	12	T-20	24	200	12	200	12
	Zinn		150	1	150	1	150	1	150	1
	Blei		200	1	T-20	6	200	1	200	1
	Blei–Zinn		150	1	150	1	150	1	150	1

Tabelle 4: Warmbehandeln metallbeschichteter hochfester Stähle – Verfahrensparameter [1]

4.6 Eigenschaften metallbeschichteter Bauteile

Das elektrolytische und chemische Auftragen von Metallschichten beeinflusst Eigenschaften, die für das Konstruktionselement Oberfläche von Bedeutung sind. Dies sind (siehe auch Tabellen 1 [1] und 5 [2]):

Stoffeigenschaften:
- chemische Zusammensetzung,
- Phasenzusammensetzung,
- Gefüge;

geometrische Eigenschaften:
- Schichtdicke,
- Rauheit;

technologische Eigenschaften:
- Härte,
- Duktilität,
- Eigenspannungszustand
- Haftung;

funktionelle Eigenschaften:
- Einfluss auf das Festigkeitsverhalten des Grundwerkstoffes,
- Korrosionsverhalten,
- Verschleißverhalten,
- Weitere Anforderungen wie optischer Glanz, elektrische Leitfähigkeit u. a. m..

Durch das Auftragen von Oberflächenschichten werden chemische Zusammensetzung, Phasenzusammensetzung und Gefüge der veredelten Oberflächenbereiche verändert. Nach Schmaltz setzen sich diese zusammen aus der Adsorptions- und Reaktionsschicht auf dem Metallüberzug (äußere Grenzschicht), dem sich nach innen anschließenden Metallüberzug (innere Grenzschicht), der durch das Beschichten beeinflussten Oberflächenzone des Grundwerkstoffes und abschließend dem unbeeinflussten Grundwerkstoff [6].
Das Beschichten von Oberflächen verändert die Rauheitswerte des Grundmaterials in charakteristischer Weise [7]. Dies kann, bedingt durch Werkstoffart und Bearbeitungszustand der Oberfläche, bereits beim Vorbehandeln der Fall

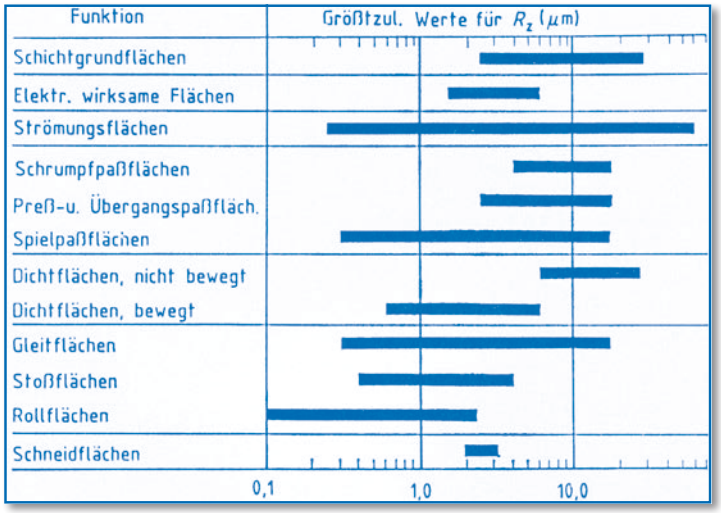


Bild 5: Zulässige Werte der gemittelten Rauhtiefe Rz für einige funktionelle Anwendungen [2]

sein. Elektrolytisches Verchromen und Vernickeln vermindern oder erhöhen die Rauheit je nach verwendetem Elektrolyttyp, Verfahrensbedingungen und Schichtdicke. Chemisches Vernickeln behält sie im Allgemeinen unverändert bei, doch sind auch hier Abhängigkeiten vom Elektrolyttyp und der Schichtdicke zu beachten.
In Bild 5 sind für einige funktionelle Anforderungen die Rauheitsbereiche angegeben, in denen die in mehreren Industrieunternehmen vorgeschriebenen Werte der gemittelten Rauhtiefe Rz liegen muss [8].
Tabelle 5 nennt als Beispiele Rauheitswerte Rz für je zwei

Eigenschaften	Oberflächenschutzschicht			
	Chrom	Nickel	Nickel + Si-carbid-Partikel	Nickel + Diamant-Partikel
Abscheidungs-bedingungen	galvan.	fremd-stromlos	galvan.	fremd-stromlos, Aushärtung
Phasen-zusammensetzung	Cr	Ni Ni_xP_y	Ni SiC	Ni Diamant
Schichtdicke in µm	14 ... 17	28 ... 30	5 ... 8	52 ... 56
Rauheit R_z in µm	1,6 ± 0,2	1,3 ± 0,5	8,1 ± 1,0	4,5 ± 0,4
Härte	825 HV	1050 HV	500 HV	1300 HV
Adhäsionswider-stand[a] bei Paarung mit				
– sich selbst	–			
– Stahl	–	+	–	–
– Aluminiumoxid	–	+		
Abrasionswider-stand[a] gegen				
– Flintkörner	+	–	+	+
– Korundkörner	–	–	–	+
– Siliciumkarbid-körner	–	–	–	+
Korrosionsschutz[a]				
– SO_2-Wechsel-klima	+	+	–	–
– Salzsprühtest	–	+	o(–)	o
Beeinflussung der Dauerfestigkeit[b]	–	o–	–	(–)

[a] + hoch, o mittel, – niedrig; [b] + Erhöhung, o kein Einfluß, – Erniedrigung

Tabelle 5: Eigenschaften elektrolytisch und chemisch abgeschiedener Metallüberzüge [2]

elektrolytisch und außenstromlos arbeitende Beschichtungsverfahren, doch sind die zugehörigen Schichtdicken im Falle der beiden elektrolytischen Verfahren recht gering; typische Werte liegen hier im Bereich von 50 – 100 µm, und für Reparaturzwecke können sie bis zu 10 mm und mehr betragen. Die Frage der Schichtdickenverteilung und ihre Steuerung werden in den Abschnitten 3.1, 3.2 und 5.3 behandelt.
Härte, Duktilität und Eigenspannungszustand sind wichtige technologische Eigenschaften eines Metallüberzuges. Im Allgemeinen wird die Mikrohärte nach Vickers (s. DIN EN ISO 6507-1) oder Rockwell (s. DIN EN ISO 6508-1) gemessen, damit der Basiswerkstoff das Ergebnis möglichst nicht beeinflusst. Für das Bestimmen der Duktilität stehen verschiedene in Anlehnung an die jeweiligen Praxisanforderungen entwickelte Verfahren zur Verfügung. Als Eigenspannungen können je nach Art der Oberflächenveredelung Zug- oder Druckspannungen auftreten, die vor allem die Dauerschwingfestigkeit in bekannter Weise beeinflussen. Elektrolytisches Verchromen und Vernickeln erzeugen meist Zugeigenspannungen, das elektrolytische Vernickeln kann aber auch so gesteuert werden, dass Druckeigenspannungen entstehen. Das stromlose Vernickeln liefert Schichten, die im Abscheidezustand eigenspannungsfrei sind; aus in jüngerer Zeit entwickelten Elektrolyten erhält man Überzüge, die je nach Elektrolytalter Druck- oder Zugeigenspannungen besitzen.
Eine gute Haftung des Metallüberzuges auf dem Grundmaterial ist Voraussetzung, um die geforderte Funktionalität des beschichteten Bauteils zu erzielen. Als Maß gilt die Normalkraft, bei der der Überzug vom Grundmaterial abgetrennt wird. Zur Haftungsbestimmung werden verschiedene Methoden angewandt. Zu beachten ist, dass der Haftungswert nicht größer sein kann als die Zugfestigkeit des schwächsten Partners des Verbundes Grundwerkstoff/Metallüberzug. Bei Überschreiten dieses Wertes findet kein Trennen entlang der Grenzfläche Grundwerkstoff/Metallüberzug statt, sondern man reißt den einen Verbundpartner aus dem Material des anderen heraus.
Verschleißwiderstand, Korrosionsschutz und Dauerfestigkeit zählen zu den wichtigen funktionellen Eigenschaften des Verbundes Grundwerkstoff/Metallüberzug (Tabelle 4). Elektrolytisch abgeschiedene Chromschichten bieten einen guten Schutz gegen Abrasion, sofern das abrasiv wirkende Korn nicht härter als Flint ist.
Um die geforderte Korrosionsbeständigkeit des Bauteils zu gewährleisten, darf die abgeschiedene Schicht keine bis zum Grundmaterial durchgehenden Risse aufweisen.
Einige Beschichtungen können hingegen Mikrorisse aufweisen, die keinen negativen Einfluss haben oder sogar die Korrosionsbeständigkeit des Überzugs verbessern. Beispiele hierfür sind u.a. Hartchromschichten, Ni-Cr bzw. Cu-Ni-Cr Schichten, Zink-Nickel Legierungsschichten.
Der Widerstand gegen adhäsiven Gleitverschleiß bei Paarung mit sich selbst, mit Stahl oder Aluminiumoxid ist gering bei hohen Beanspruchungen, bei denen die äußere Oxidschicht zerstört wird. Die Dauerfestigkeit wird im Allgemeinen verringert. Stromlos abgeschiedenes Nickel bietet einen sehr guten Korrosionsschutz. Sein Adhäsionswiderstand ist höher als jener von elektrolytisch abgeschiedenem Nickel. Der Einbau von harten Partikeln zum Beispiel aus Siliziumkarbid oder Diamant erhöht bei beiden Nickelarten den Abrasionswiderstand. Die Dauerfestigkeit wird erniedrigt, sofern die Niederschläge nicht Druckspannungen aufweisen.

4.7 Funktions- und Beanspruchungsanalyse

Berücksichtigt man das oben nur kurz angesprochene breite Spektrum an funktionellen Eigenschaften, die das Konstruktionselement Oberfläche erfüllen kann, so ist eine sorgfältig durchgeführte Funktions- und Beanspruchungsanalyse eine unbedingte Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz des Verbundwerkstoffes Grundmaterial/Metallüberzug. Die von beiden Partnern geforderten Eigenschaften sind sorgfältig zu definieren; nur so kann erreicht werden, dass die örtlichen Beanspruchungen jederzeit kleiner als die Werte der örtlichen Eigenschaften bleiben und ein sicherer Einsatz während der gesamten Bauteillebensdauer gewährleistet ist (Bild 6 [9]). Hierbei ist zu beachten, dass die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes sich nicht additiv aus den Eigenschaften seiner Partner zusammensetzen, sondern Wechselwirkungen zwischen Basismaterial und Überzug das Gesamtverhalten beeinflussen.

Bild 6: Bauteilhaltbarkeit –Örtliche Beanspruchungen und örtliche Eigenschaften [9]

Eine Funktionsanalyse hat die funktionellen Anforderungen an die Oberfläche zu ermitteln und festzulegen (siehe auch Tabellen 1 [1] und 5 [2]). Solche Anforderungen können Aussehen, Farbe und Signalwirkung, physikalische und thermische Eigenschaften, Dichtigkeit gegenüber Gasen oder Flüssigkeiten, Beständigkeit gegenüber Korrosion und Verwitterung, Verschleiß in seinen verschiedensten Formen, biologischen Angriff und anderes mehr betreffen.
Die Beanspruchungsanalyse hat zu untersuchen, welchen Beanspruchungen ein Bauteil aufgrund der in der Funktionsanalyse festgelegten funktionellen Erfordernisse ausgesetzt ist. Diese Oberflächenbeanspruchungen ergeben sich, wie bereits in Tabelle 2 klassifiziert, aus den Wechselwirkungen der Oberfläche mit dem angrenzenden Medium und den auf sie einwirkenden Beanspruchungsarten.

Zusätzlich muss noch untersucht werden, ob Volumenbeanspruchungen überlagert sind; hierzu zählt man statische oder dynamische Zug-Druck-Beanspruchungen und Biegewechsel-Beanspruchungen.
Die Durchführung der Beanspruchungsanalyse liegt allein in der Verantwortung des Auftraggebers einer Oberflächenveredelung. Es ist wichtig, dass die Beanspruchungsarten sehr sorgfältig und detailliert ermittelt werden. So ist beispielsweise bei Korrosion in wässrigen Medien nach der Richtlinie VDI 3822 zwischen folgenden Korrosionsarten zu unterscheiden:

Korrosion ohne mechanische Beanspruchung:
- Flächen-, Mulden-, Loch- und Spaltkorrosion,
- Korrosion infolge unterschiedlicher Belüftung,
- Berührungs- und Kontaktkorrosion,
- selektive Korrosion,
- Taupunktkorrosion,
- Kondenswasserkorrosion,
- Hybridbildung;

Korrosion unter mechanischer Beanspruchung:
- Spannungsrisskorrosion,
- Schwingungsrisskorrosion,
- durch Wasserstoff an Stahlwerkstoffen erzeugte Korrosion;

Korrosion durch mikrobiologische Vorgänge:
- mikrobiologische Korrosion unter aeroben Bedingungen,
- mikrobiologische Korrosion unter anaeroben Bedingungen.

Analoges gilt für tribologische Beanspruchungen und Verschleiß.

Verschleißvorgänge werden hauptsächlich beeinflusst von

Beanspruchungskollektiv:
- Bewegungsform und Bewegungsablauf,
- Belastung, Geschwindigkeit, Temperatur und Zeit;

Struktur des tribologischen Systems:
- Verschleißpartner und Umgebungsmedium,
- Stoff- und Formeigenschaften der Verschleißpartner,
- tribologische Wechselwirkungen.

Hinzu kommen die physikalischen und chemischen Vorgänge, die im Oberflächenbereich der tribologisch beanspruchten Bauteile ablaufen, die Verschleißmechanismen des tribologischen Systems:
- Adhäsion,
- Abrasion,
- Oberflächenzerrüttung,
- tribochemische Reaktionen.

Tribosystem bzw. tribologisch beanspruchtes Bauteil	Mögliche Verschleißmechanismen: Adhäsion	Tribo-oxidation	Abrasion	Ober-flächen-zerrüttung
Gleitlager				
a) hydrodynamisch geschmiert		+		++
b) bei Misch- oder Festkörper-reibung	++	+	++	+
Wälzlager	+	+	+	++
Zahnradgetriebe	++	+	+	++
Passungen	+	++	+	+
Nocken und Stößel	++	+	+	++
Rad und Schiene	(+)	+	+	+
Reibungsbremsen	+	+	+	+
Elektrische Schaltkontakte	+	+		+
Werkzeuge der Zerspanungstechnik	++	+	++	+
Werkzeuge der Umformtechnik	++	+	+	+
Bauteile, die durch mineralische Stoffe tribologisch beansprucht werden		+	++	+

++ hauptsächlich + teilweise

Tabelle 6: Tribologische Systeme und zugeordnete mögliche Verhleißmechanismen [10]

In Tabelle 6 ist anhand von einigen Beispielen dargestellt, welche Verschleißmechanismen sich in tribologischen Systemen der Praxis überlagern können [10].

Beanspruchung / Funktion	Beanspruchungsart: mechan. (stat.) (dynam.)	therm.	strahlgs. physik.	elektr.	elektro-chem.	tribol.	biolog.	Gegenkörper: gasf.	flüssig	fest
Dekor. Aussehen			●					●		
Farbe			●					●		
Signalwirkung			●					●		
el. Leitfähigkeit				●						●
therm. Isolierung		●						●		●
Abdichtung	●	●				●			●	●
Kraftübertragung	●	●				●				●
Verwitterungsbest.			●		●		●	●	●	
Korr.-best.					●			●	●	
Verschleißbest.	●	●				●				●
Mikroorg.-best.							●		●	
⋮										

Tabelle 7: Zusammenfassung einer Funktions- und Beanspruchungsanalyse [2]

Eine stark vereinfachte Zusammenfassung einer Funktions- und Beanspruchungsanalyse enthält Tabelle 7 [2]. Die Ergebnisse sind in einem Pflichtenkatalog zusammenzufassen, der die Grundlage der konstruktiven Gestaltung des Bauteiles darstellt; die Mess- und Prüftechnik hat hierbei die Funktionssicherung zu übernehmen (Bild 7 [2]).

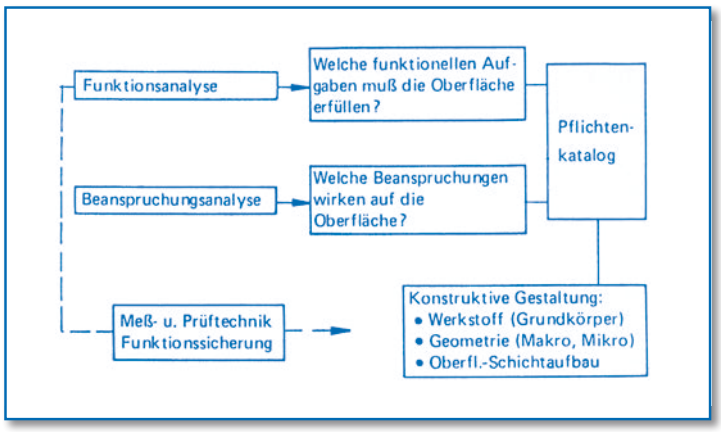


Bild 7: Rahmenschema einer Funktions- und Beanspruchungsanalyse [2]

Aufgrund der Beanspruchungsanalyse kann der Galvaniseur die Eignung der vom Auftraggeber vorgeschriebenen Galvanisierung für den vorgeschriebenen Zweck überprüfen. Er muss darauf achten, dass alle wichtigen Eigenschaften berücksichtigt wurden und unter Umständen Kompromisslösungen ausarbeiten, wenn er erkennt, dass man eine Eigenschaft zu Lasten anderer über Gebühr bewertet hat. In diesem Zusammenhang werden in der Regel flankierende praxisnahe Versuche erforderlich, die umso genauer geplant und durchgeführt werden können, je sorgfältiger die Beanspruchungsanalyse vorgenommen wurde.

5. Galvanisiergerechtes Konstruieren

Wegen der engen und vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen Grundwerkstoff, konstruktiver Bauteilform, elektrolytischen oder stromlosen Beschichtungsverfahren, Eigenschaften des Überzuges und der Qualität des galvanisierten Produktes ist es für den Ingenieur und Konstrukteur unerlässlich, die Kenntnisse und Erfahrungen der Galvanotechnik zu nutzen. Wertvolle Hinweise für galvanisiergerechtes Konstruieren und Gestalten können der Literatur entnommen werden [11 – 16]; nachstehend wird auf wichtige Punkte eingegangen, die bei der Konstruktion besonders zu beachten sind.

5.1 Festlegung der wesentlichen Flächen

Gemäß der Zweckbestimmung eines Werkstückes kann man seine Oberflächen in wesentliche und unwesentliche Flächen aufteilen. Diese Unterscheidung erleichtert die Gesamtkonstruktion eines Werkstückes. Alle Regeln des galvanisiergerechten Konstruierens gelten für die wesentlichen Flächen; damit beschränkt sich der erforderliche Aufwand für die Oberflächenveredelung auf das Notwendige. Das heißt aber nicht, dass die unwesentlichen Flächen eines Werkstückes keinerlei Beachtung verdienen. Für sie können die Anforderungen des galvanisiergerechten Konstruierens lediglich oft erheblich reduziert werden.

Auf Konstruktionszeichnungen von zu galvanisierenden Werkstücken sollte stets angegeben werden, welche Flächen für das Galvanisieren als wesentlich anzusehen sind.

5.2 Partielles Beschichten

Wenn möglich, so sollte auf den unwesentlichen Flächen immer ein geringer Niederschlag abgeschieden werden. Er schützt das Grundmetall vor Korrosion bei einem späteren Transport und Einsatz des Werkstückes.
Ist dies nicht erwünscht oder zweckmäßig, so kann das Metallabscheiden partiell auf die wesentlichen Oberflächen beschränkt werden; die unwesentlichen Flächen lassen sich mit geeigneten Abdeckmaterialien wie Wachse, Lacke oder Kunststoffen, letztere in Form von Bändern oder Folien, abdecken. Hier sind Lackierkanten oder -rillen von Vorteil, mit deren Hilfe eine saubere Trennung zwischen wesentlichen und unwesentlichen Flächen erreicht werden kann; solche Trennmöglichkeiten lassen sich oft schon bei der Konstruktion des Bauteiles anbringen. Müssen Teilflächen im Fertigzustand lackiert sein, so kann die für dieses Lackieren erforderliche Grundierung ohne Nachteil gleichzeitig auch als Abdeckung beim Galvanisieren benutzt werden, sofern die Grundierung vom Galvaniseur als unbedenklich akzeptiert worden ist.
Hohlräume lassen sich mit Stopfen oder Kunststoffschrauben schließen; bei Serienteilen empfiehlt es sich, Abdeckkonstruktionen in Verbindung mit dem Gestellbau zu entwickeln und einzusetzen.

5.3 Elektrolytische Verfahren

5.3.1 Niederschlagsverteilung

In Abschnitt 3.1 ist die von der Geometrie des Werkstückes abhängige ungleichmäßige Verteilung der Kathodenstromdichte und damit Niederschlagsdicke beschrieben worden. Hierbei können Maßüberschreitungen und Maßunterschreitungen, letztere bis zur Schichtdicke Null, auftreten. Außerdem führen große Unterschiede in der Kathodenstromdichte auch zu örtlich sehr unterschiedlichen und zumeist unerwünschten Struktur- und Schichteigenschaften. Durch verschiedene Maßnahmen ist es aber möglich, relativ gleichförmige Schichtdickenverteilungen zu erhalten:

- Man verwendet Anoden, deren Form der Oberflächengestalt des Bauteiles so angepasst ist, dass die Stromdichteverteilung auf ihm möglichst gleichmäßig ist (Bild 8). Derartige Anoden können allein oder als Hilfsanoden in Verbindung mit den Hauptanoden verwendet werden. Als Hilfsanoden werden sie meist isoliert am Kathodengestell angebracht und haben eine eigene Stromzuführung (Bild 9). Oft ist es vorteilhaft, die Hilfsanode bis auf ihre eigentliche Arbeitsfläche abzudecken.

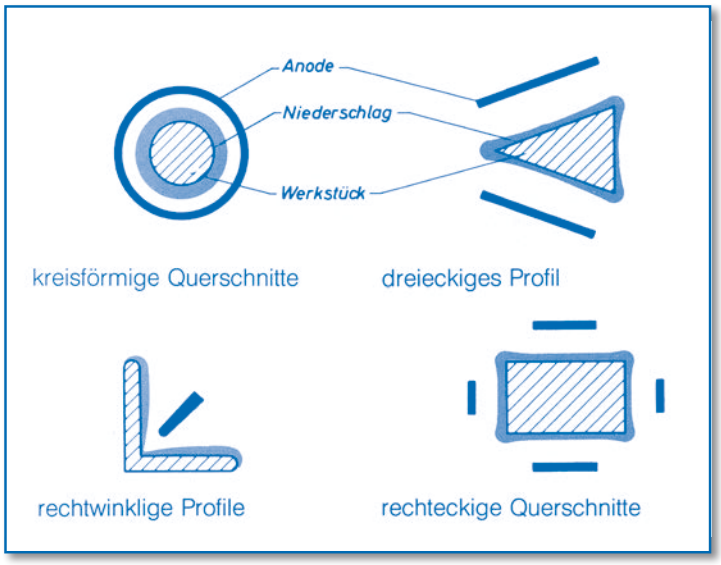


Bild 8: Einfluss der Anodenanordnung auf die Niederschlagsverteilung auf verschiedenen Oberflächengeometrien

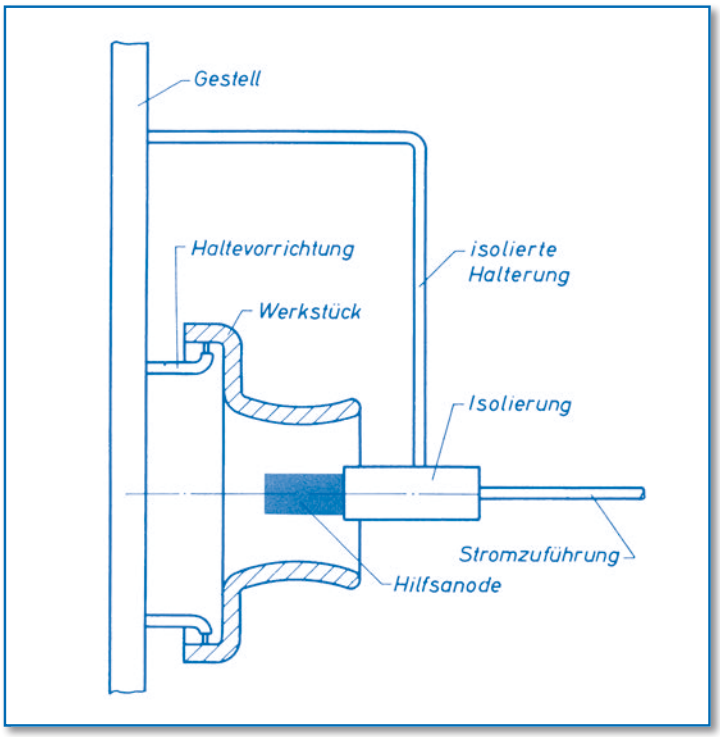


Bild 9: Verfahren zum Einsatz von Hilfsanoden

- Man setzt in die Nähe der Bauteil-Oberflächen mit den höchsten Stromdichten Hilfskathoden. Sie werden elektrisch leitend mit dem zu galvanisierenden Werkstück verbunden und übernehmen einen Teil des Niederschlages, der sich sonst an den Stellen höchster Stromdichte abscheiden würde (Bild 10).
- Man benutzt an Stelle der Hilfskathoden nichtleitende Abdeckungen. Sie vermeiden ein Konzentrieren der Stromdichte an Ecken, Spitzen und Kanten der Bauteile und führen auf diese Weise zu einer gleichmäßigeren Niederschlagsdicke (Bild 11). Nichtleitende Abdeckungen sollten, wenn immer möglich, den metallischen Hilfskathoden vorgezogen werden, da sich auf ihnen kein Metall abscheiden kann, das auf diese Weise nutzlos verbraucht wird. Sie lassen sich damit ohne Zwischenreinigung beliebig oft wiederverwenden und vermeiden Ursachen, die zu rauen Niederschlägen führen.

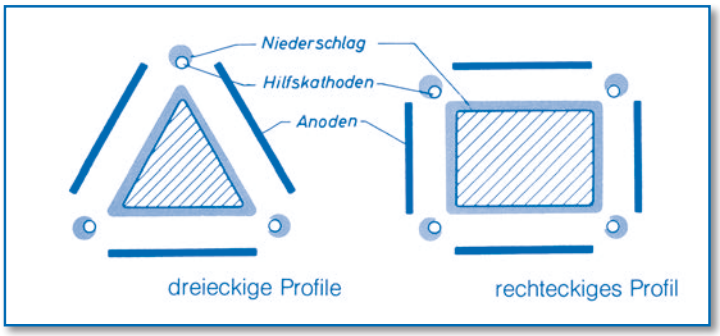


Bild 10: Einfluss von Hilfskathoden auf die Niederschlagsdicke an Stellen hoher Stromdichte

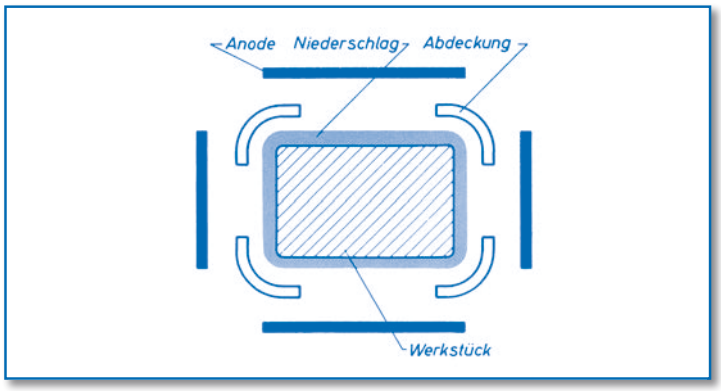


Bild 11: Einfluss von Kunststoffabschirmungen auf die Niederschlagsdicke

Die notwendige Dicke eines Niederschlages auf Werkstücken ist naturgemäß von den Anforderungen an das Stück abhängig. Um Konstrukteuren und Galvaniseuren Richtlinien zu geben, wurden für viele Anwendungsbereiche Normen geschaffen, in denen Mindestschichtdicken für bestimmte Anforderungen festgelegt sind (siehe Abschnitte 4.6 und 7.). Die festgelegten Mindestdicken dürfen an keiner Stelle der wesentlichen Flächen unterschritten werden (DIN EN ISO 2064). Daher sollte bereits beim Entwurf den wesentlichen Flächen eine möglichst einfache Form gegeben werden.

Der Konstruktion muss sich eine praktische Kontrolle der Niederschlagsverteilung anschließen. Zu diesem Zweck galvanisiert man ein Musterstück und misst die Schichtdicke nach den üblichen Methoden (DIN EN ISO 3882) an mehreren Punkten aller Flächen. An Hand der so erhaltenen Messergebnisse kann die Niederschlagsverteilung in einer Verteilungskarte festgehalten werden. Nach ihr richten sich dann eventuell noch nötige Konstruktionsänderungen des Teils, die Form der Haltegestelle, die Anordnung der Anoden usw. Dieses Galvanisieren von Probestücken sollte so lange wiederholt werden, bis eine möglichst gleichförmige Niederschlagsverteilung vorliegt. Dann bestimmt man die Punkte, an denen der Niederschlag am dünnsten ist. Während der nun anlaufenden Produktion sind diese Punkte an den Kontrollteilen immer wieder zu überprüfen, damit die geforderte Mindestschichtdicke eingehalten wird. Es ist empfehlenswert, an Hand von Kontrollteilen aus der laufenden Produktion von Zeit zu Zeit weitere Verteilungskarten anzufertigen.

5.3.2 Kanten und Spitzen

Innere und äußere Kanten dürfen auf keinen Fall scharfwinklig sein, sondern müssen immer mit einem möglichst großen Krümmungsradius ausgebildet werden. Spitzen sind möglichst ganz zu vermeiden (Bild 12).
Bild 13 oben zeigt die Niederschlagsverteilung in einer scharfwinkligen inneren Kante. Man sieht, dass sich eine Naht ohne gegenseitige Verankerung ausbildet. Diese Er-

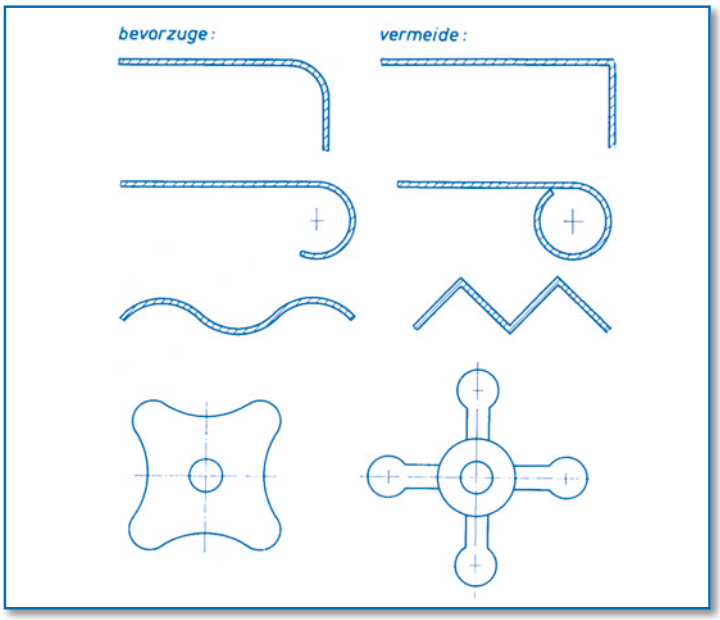


Bild 12: Zu bevorzugende und zu vermeidende Konstruktionen

scheinung, die als Kantenschwäche bezeichnet wird, kann durch eine abgerundete Kante vermieden werden (Bild 13 Mitte). Allerdings muss der Krümmungsradius größer als die oder zumindest gleich der Niederschlagsdicke sein, da sich anderenfalls vom Mittelpunkt des Krümmungsradius aus wieder eine Kantenschwäche ausbildet (Bild 13 unten).

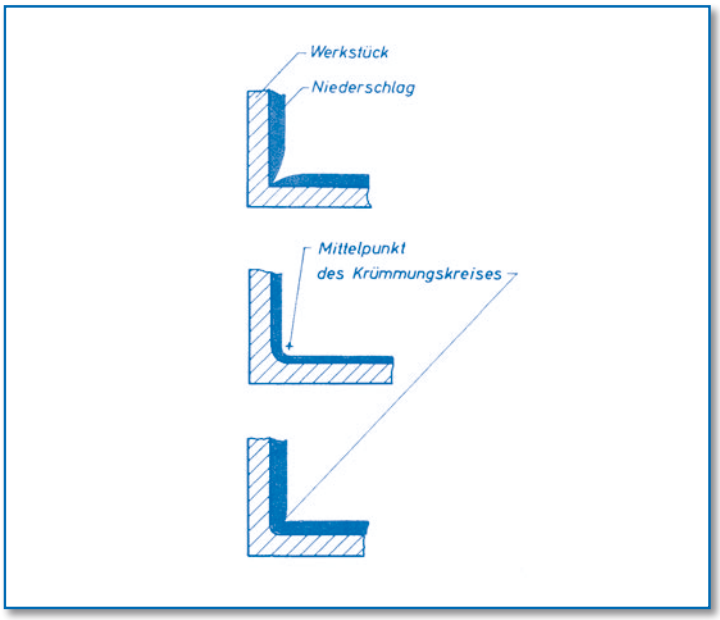


Bild 13: Kantenschwäche in den Ecken

5.3.3 Vertiefungen

Vertiefungen wie Rillen, Nuten, Falten, Mulden, nach innen führende Spalte usw. sollten bei zu galvanisierenden Werkstücken möglichst vermieden werden. Solche Stellen können nicht oder nur mit erheblichem Aufwand elektrolytisch veredelt werden. Grundsätzliche Schwierigkeiten sind:

- Die vorbereitende Reinigung muss eventuell mechanisch unterstützt werden.
- Die zum Erzielen einer guten Haftung oft erforderliche elektrolytische Aktivierung des Basiswerkstoffes findet wegen der Stromdichteunterschiede in Vertiefungen nur mangelhaft statt, so dass der Niederschlag dort eventuell nur unzureichend haftet.
- Mechanische Vor- und Zwischenbehandlungen, wie zum Beispiel Polieren, sind in Vertiefungen meist nur mit erheblichem Aufwand möglich oder sogar unmöglich.
- Vertiefungen halten Poliermittel und andere Verunreinigungen fest und lassen sich außerdem schwierig zwischenspülen, so dass Verunreinigungen in den Metallabscheidungselektrolyten geschleppt werden. Dies hat nicht nur einen erhöhten Chemikalienverbrauch zur Folge, sondern kann auch zu Funktionsstörungen im Metallabscheidungselektrolyten führen!
- Vertiefungen können auch in anderer Hinsicht eine Ursache für Verunreinigungen des Elektrolyten sein. Wird beispielsweise bei Zinkspritzgussteilen in einer Vertiefung infolge zu geringer Stromdichte nicht genügend oder gar kein Kupfer niedergeschlagen, so kann der später für das Vernickeln benutzte Nickelelektrolyt den Grundwerkstoff angreifen. Dabei werden zwar die Werkstücke im allgemeinen nur unwesentlich beschädigt; der Elektrolyt kann jedoch unter Umständen so stark mit Zinkionen verunreinigt werden, so dass er nach einer bestimmten Betriebsdauer gereinigt oder erneuert werden muss. Außerdem besteht die Gefahr, dass die Elektrolytverunreinigungen raue und/oder dunkle Metallüberzüge verursachen.
- In nicht oder nicht genügend vorverkupferten Vertiefungen kann es zu einer Nickel-Zementation (außenstromlose Abscheidung von Nickel bei gleichzeitiger Auflösung von Zink) kommen; da solche Zementationsschichten auf dem Basismaterial nicht ausreichend haften, bilden sich in den anschließend abgeschiedenen Metallüberzügen oft Blasen.

5.3.4 Hohlkörper

Soweit bei Hohlkörpern die Innen- und Außenseite als wesentliche Flächen anzusehen sind, können die im Abschnitt 5.3.2 genannten Schwierigkeiten auftreten. Hinzu kommt, dass beim Eintauchen des Werkstückes in eine Behandlungslösung in Hohlräumen Luft eingeschlossen wird und die Vorbehandlungslösungen, Spülmittel und Elektrolyt nicht die gesamte zu galvanisierende Fläche erreichen (Bild 14). Dieser Übelstand lässt sich meist dadurch vermeiden, dass die Werkstücke in geeigneter Weise in die Rahmen beziehungsweise an die Gestelle gehängt oder Löcher gebohrt werden, durch die die Luft aus Hohlräumen entweichen kann.

Für jeden Anspruch die richtige Schicht

WELCHE ANFORDERUNGEN AN DIE OBERFLÄCHEN-EIGENSCHAFTEN SOLLEN ERFÜLLT WERDEN?	WELCHE GALVANISCH HERGESTELLT						
	KUPFER	MESSING	NICKEL	KUPFER NICKEL CHROM DOPPEL-NICKEL	GLANZ-CHROM	SCHWARZ-CHROM	HAR CH
DEKORATIVES AUSSEHEN	Stahl Zink-Druckguss ABS	Stahl Zink-Druckguss Nickel	Stahl Buntmetalle Zink-Druckguss	Stahl Zink-Druckguss Aluminium Kunststoff	Nickel	Nickel	
KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT	Stahl Zink-Druckguss*		Stahl Zink-Druckguss	Stahl Zink-Druckguss Aluminium Kunststoff			Stahl Buntm Alum
VERSCHLEISSBESTÄNDIGKEIT							Stahl Alum Buntm
ANLAUFBESTÄNDIGKEIT				Stahl Zink-Druckguss Aluminium	Nickel		
LÖTBARKEIT	Stahl						
ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT	Stahl Kunststoffe						
CHEMISCHE BESTÄNDIGKEIT			Stahl Aluminium Zink-Druckguss Buntmetalle				
HÄRTE							Stahl Alum Buntm
LEBENSMITTEL-UNBEDENKLICHKEIT							Stahl Alum Buntm
SONDERFUNKTIONEN						Wärme-/ Kältetechnik	
EINSATZBEISPIELE DEKORATIV	Souvenirs Ziergegenstände Pokale	Möbelbeschläge Lampenindustrie Souvenirs	Möbelbeschläge Sanitär	Automobile Zweiräder Haushalt Phono Sanitär		Optische Industrie Automobil	
EINSATZBEISPIELE FUNKTIONELL	Für Kunststoff-Galvanisierung Zink-Druckguss Gedr. Schaltungen		Sanitär Elektronik	Automobile Kühltechnik Gerätebau		Solarzellen Optische Industrie	Masc Bergl Schif

* als Zwischenschicht

EN METALL-ÜBERZÜGE ERFÜLLEN DIESE ANFORDERUNGEN?

RT- ROM	CHEMISCH- NICKEL	BRONZE	DISPERSION HARTSTOFF	DISPERSION PTFE	ZINK ZINK-LEG ZINK- LAMELLE	ZINN	GOLD	SILBER
					Stahl	Stahl Buntmetalle	Buntmetalle Nickel	Buntmetalle Alpacca Aluminium Nickel
l metalle inium	Stahl Aluminium Zink-Druckguss Buntmetalle	Stahl	Stahl Buntmetalle Aluminium		Stahl	Stahl	Buntmetalle	
l inium metalle	Stahl Aluminium	Stahl	Stahl Buntmetalle Aluminium				Buntmetalle	
	Stahl Aluminium Zink-Druckguss Buntmetalle	Stahl					Buntmetalle Nickel	
	Stahl Aluminium	Stahl				Stahl Buntmetalle Aluminium	Buntmetalle	Buntmetalle Aluminium
		Stahl					Buntmetalle	Buntmetalle
	Stahl Aluminium Zink-Druckguss Buntmetalle					Stahl Buntmetalle Aluminium	Buntmetalle	
l inium metalle	Stahl		Stahl Buntmetalle Aluminium				Buntmetalle	
l inium metalle	Stahl Aluminium Buntmetalle					Stahl Buntmetalle Aluminium	Silber Nickel	Alpacca Nickel Edelstahl
				Stahl (anti-adhäsiv)			Elektronik	Elektronik
					Kinderwagen Drahtwaren Beschläge	Haushaltswaren	Schmuk Optik Hohlwaren	Hohlwaren Schmuck Souvenirs
chinenbau bau fsbau	Maschinenbau Elektrotechnik Chem. Industrie Bergbau/Erdöl	Maschinenbau Bergbau	Automobile Maschinenbau	Maschinenbau	Befestigungs- elemente Automobile Baubeschläge	Elektrotechnik Haushalt/Küche Band/Draht	Elektrotechnik Elektronik Gedruckte Schaltungen	Elektrotechnik Medizintechnik

Haupt-Einsatz

Neben-Einsatz

Ebenso halten tiefe Stellen eines Hohlkörpers leicht Lösung fest, die in die nachfolgenden Behandlungslösungen verschleppt wird (Bild 15). Ein Verunreinigen dieser Lösungen und ein hoher Chemikalienverbrauch sind die Folge. Dies gilt besonders für automatische Galvanisieranlagen, bei denen es nicht wie bei von Hand beschickten Wannen möglich ist, Spülvorgänge durch geeignetes manuelles Drehen oder Kippen der Teile zu unterstützen. Solche Teile sollten deshalb an ihrer tiefsten Stelle ein Loch als Abfluss für Lösungsreste besitzen (Bild 16). Beim Befestigen des Werkstücks im Rahmen oder am Gestell muss natürlich auf die richtige Lage des Abflussloches geachtet werden.

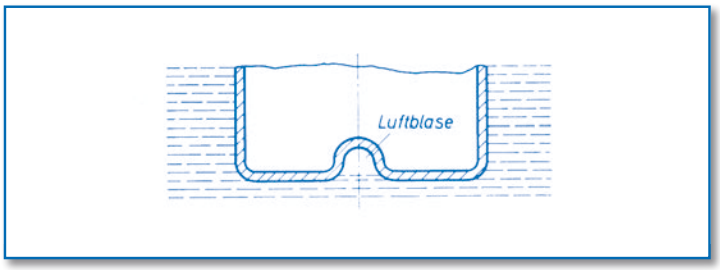


Bild 14: Luftblase in einer Vertiefung einer Werkstückunterseite

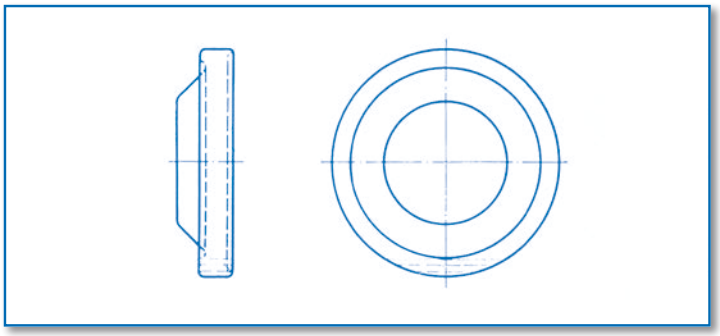


Bild 15: Lösungsreste in einer Radkappe. Da ein Abflussloch am niedrigsten Punkt fehlt, bleibt Lösung im Rand der Radkappe zurück.

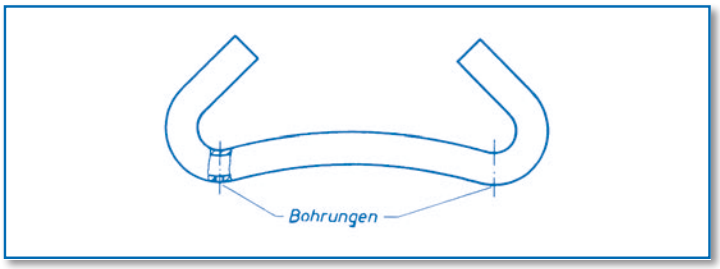


Bild 16: Abflussöffnungen in Hohlkörpern

Beim Galvanisieren wesentlicher Innenflächen lässt sich oft eine ausreichend gleichmäßige Schichtdicke durch eine sachgerechte Zuordnung der Werkstücke zueinander am Gestell erreichen. Anderenfalls sollten, besonders bei tiefen Hohlräumen, Hilfsanoden eingesetzt werden, deren Form der Oberflächengestalt des Teils angepasst ist.
Gelten nur die Außenflächen eines Werkstücks als wesentliche Fläche, so kommt es weniger auf die Beachtung der ersten drei Regeln des Abschnittes 5.3.3 an; besondere Aufmerksamkeit ist lediglich auf die Gefahr einer Elektrolytverunreinigung zu richten. Um diese zu vermeiden, können neben den bereits genannten Maßnahmen Hohlräume völlig abgedichtet werden. So verschließt man beispielsweise bei Rohren zweckmäßig die Rohrenden, so dass keine Flüssigkeit in das Rohrinnere gelangen kann.

5.3.5 Sperrige Teile

Galvanisiert man sperrige Teile, beispielsweise Stahlrohre für Möbel u. ä., so steht oft die relativ kleine zu galvanisierende Oberfläche des Teils in einem wirtschaftlich sehr ungünstigen Verhältnis zum erforderlichen großen Elektrolytvolumen. In solchen Fällen sollten Konstrukteur, Gestellbauer und Galvaniseur stets überlegen, wie durch Formgebung der Bauteile, deren Anordnung auf den Galvanisiergestellen sowie Auslegung und Gestaltung der Badwannen und -armaturen eine wirtschaftliche Lösung gefunden werden kann. Hierzu gehört auch die Klärung der Frage, ob es nicht kostensparender ist, jeweils Einzelteile zu galvanisieren, bei denen Volumenbedarf und zu galvanisierende Oberfläche gut aufeinander abgestimmt sind, und diese dann nach dem Oberflächenveredeln zur fertigen Einheit zusammenzusetzen.

5.3.6 Passformen – Bohrungen

Beim Galvanisieren beeinflusst die Metallauflage die Maße eines Teiles. Dies muss beim Festlegen der Maße und Formen für Auflageflächen, Bohrungen, Fassungen, Nuten usw. besonders beachtet werden.
Eine Gewindebohrung kann beispielsweise an der Eintrittsöffnung beim Galvanisieren zu eng werden, weil sich der Metallniederschlag an Ecken und Kanten besonders stark ausbildet. Solche Erscheinungen lassen sich vermeiden, wenn man die Bohrung etwas einsenkt (Bild 17).
Für das Galvanisieren von Schraubengewinden haben Geissman und Carlson [17] sowie Wallbank und Layton [18] gefunden, dass ein zu galvanisierendes Gewinde mit einem Untermaß zu fertigen ist, das das Fünffache der Niederschlagsdicke, bezogen auf den Schraubendurchmesser, betragen soll. Genaue Angaben dazu enthält die DIN EN ISO 4042.

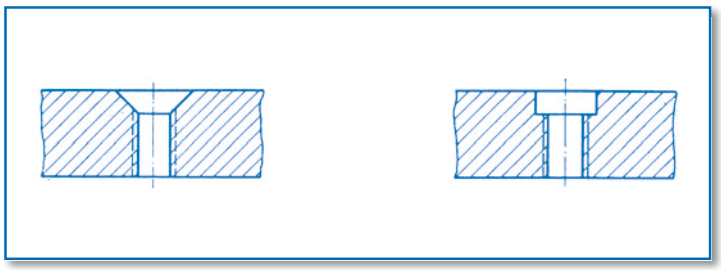


Bild 17: Versenken von Bohrungen zur Vermeidung einer Niederschlagsverdickung an den Eintrittsöffnungen

5.3.7 Festlegen von Maßen und Bezugspunkten

Muss ein Werkstück nach dem Galvanisieren spanabhebend bearbeitet werden, so sind vor dem Galvanisieren Bezugspunkte und -maße festzulegen, die durch das Galvanisieren nicht verändert werden. Anderenfalls kann es geschehen, dass bei einer mechanischen Nachbearbeitung Niederschläge örtlich völlig abgetragen und Grundwerkstoffe freigelegt werden.

Beispiel	Fertigmaß mm	Gewünschte Nickelschicht-dicke um	Bearbeitungsmaß mm
Bohrung	ø 60 H7 ø 60,000 - 60,030	20 ±3	ø 60,046 - 60,064
Welle	ø 60 h7 ø 60,000 - 59,970	20 ±3	ø 59,954 - 59,936

Tabelle 8: Zusammenhang zwischen Fertigmaß, Metallschichtdicke und Vorbearbeitungsmaß an den Beispielen einer stromlos vernickelten Bohrung und Welle [19]

Beim Festlegen des Vormaßes ist zu beachten:

- Um das gewünschte Fertigmaß zu erhalten, muss bei Wellen das Vorbearbeitungsmaß im Durchmesser um die doppelte Sollschichtdicke vermindert, bei Bohrungen erhöht werden.
- Die Schichtdickentoleranz ist zweimal zu berücksichtigen.

5.3.8 Aufhängen und Kontaktieren der Bauteile, Trommeln und Gestelle

Kleinteile werden oft ohne eigene Aufhängung in horizontal oder schräg liegenden rotierenden Trommeln galvanisiert [20]. Die Teile sollen eine möglichst einfache Oberfläche haben, damit sie sich gut vorbehandeln und spülen lassen und sich außerdem während des Galvanisierens nicht untereinander verhaken oder auf einander kleben. Da sich die Teile in der rotierenden Trommel immer gleichmäßig mischen, erhält jedes Werkstück einen bestimmten Anteil am Gesamtniederschlag. Trotzdem ist die Niederschlagsdicke nicht auf allen Teilen gleich. Es wurde vielmehr festgestellt, dass die Verteilung der Niederschlagsdicken einer Normalverteilungskurve folgt [18]. Verlängertes Durchmischen der Ware kann zur Abrundung scharfer Kanten und Ecken führen; hierauf ist sehr sorgfältig zu achten.

Größere Werkstücke sollten auf Gestelle geklemmt oder gesteckt und mit diesen in die Behandlungslösungen eingehängt werden (Bild 18). So ist es wesentlich leichter, die Teile während der Vorbehandlung und des Galvanisierens von Lösung zu Lösung zu transportieren. Außerdem werden sie zueinander und der Anode gegenüber sorgfältig fixiert zugeordnet.

Die Gestelle sind zwar in der Herstellung teuer, bieten aber folgende Vorteile:

- Die Stromführung wird durch feste Kontakte verbessert; Widerstandserhöhung und Erwärmung der Bauteile, insbesondere an den Kontaktstellen, werden unterbunden.
- Abschirmungen werden vermieden, und es ist leichter, bestimmte Befestigungspunkte am Teil festzulegen.
- Die Bauteile werden nicht durch Gegeneinanderschlagen beschädigt.
- Die Teile können starr in stets gleicher Zuordnung zueinander befestigt werden.

Die Gestaltung und Anfertigung der Gestelle sollte erfahrenen Spezialisten überlassen werden. Es gibt heute zahlreiche erfahrene Firmen, die gute Gestelle liefern können. Die Gestelle bestehen gewöhnlich aus Eisen oder Messing, für hohe Ströme oft aus Kupfer. Die eigentlichen Kontaktfedern, Haken, Klemmen oder Kontaktspitzen für die Warenaufnahme bestehen aus Chrom-Nickel-Stahl, Federstahl, Federbronze, Hartmessing oder Titan; sie sind am Gestellrahmen angeschweißt, gelötet, eingeschraubt oder gestiftet. Es ist außerordentlich wichtig, dass die Querschnitte der Gestellarme und -klemmen so ausgelegt sind, dass sie den erforderlichen Strom aufnehmen können. Die zu galvanisierenden Teile müssen sich fest und sicher am Gestell anbringen lassen. Der zur Verfügung stehende Gestellraum ist optimal auszunutzen. Das Bestücken und Entleeren der Gestelle hat teilefreundlich und zeitsparend zu erfolgen. Die Kontaktpunkte sollen so sicher wie nötig, gleichzeitig aber so unwesentlich wie möglich festgelegt sein.

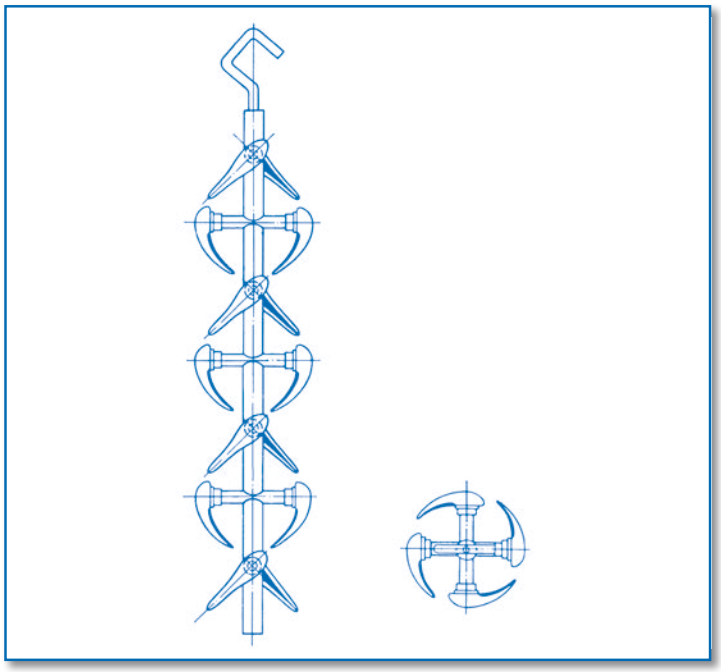


Bild 18: Befestigung von Türgriffen am Gestell. Diese Anordnung vermeidet Niederschlagsverdickungen an Kanten und Ecken und führt zu gleichmäßiger Niederschlagsverteilung.

Sind vielfältige Arten von Bauteilen zu galvanisieren, so können die Gestellkosten erheblich gesenkt werden, indem man Gestelle einsetzt, die aus bestimmten Grundeinheiten zusammengebaut wurden.
Das gesamte Gestell ist mit einer Isolierschicht abgedeckt, die gegen die verschiedenartigen Badlösungen chemisch stabil sein muss. Nur an den Stellen, an denen ein elektrischer Kontakt hergestellt werden muss, bleibt das Gestellmetall blank. Als Isoliermaterialien benutzt man Kunststoffe auf PVC- oder Polyamid-Basis, die durch Tauchen, Spritzen, Streichen oder Wirbelsintern aufgetragen werden.
Galvanisiergestelle sollten nach jedem Galvanisierdurchgang entmetallisiert werden. Hierdurch sichert man die Leitfähigkeit der Kontaktfedern und erhöht die Haltbarkeit der Kontakte.
Bild 18 zeigte eine Zuordnung von Werkstücken am Gestell, die durch gegenseitiges Abblenden, also ohne Hilfskathoden oder -blenden, zu einer akzeptabel gleichförmigen Schichtdickenverteilung führt. Bei einer solchen Anordnung wirken die gleichen Mechanismen, die in Bild 10 und 11 skizziert wurden.
Werkstücke sollen außerdem nach Möglichkeit so am Gestell befestigt werden, dass ihre wesentliche Fläche nicht nach oben, sondern nach der Seite oder nach unten zeigt. Auf diese Weise lässt sich vermeiden, dass sich durch die Elektrolytbewegung aufgewirbelte feste Partikel, die aus Anodenschlamm oder Staub aus der Luft in Elektrolyten gelangten und nicht sofort durch die ständige Elektrolytfiltration entfernt wurden, auf diesen Flächen absetzen, in den Niederschlag eingebaut werden und zu rauen Niederschlägen führen. Auch ist die Gefahr einer Porenbildung geringer, die zum Beispiel gegeben ist, wenn Gasblasen auf waagerechten Flächen oder in Winkeln und Vertiefungen infolge örtlich mangelhafter Elektrolytbewegung nicht mehr fortgespült werden.
Aufhängungen für große und schwere Einzelstücke müssen sowohl das Gewicht tragen als auch den Galvanisierstrom leiten können. Kontaktgabe an mehreren Punkten des Teiles ist zweckmäßig, um eine möglichst gleichmäßige Stromdichte- und damit Niederschlagsdickenverteilung zu erreichen (Bild 19).

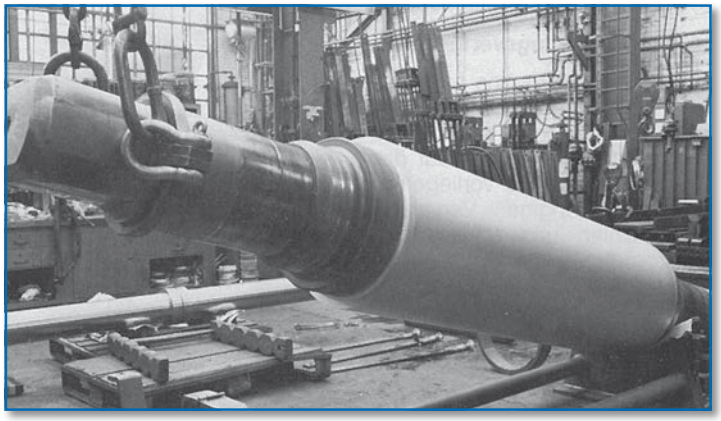


Bild 19: Aufhängung und Kontaktierung beim Hartverchromen

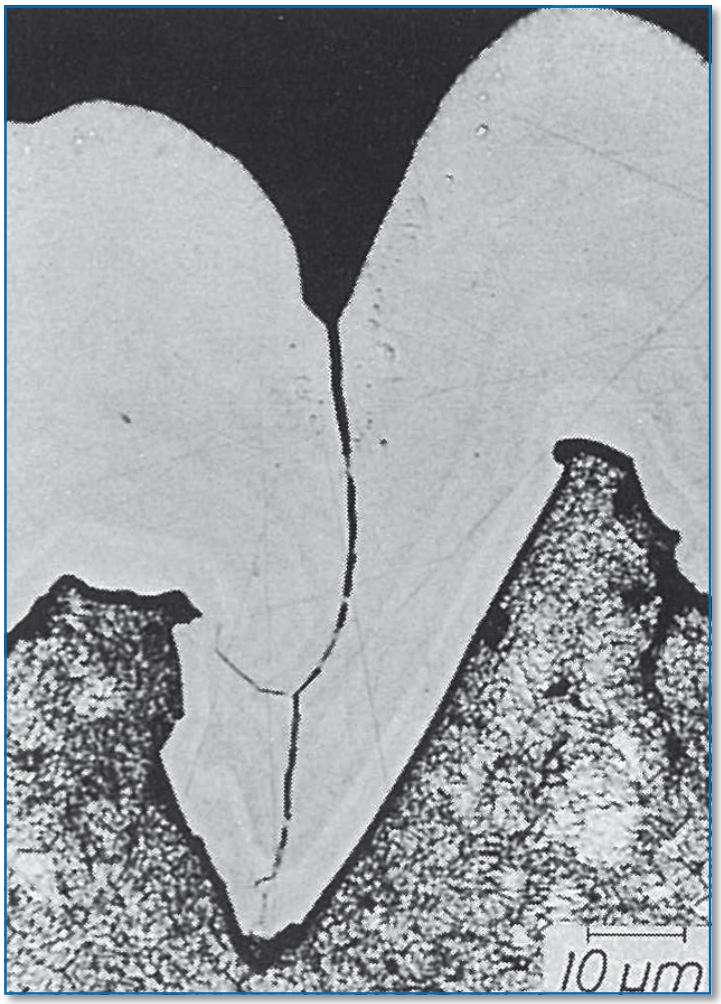


Bild 20: Rissbildung in einem außenstromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Legierungsüberzug im Bereiche eines Rauheitstales

5.4 Außenstromlose Verfahren

5.4.1 Niederschlagsverteilung

Bei den außenstromlos arbeitenden Metallabscheideverfahren entfallen naturgemäß das äußere elektrische Feld und die auf der Werkstückoberfläche vorliegende geometrieabhängige Verteilung der Feldlinien- und damit Kathodenstromdichte. Daher zeichnen sich stromlos abgeschiedene Metallüberzüge durch eine von engen Toleranzen begrenzte sehr gleichmäßige Schichtdickenverteilung aus (Bild 4). Dies gilt für Kanten, Ecken und Spitzen wie auch Vertiefungen und Hohlräume. Voraussetzung ist allerdings, dass die Bauteiloberfläche während der gesamten Behandlungsdauer gleichmäßig von frischer Elektrolytlösung umspült wird und das entstehende Wasserstoffgas ungehindert entweichen kann. Dies führt zu qualitativen und wirtschaftlichen Vorteilen wie zum Beispiel Vereinfachung der Anforderungen an die konstruktive Formgebung eines Bauteiles und seine Aufhängung im Elektrolyten, erhöhte

Korrosionsbeständigkeit der Metallauflage und das Wegfallen eines mechanischen Nachbearbeitens zwecks Einhaltens vorgegebener Toleranzen.
Allerdings sind auch hier Grenzen gezogen; ist in zu engen Hohlräumen ein ständiger Elektrolytaustausch nicht mehr gewährleistet, wird dort die Metallabscheidung wegen stetig abnehmender Metallionenkonzentration sehr bald zum Stillstand kommen. Dies tritt beispielsweise bei Luft- und Wasserstoffblasen in Sackbohrungen und ähnlichen nicht entlüftbaren Hohlräumen ein. An scharfen Kanten und in engen Radien bilden sich im Überzug Wachstumsgrenzen, die mechanisch weniger fest und korrosionschemisch anfälliger sein können als der Schichtwerkstoff; außerdem ist an solchen Stellen das Auftreten von Poren und eigenspannungsbedingten Rissen möglich (Bild 20).

5.4.2 Beschichtungsgerechte Werkstückform

Die Anforderungen an eine stromlos zu beschichtende Werkstückform sind wegen des Wegfalles der außenstrombedingten Formgebungsrichtlinien reduziert auf Maßnahmen, die ein einwandfreies Reinigen der Oberfläche, Beaufschlagen der zu beschichtenden Oberfläche mit frischem Elektrolyten und Vermeiden eines Festsetzens von Luft- und Gasblasen in zu beschichtenden Hohlräumen gewährleisten. Außerdem müssen sich nicht zu beschichtende Hohlräume dicht verschließen lassen; an scharfen Kanten und in zu engen Radien dürfen Wachstumsgrenzen, Poren oder Risse nicht auftreten. Nähere Einzelheiten enthalten die Abschnitte 5.3.3, 5.3.4 und 5.4.1. Massenteile, die in Trommeln veredelt werden sollen, müssen so gestaltet sein, dass sie nicht während des Drehens der Trommel ineinander verhaken oder infolge Adhäsion miteinander verkleben.

5.4.3 Aufhängen der Werkstücke – Trommeln und Gestelle

Im Falle des außenstromlosen Metallabscheidens ist eine elektrische Kontaktierung nicht erforderlich, es sei denn, eine der Vorbehandlungsstufen arbeitet elektrolytisch. Serienkleinteile lassen sich besonders günstig in Trommeln veredeln, und auch das Befestigen der Werkstücke an Gestellen gestaltet sich unter solchen Voraussetzungen recht einfach.
An Gestellen aufgehängte Bauteile müssen so fixiert sein, dass sie sowohl während des von Prozessstufe zu Prozessstufe erforderlichen Transportes als auch in den einzelnen Prozesslösungen nicht gegenseitig anstoßen und sich beschädigen. Schöpfende und zu entlüftende Vertiefungen und Hohlräume muss man so aufhängen können, dass die Behandlungslösungen rasch und möglichst vollständig auslaufen und abtropfen beziehungsweise Luft oder Wasserstoffgas leicht nach oben entweichen können. Bei schweren oder sperrigen Teilen sollten Gewinde für das Montieren tragfähiger Aufhängungen und Transportvorrichtungen zur Verfügung stehen.
Alle Klemm- und Befestigungspunkte bleiben unbeschichtet; sie sollten sich daher möglichst nur auf unwesentlichen Flächen befinden.
Beim Innenbeschichten großer Behälter oder Rohre benutzt man diese als Elektrolytbehälter beziehungsweise pumpt die Lösung durch sie hindurch. Entsprechend sind konstruktive Maßnahmen zum raschen Wechsel der einzelnen Behandlungslösungen und des Spülwassers sowie für flüssigkeitsdichte Anschlüsse von Rohr- oder Schlauchleitungen zu treffen.

5.4.4 Festlegen von Maßen und Bezugspunkten

Auf die engen Toleranzen, innerhalb der Metallüberzüge stromlos abgeschieden werden können, ist bereits in Verbindung mit der Niederschlagsverteilung hingewiesen worden. Für chemisch abgeschiedenes Nickel sind ± 10 % der geforderten Schichtdicke, mindestens ± 3 µm, normal; engere Toleranzen lassen sich unter bestimmten Voraussetzungen erreichen [19].
Bezüglich des Festlegens von Maßen und Bezugspunkten sind keine Besonderheiten zu beachten, so dass das in Abschnitt 5.3.7 zu galvanisch abgeschiedenen Metallschichten Gesagte unverändert auch für stromlos zu veredelnde Bauteil gilt (Tabelle 8).

5.5 Zeichnungs- und Bestellangaben

Der aufgrund der in Abschnitt 4.7 beschriebenen Funktions- und Beanspruchungsanalyse erstellte Pflichtenkatalog liefert die einem Galvanisierauftrag beizufügenden Zeichnungs- und Bestellangaben. Folgende Daten sind besonders wichtig; sind sie unvollständig oder fehlen sie, so treten Informationslücken und -mängel auf, in deren Folge die Galvanisierarbeiten zu Ausschuss führen können:

- Bauteilbezeichnung und Zeichnungsnummer,
- Art des gewünschten Oberflächenveredelungsverfahrens,
- Schichteigenschaften,
- Sollschichtdicke und zulässige Toleranzen,
- Art des Grundwerkstoffes (Werkstoff-Nummer oder DIN-Richtanalyse),
- Art des angelieferten Oberflächenzustandes (gebeizt, geläppt, gehont, phosphatiert, passiviert u. a. m.),
- Kennzeichnung der wesentlichen Flächen,
- Art der Behandlung der unwesentlichen Flächen,
- Festlegung der Klemm- und Kontaktierstellen,
- nicht zulässige Vorbehandlungen, erforderliche Nachbehandlungen,
- vereinbarte Prüfungen und Prüfverfahren.

Darüber hinaus sind in den meisten Metallabscheidungsnormen Zeichnungs- und Bestellangaben vorgeschrieben (siehe z. B. DIN EN ISO 1456 oder DIN 50979 und ISO 19598).

6. Galvanisiergerechtes Fertigen

6.1 Grundwerkstoffe

Die Fertigung eines Bauteiles muss stets so ausgewählt und durchgeführt werden, dass ein an sich galvanisierbarer Grundwerkstoff seine Galvanisierbarkeit nicht verliert. Die Haftfestigkeit, der Aufbau und die übrigen Eigenschaften eines Metallüberzuges wie auch die Art und der Umfang der Rückwirkungen der Oberflächenveredelungsverfahren und der Schicht auf die Werkstückeigenschaften hängen insbesondere von der Erfüllung folgender Voraussetzungen ab:

- Die Grundwerkstoffoberfläche muss veredelungsgerecht, d. h. homogen, glatt und sauber sein.
- Der Grundwerkstoff muss eine ausreichende Reinheit und Zähigkeit besitzen, um eventuell anfallenden atomaren Wasserstoff schadlos aufnehmen und bei einer anschließenden Effusionsbehandlung wieder abgeben zu können.
- Die Kerbempfindlichkeit des Grundmateriales muss genügend niedrig liegen, damit nicht Risse im Überzug zum Auslösen eines Sprödbruches führen können oder die Dauerfestigkeit unzulässig absenken.

Grundwerkstoff und Oberflächenveredelung müssen also genau aufeinander abgestimmt sein [3]. Sowohl das Warmbehandeln als auch das mechanische Bearbeiten des Bauteiles hängen von der Art der vorgesehenen Oberflächenveredelung und des abzuscheidenden Metallüberzuges sowie seinen Eigenschaften ab. Andererseits dürfen bei der Auswahl von Überzugsart und -dicke nicht die Festigkeit, Härte, Zähigkeit und Kerbempfindlichkeit des Grundmateriales außer Acht gelassen werden.
Inhomogenitäten im oberflächennahen Grundmaterialgefüge schränken die Wirksamkeit der Vorbehandlungsverfahren ein. Wärmebehandlungen oder Schweißen können die Ursache solcher Inhomogenitäten sein. Geringe Haftfestigkeit und raue und porige Überzüge sind zumeist die Folge.
Häufig verbessert man die mechanischen Eigenschaften von Stählen durch beispielsweise Nitrieren oder Borieren; hierdurch verändert sich aber das oberflächennahe Gefüge in eine Form, die für ein Oberflächenbeschichten ungeeignet ist. Es entstehen nichtmetallische Einlagerungen, oft auch Poren, die schlecht haftende und poröse Metallauflagen zur Folge haben.
Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe an einem Bauteil ist als makroskopische Inhomogenität anzusehen und führt zu unerwünschten Fugen. Neben den bekannten Spülschwierigkeiten an solchen Stellen treten an den Grenzflächen beider Werkstoffe unterschiedliche mechanische und elektrochemische Eigenschaften auf, die unter Betriebsbeanspruchung, insbesondere mechanischer und thermischer Belastung, zu Rissen und vermindertem Korrosionsschutz führen können.
Art und Umfang der Werkstückvorbehandlung ist grundmetallabhängig und kann sehr unterschiedlich sein. Es ist daher nicht empfehlenswert und oft auch unmöglich, Werkstücke aus verschiedenen Grundwerkstoffen in einem Arbeitsgang gemeinsam vorzubehandeln und zu galvanisieren. Deshalb sollten die einzelnen Teile eines solchen Werkstückes nach Grundmetallen getrennt vorbehandelt und galvanisiert und erst dann zum Fertigteil zusammengebaut werden.
Fugen in vormontierten Bauteilen gleichen Grundmaterials bereiten die gleichen Probleme. Miteinander zu vernietende oder punktverschweißende Einzelteile müssen daher unbedingt vor dem Herstellen der Niet- oder Schweißverbindungen galvanisiert werden, es sei denn, Schweißnähte werden durchgehend dicht gezogen.
Vormontierte Teile können außerdem infolge einer komplizierten Oberflächengeometrie die Schichtdickenverteilung ungünstig beeinflussen; das Galvanisieren der Einzelteile bringt hier erhebliche Erleichterungen.
Restschichten, die nach einem ungenügenden Entmetallisieren auf der Werkstückoberfläche verbleiben, stellen ebenfalls eine Kombination verschiedener Materialien dar. Da das Vorbehandeln und Galvanisieren lediglich auf den Grundwerkstoff abgestimmt sind, haftet der Metallüberzug im Bereich der Restschichten schlecht (Bild 21).

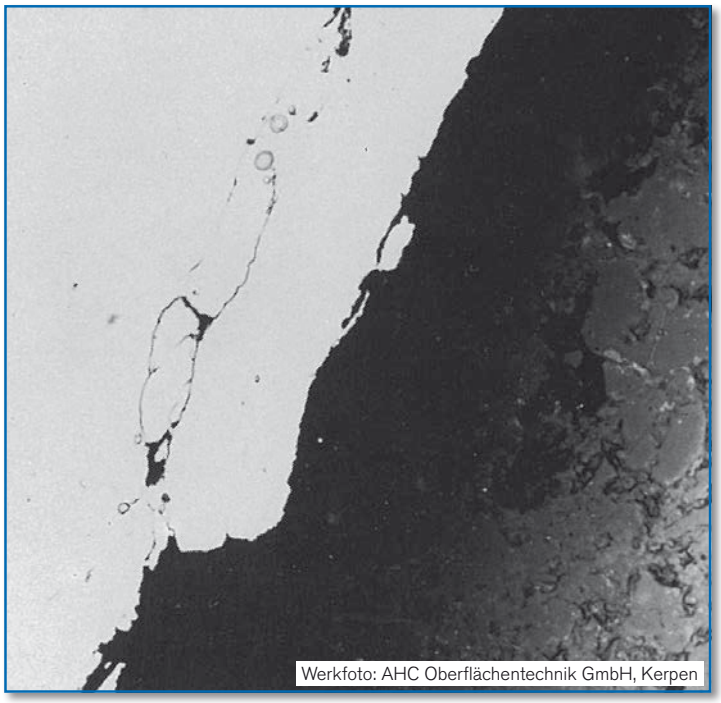


Bild 21: Eine nicht restlos entfernte alte Nickelauflage führt zu schlechter Haltung einer stromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Schicht (V = 500)

Lasergeschnittene Kanten weichen in den Materialeigenschaften erheblich vom vorhandenen Grundwerkstoff ab. Die Randzonen zeigen eine stark veränderte glasartige Struktur. Dadurch ist die Ausbildung und die Haftung metallischer Schichten oft erschwert. Teilweise wird eine besondere Vorbehandlung erforderlich, um die gewünschte Beschichtung zuverlässig zu ermöglichen.
Für das stromlose Metallabscheiden muss nicht nur die Oberfläche, sondern auch der Werkstoff selbst von einwandfreier chemischer Zusammensetzung sein. Er darf, wenn überhaupt, antikatalytisch wirkende Legierungsbestandteile nur homogen verteilt enthalten.
Poröse Werkstoffe oder solche mit Lunkern und Rissen lassen sich im Allgemeinen nicht porenfrei galvanisieren. Poren, Lunker und Risse sind kaum ausreichend zu spülen; die in sie eingedrungenen Lösungen treten bei den erhöhten Temperaturen der Metallelektrolyte aus den Hohlräumen heraus, verunreinigen die Oberfläche und auch den Elektrolyten und führen zu Fehlern im abgeschiedenen Metallüberzug. Dieses Problem ist besonders bei Gusslegierungen und Sinterwerkstoffen, bei denen aufgrund des Herstellverfahrens mit einer Vielzahl kleiner und kleinster Poren zu rechnen ist, im Auge zu halten.
Hinsichtlich Zähigkeit und Kerbempfindlichkeit des Grundwerkstoffes sollten die Erfahrungen der Werkstoffhersteller und Galvaniseure zu Rate gezogen werden. Oftmals sind zusätzlich Langsamzugversuche mit einer Laständerungsgeschwindigkeit von 0,5 N/mm^2 x s und Zeitstand- oder Verspannungsversuche sowie gegebenenfalls auch Dauerschwingversuche mit hoher statischer Zugvorspannung durchzuführen [21].
Als Werkstoffe werden insbesondere für Drehstähle zunehmend manganhaltige Werkstoffe eingesetzt. Dabei ist das Mangan ist nicht homogen im Grundwerkstoff verteilt sondern in Form von Mn-Sulfid enthalten, das häufig zu lokalen Anhäufungen neigt, sogenannten Mangannestern. Da Beizinhibitoren den Angriff auf das Mn-sulfid nur unzureichend bremsen, kommt es sehr schnell zu lokalen Überbeizungen bis hin zu Werkstoffschädigung. Mn-Sulfide können so zu Lochfraß führen und bewirken oft Haftungsschwierigkeiten bzw. nachfolgende Blasenbildung an Fehlstellen des Grundmaterials.

6.2 Mechanisches Bearbeiten

Unsachgemäßes mechanisches Bearbeiten oder verunreinigte Oberflächen zählen zu den häufigsten Ursachen fehlerhafter Metallbeschichtungen. Eine veredelungsgerechte Oberfläche

- darf keine Fugen oder Überlappungen besitzen,
- muss genügend glatt sein,
- darf nicht durch Korrosionsprodukte oder Rückstände aus der mechanischen Vorbearbeitung verunreinigt sein,
- muss frei sein von Poren, Rissen, Walzhaut, Einschlüssen, eingedrückten Fremdkörpern und anderen Fehlern,
- sollte im Falle geschweißter Teile nur durchgehende Schweißnähte besitzen,
- muss insbesondere im Falle der außenstromlosen Oberflächenveredelung entmagnetisiert sein.

Falsches mechanisches Bearbeiten führt zum Umlegen von Spitzen und Erhebungen auf die Oberfläche; diese sieht zwar glatt aus, dennoch treten durch solche Überlappungen Störungen im Schichtaufbau auf, die Ursache eines verstärkten Korrosionsangriffes sein können (Bild 22).

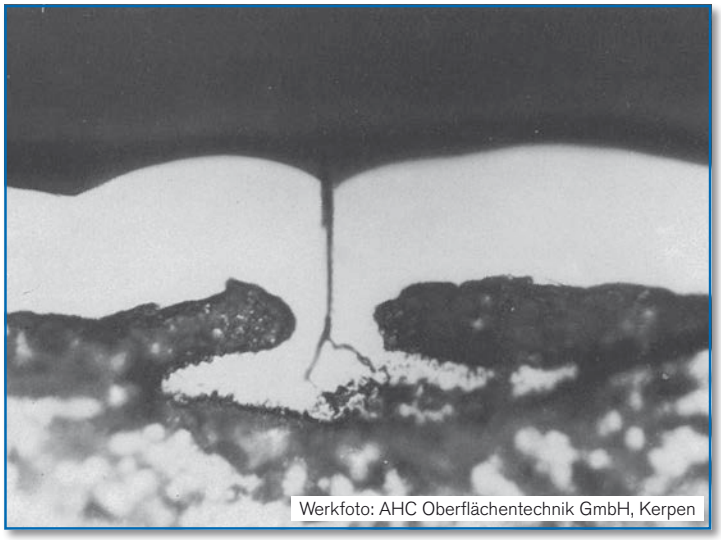


Bild 22: Fehlstelle durch Pore bzw. Überlappung im Grundmaterial verursacht Poren und Risse in einer stromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Legierungsschicht, die zu einem bevorzugten Korrosionsangriff führt (V = 500)

Eine glatte Oberfläche soll eine maximale Rauhtiefe von $R_{max} = 3$ µm, vorzugsweise 1 µm, besitzen.
Eine Oberfläche ist sauber, wenn sie aus dem Grundmaterial selbst besteht und nicht durch Oxide, Fett- und andere Adsorptionsschichten bedeckt ist, die eine gleichförmige Einwirkung der Agenzien während des Vorbehandelns und gleichmäßige Elektrokristallisation oder Bekeimung zu Beginn des elektrolytischen oder stromlosen Metallabscheidens verhindern. Zu solchen unerwünschten Oberflächenverunreinigungen zählen im Einzelnen:

- in Verbindung mit Luftsauerstoff gebildete Oxidschichten,
- Reste von Hon-, Schneid- und Schleifemulsionen und -kühlmitteln,
- ausgehärtete Polierpastenreste,
- Reste von Korrosionschutzölen,
- silikonhaltige Öle und Fette,
- Reste von Salzschmelzen, Abschreck- und Waschmitteln,
- Phosphatierschichten, Chromatierschichten,
- in die Oberfläche eingepresste Strahl- oder Schleifmittel,

- Gusshäute mit Rückständen des Formenmaterials (Sand und Imprägniermassen, Trennmittel),
- Oxid- und Schlackenreste in nicht sorgfältig gezogenen Schweißnähten,
- Fluxmittel auf Lötstellen.

Da es in der Praxis kaum möglich ist, solche Fremdschichten völlig auszuschließen, muss die unbedingte Forderung erfüllt sein, dass sie mit den in der Galvanotechnik üblichen Vorbehandlungsverfahren restlos entfernt werden können. Dies ist aber beispielsweise bei gecrackten oder verharzten organischen Produkten nicht der Fall. Daher dürfen beim Zerspanen und Umformen auf keinen Fall Kühlschmierstoffe zum Einsatz kommen, die bei der Fertigung vercracken oder im Verlaufe einer anschließenden Lagerung verharzen. Vor einem Warmbehandeln müssen Kühlschmiermittel rückstandsfrei entfernt worden sein. Im Übrigen sind sie so zu warten, dass sie sich im Verlaufe ihres Einsatzes nicht in unerwünschter Weise in ihren chemischen und thermischen Eigenschaften verändern. Sie dürfen weiter keine Antikatalyte wie Zink oder Schwefel enthalten, die das stromlose Metallabscheiden unterbinden. Bei der Auswahl der Kühlschmiermittel sollten also unbedingt die Hersteller zu Rate gezogen werden [22].
Besonders zu beachten ist, dass moderne Kühlschmiermittel und Bearbeitungshilfsstoffe oft wasserbasiert sind. Sie enthalten eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Zusätzen, die sich durch die mechanische und thermische Einwirkung bei der Metallbearbeitung chemisch verändern. Die Rückstände solcher Hilfsstoffe sind bei der chemischen Vorbehandlung in der Galvanik oft nur sehr schwer zu entfernen und können in Einzelfällen durch die gebräuchlichen Vorbehandlungen nicht entfernt werden, was zu Beschichtungsfehlern führt. Der Einsatz veränderter Hilfsstoffe in der mechanischen Fertigung muss damit auch im Hinblick auf die Beschichtungsfähigkeit geprüft werden und mit dem Galvanisierbetrieb abgestimmt sein.
Besonders zu beachten ist, dass moderne Kühlschmiermittel und Bearbeitungshilfsstoffe oft wasserbasiert sind. Sie enthalten eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Zusätzen, die sich durch die mechanische und thermische Einwirkung bei der Metallbearbeitung chemisch verändern. Die Rückstände solcher Hilfsstoffe sind bei der chemischen Vorbehandlung in der Galvanik oft nur sehr schwer zu entfernen und können in Einzelfällen durch die gebräuchlichen Vorbehandlungen nicht entfernt werden, was zu Beschichtungsfehlern führt. Der Einsatz veränderter Hilfsstoffe in der mechanischen Fertigung muss damit auch im Hinblick auf die Beschichtungsfähigkeit geprüft werden und mit dem Galvanisierbetrieb abgestimmt sein.
Tritt beim mechanischen Bearbeiten auch nur kurzzeitig ein Überhitzen ein, so bilden sich Oxide, die in den Grundwerkstoff hineingepresst werden; auch beim Polieren und Oberflächenglattwalzen können Fremdstoffe in das Basismaterial hineingedrückt werden. Solche Verunreinigungen lassen sich vor dem Galvanisieren kaum noch entfernen.
Auf einer magnetischen Oberfläche lagern sich ferromagnetische Schmutzpartikel beispielsweise des Nickels bevorzugt ab; es entstehen raue Überzüge. Um diese zu vermeiden, sollen stromlos zu beschichtende Oberflächen gegebenenfalls entmagnetisiert werden.

Normenverzeichnis

Qualitätssicherung – Messfehler

DIN 1319-1:1995-01	*Grundlagen der Meßtechnik – Teil 1: Grundbegriffe*
DIN 1319-2:2005-10	*Grundlagen der Messtechnik – Teil 2: Begriffe für Messmittel*
DIN 1319-3:1996-05	*Grundlagen der Meßtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*
DIN ISO 5725-1:1997-11	*Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe*
DIN ISO 5725-2:2002-12	*Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens (ISO 5725-2:1994 einschließlich Technisches Korrigendum 1:2002)*
DIN 13301:1993-01	*Spezielle Funktionen der mathematischen Physik; Zeichen und Begriffe*
DIN ISO 2859-1:2014-08	*Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) – Teil 1: Nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) geordnete Stichprobenpläne für die Prüfung einer Serie von Losen (ISO 2859-1:1999 einschließlich Technisches Korrigendum 1:2001)*
DIN 53804-1:2002-04	*Statistische Auswertung – Teil 1: Kontinuierliche Merkmale*
DIN 53804-2:1985-03	*Statistische Auswertungen; Zählbare (diskrete) Merkmale*
DIN 53804-3:1982-01	*Statistische Auswertungen; Ordinalmerkmale*
DIN 53804-4:1985-03	*Statistische Auswertungen; Attributmerkmale*
ISO 16269-6:2014-01	*Statistical interpretation of data - Part 6: Determination of statistical tolerance intervals*
DIN 55350-11:2008-05	*Begriffe zum Qualitätsmanagement – Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005*
DIN 55350-12:1989-03	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Merkmalsbezogene Begriffe*
DIN 55350-13:1987-07	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen*
DIN 55350-14:1985-12	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Probenahme*
DIN 55350-21:1982-05	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Statistik; Zufallsgrößen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen*
DIN 55350-22:1987-02	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Statistik; Spezielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen*
DIN 55350-23:1983-04	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Statistik; Beschreibende Statistik*

DIN 55350-24:1982-11	*Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Statistik; Schließende Statistik*
DIN EN ISO 9000:2015-11	*Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*
DIN EN ISO 9001:2015-11	*Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen*
ISO 2602:1980-02	*Statistical interpretation of test results; estimation of the mean; confidence interval*
ISO 2854:1976-02	*Statistical interpretation of data; Techniques of estimation and tests relating to means and variances*
ISO 2859-1:1999-11	*Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection*
ISO 2859-2:1985-09	*Sampling procedures for inspection by attributes; Part 2: Sampling plans indexed by limiting quality (LQ) for isolated lot inspection*
ISO 2859-10:2006-07	*Sampling procedures for inspection by attributes – Part 10: Introduction to the ISO 2859 series of standards for sampling for inspection by attributes*

Geometrie und Rauheit von Oberflächen

DIN EN ISO 1302:2002-06	*Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation*
DIN 4760:1982-06	*Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*
DIN EN ISO 8785:1999-10	*Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenunvollkommenheiten – Begriffe, Definitionen und Kenngrößen (Ersatz für DIN 4761:1978-12)*
DIN EN ISO 4287:2010-07	*Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*
DIN EN ISO 3274:1998-04	*Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*
DIN EN ISO 4288:1998-04	*Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*
DIN EN ISO 5436-1:2000-11	*Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale – Teil 1: Maßverkörperungen*
DIN EN ISO 5436-2:2013-04	*Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale – Teil 2: Software-Normale Allgemeine Prüfnormen*
DIN 1623:2009-05	*Kaltgewalztes Band und Blech – Technische Lieferbedingungen – Allgemeine Baustähle*
DIN 50106:1978-12	*Prüfung metallischer Werkstoffe; Druckversuch*

DIN 50969-1:2009-06	*Vermeidung fertigungsbedingter wasserstoffinduzierter Sprödbrüche bei hochfesten Bauteilen aus Stahl – Teil 1: Vorbeugende Maßnahmen*
DIN 50969-2:2013-04	*Vermeidung fertigungsbedingter wasserstoffinduzierter Sprödbruche bei hochfesten Bauteilen aus Stahl - Teil 2: Prüfungen*
DIN EN ISO 9117-5:2012-11	*Beschichtungsstoffe - Trocknungsprüfungen - Teil 5: Abgewandeltes Bandow-Wolff-Verfahren (ISO 9117-5:2012)*
DIN 8514:2006-05	*Lötbarkeit*
DIN EN ISO 2080:2009-08	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Oberflächenbehandlung, metallische und andere anorganische Überzüge – Wörterbuch Oberflächenbehandlung und Oberflächenschutz*
DIN EN ISO 27830:2013-11	*Metallische und andere anorganische Überzüge - Leitfaden zur Spezifikation von metallischen und anorganischen Überzügen (ISO 27830:2008)*
DIN 50960-2:2006-01	*Galvanische Überzüge – Teil 2: Zeichnungsangaben*
DIN EN ISO 4527:2003-10	*Metallische Überzüge – Autokatalytisch (außenstromlos) abgeschiedene Nickel- Phosphor-Legierungs-Überzüge – Spezifikationen und Prüfverfahren*
DIN EN ISO 1456:2009-12	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Galvanische Überzüge aus Nickel, Nickel plus Chrom, Kupfer plus Nickel und Kupfer plus Nickel plus Chrom*
DIN 53754:1977-06	*Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren*
DIN EN 2101:1991-08	*Luft- und Raumfahrt; Chromsäure-Anodisieren von Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen*
DIN EN 2284:1991-08	*Luft- und Raumfahrt; Schwefelsäure-Anodisieren von Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen*

Allgemeine Prüfnormen

DIN 1623:2009-05	*Kaltgewalztes Band und Blech – Technische Lieferbedingungen – Allgemeine Baustähle*
DIN 50106:1978-12	*Prüfung metallischer Werkstoffe; Druckversuch*
DIN 50969-1:2009-06	*Vermeidung fertigungsbedingter wasserstoffinduzierter Sprödbrüche bei hochfesten Bauteilen aus Stahl – Teil 1: Vorbeugende Maßnahmen*
DIN 53150:2002-09	*Beschichtungsstoffe – Bestimmung des Trockengrades von Beschichtungen (Abgewandeltes Bandow-Wolff-Verfahren)*
DIN 8514:2006-05	*Lötbarkeit*
DIN EN ISO 2080:2009-08	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Oberflächenbehandlung, metallische und andere anorganische Überzüge – Wörterbuch*

Oberflächenbehandlung und Oberflächenschutz

DIN 50903:1967-01	*Metallische Überzüge; Poren, Einschlüsse, Blasen und Risse, Begriffe*
DIN EN 1403:1998-10	*Korrosionsschutz von Metallen – Galvanische Überzüge – Verfahren für die Spezifizierung allgemeiner Anforderungen*
DIN 50960-2:2006-01	*Galvanische Überzüge – Teil 2: Zeichnungsangaben*
DIN EN ISO 4527:2003-10	*Metallische Überzüge – Autokatalytisch (außenstromlos) abgeschiedene Nickel-Phosphor-Legierungs-Überzüge – Spezifikationen und Prüfverfahren*
DIN EN ISO 1456:2009-12	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Galvanische Überzüge aus Nickel, Nickel plus Chrom, Kupfer plus Nickel und Kupfer plus Nickel plus Chrom*
DIN 53754:1977-06	*Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren*
DIN EN 2101:1991-08	*Luft- und Raumfahrt; Chromsäure-Anodisieren von Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen*
DIN EN 2284:1991-08	*Luft- und Raumfahrt; Schwefelsäure-Anodisieren von Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen*

Allgemeine Verfahren der Überzugsprüfung

DIN 32506-1:1981-07	*Lötbarkeitsprüfung für das Weichlöten; Benetzungsprüfungen*
DIN 32506-2:1981-07	*Lötbarkeitsprüfung für das Weichlöten; Hubtauchprüfung für Proben aus Kupferlegierungen; Prüfung, Beurteilung*
DIN 32506-3:1981-07	*Lötbarkeitsprüfung für das Weichlöten; Hubtauchprüfung für verzinnte Proben; Prüfung, Beurteilung*
DIN 50978:1985-10	*Prüfung metallischer Überzüge; Haftvermögen von durch Feuerverzinken hergestellten Überzügen*
DIN EN ISO 2085:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfung der Kontinuität dünner anodisch erzeugter Oxidschichten - Kupfersulfatversuch (ISO 2085:2010)*
DIN EN ISO 2106:2011-06	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bestimmung der Masse je Flächeneinheit (flächenbezogene Masse) von anodisch erzeugten Oxidschichten - Gravimetrisches Verfahren (ISO 2106:2011)*
DIN EN ISO 2128:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bestimmung der Dicke von anodisch erzeugten Oxidschichten - Zerstörungsfreie Messung mit Lichtschnittmikroskop (ISO 2128:2010)*
DIN EN ISO 2143:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Abschätzung der Anfärbbarkeit von anodisch erzeugten Oxidschichten nach dem Verdichten - Farbtropfentest mit vorheriger Säurebehandlung (ISO 2143:2010)*
DIN EN ISO 2376:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bestimmung der elektrischen Durchschlagspannung (ISO 2376:2010)*

DIN EN ISO 2931:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfung der Qualität von verdichteten, anodisch erzeugten Oxidschichten durch Messung des Scheinleitwertes (ISO 2931:2010)*
DIN EN ISO 3210:2015-07	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfung der Qualität von verdichteten, anodisch erzeugten Oxidschichten durch Bestimmung des Masseverlustes nach Eintauchen in Säure-Lösung(en) (ISO/DIS 3210:2015)*
DIN EN ISO 3211:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfung der Beständigkeit von anodisch erzeugten Oxidschichten gegen Rissbildung bei Verformung (ISO 3211:2010)*
DIN EN ISO 7599:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Allgemeine Spezifikationen für anodisch erzeugte Oxidschichten auf Aluminium (ISO 7599:2010)*
DIN EN ISO 7759:2010-12	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Messung der Reflexionseigenschaften von Aluminiumoberflächen mit einem Goniophotometer oder mit einem vereinfachten Goniophotometer (ISO 7759:2010)*
DIN EN ISO 8251:2011-05	*Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Messung der Abriebfestigkeit von anodisch erzeugten Oxidschichten (ISO 8251:2011)*
ISO 10074:2010-02	*Anodizing of aluminium and its alloys - Specification for hard anodic oxidation coatings on aluminium and its alloys*
ISO 2135:2010-02	*Anodizing of aluminium and its alloys - Accelerated test of light fastness of coloured anodic oxidation coatings using artificial light*
DIN EN ISO 2819:1995-01	*Metallische Überzüge auf metallischen Grundwerkstoffen – Galvanische und chemische Überzüge – Überblick über Methoden der Haftfestigkeitsprüfung*
DIN EN ISO 4516:2002-10	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Mikrohärteprüfungen nach Vickers und Knoop*
DIN EN ISO 6507-1:2006-03	*Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren*
DIN EN ISO 6508-1:2015-06	*ISO 6508-1 – Metallische Werkstoffe legt das Standard-Rockwell- und Superrockwell-Verfahren für metallische Werkstoffe fest (Skalen und geltende Anwendungsbereiche nach Tabelle 1), das für ortsfeste und ortsbewegliche Härteprüfmaschinen gilt.*
DIN EN ISO 4524-3:1995-04	*Metallische Überzüge – Prüfverfahren für elektrolytisch abgeschiedene Überzüge aus Gold und Goldlegierungen – Teil 3: Elektrografische Prüfungen*

Schichtdickenmessungen

DIN 50933:2015-08	*Messung von Schichtdicken; Messung der Dicke von Schichten durch Differenzmessung mit einem Taster*
DIN EN ISO 1463:2004-08	*Metall- und Oxidschichten – Schichtdickenmessung – Mikroskopisches Verfahren*
DIN EN ISO 2177:2004-08	*Metallische Überzüge – Schichtdickenmessung – Coulometrisches Verfahren durch anodisches Ablösen*

DIN 50977:2005-12	*Messung von Schichtdicken – Berührungslose Messung der Dicke von Schichten am kontinuierlich bewegten Messgut*
DIN EN ISO 2178:2015-01	*Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen – Messen der Schichtdicke Magnetverfahren*
DIN EN ISO 2064:2000-06	*Metallische und andere anorganische Schichten – Definitionen und Festlegungen, die die Messung der Schichtdicke betreffen*
DIN EN ISO 3882:2003-10	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Übersicht über Verfahren zur Schichtdickenmessung*
DIN EN ISO 3543:2001-12	*Metallische und nichtmetallische Schichten – Dickenmessung – Betarückstreu-Verfahren*
DIN EN ISO 2360:2004-04	*Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen metallischen Grundwerkstoffen – Messen der Schichtdicke – Wirbelstromverfahren*
DIN EN ISO 3497:2001-12	*Metallische Schichten – Schichtdickenmessung – Röntgenfluoreszenz-Verfahren*

Korrosion

DIN ISO 2533:1979-12	*Normatmosphäre*
DIN IEC 60068-2-46:1985-08	*Elektrotechnik; Grundlegende Umweltprüfverfahren; Prüfungen; Leitfaden zur Prüfung Kd: Hydrogensulfid (Schwefelwasserstoff) H2S (hoher Schadgasanteil) für elektrische Kontakte und Verbindungen; Identisch mit IEC 60068-2-46, Ausgabe 1982*
DIN IEC 60068-2-49:1985-08	*Elektrotechnik; Grundlegende Umweltprüfverfahren; Prüfungen; Leitfaden zur PrüfungKc: Schwefeldioxid SO2 (hoher Schadgasanteil) für elektrische Kontakte und Verbindungen; Identisch mit IEC 60068-2-49, Ausgabe 1983*
DIN V 40046-36:2006-08	*Umgebungseinflüsse – Teil 36: Prüfverfahren – Prüfung Kx: Schwefeldioxid, niedrige Konzentration für Kontakte und Verbindungen*
DIN V 40046-37:2006-08	*Umgebungseinflüsse – Teil 37: Prüfverfahren – Prüfung Ky: Schwefelwasserstoff, niedrige Konzentration, für Kontakte und Verbindungen*
DIN EN ISO 6270-2:2005-09	*Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Beständigkeit gegen Feuchtigkeit – Teil 2: Verfahren zur Beanspruchung von Proben in Kondenswasserklimaten*
DIN EN ISO 8044:2015-12	*Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe*
DIN 50018:2013-05	*Prüfung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre*
DIN EN ISO 9227:2012-09	*Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen*
DIN 50905-1:2009-09	*Korrosion der Metalle – Korrosionsuntersuchungen – Teil 1: Grundsätze*
DIN 50905-2:1987-01	*Korrosion der Metalle; Korrosionsuntersuchungen; Korrosionsgrößen bei gleichmäßiger Flächenkorrosion*

DIN 50905-3:1987-01	*Korrosion der Metalle; Korrosionsuntersuchungen; Korrosionsgrößen bei ungleichmäßiger und örtlicher Korrosion ohne mechanische Belastung*
DIN 50905-4:1987-01	*Korrosion der Metalle; Korrosionsuntersuchungen; Durchführung von chemischen Korrosionsversuchen ohne mechanische Belastung in Flüssigkeiten im Laboratorium*
DIN 50918:1978-06	*Korrosion der Metalle; Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen*
DIN 50919:2015-05	*Korrosion der Metalle; Korrosionsuntersuchungen der Kontaktkorrosion in Elektrolytlösungen*
DIN 50920-1:1985-10	*Korrosion der Metalle; Korrosionsuntersuchungen in strömenden Flüssigkeiten; Allgemeines*
DIN 50958:2012-12	*Galvanische Überzüge – Modifizierte Corrodkote-Korrosionsprüfung (mod. CORR-Test)*
DIN EN ISO 4541:1995-01	*Metallische und andere anorganische Überzüge – Corrodkote-Korrosionsprüfung (CORR Test)*
DIN EN ISO 10289:2001-04	*Verfahren zur Korrosionsprüfung von metallischen und anderen anorganischen Überzügen auf metallischen Grundwerkstoffen – Bewertung der Proben und Erzeugnisse nach einer Korrosionsprüfung*
DIN-Taschenbuch 175:2013-05	*Prüfnormen für metallische und anorganische nichtmetallische Überzüge*
DIN-Taschenbuch 219:2015-02	*Korrosion und Korrosionsschutz – Beurteilung, Prüfung, Schutzmaßnahmen*
DIN-Taschenbuch 286/1	*„Korrosionsschutz durch Beschichtungen und Überzüge 1“ (Oberflächenvorbereitung durch Strahlen und Beschichtung)*
DIN-Taschenbuch 286/2	*„Korrosionsschutz durch Beschichtungen und Überzüge 2“ (Metallische Überzüge und Konversionsschichten)*
DIN-Taschenbuch 286/3	*„Korrosionsschutz durch Beschichtungen und Überzüge 3“ (Kontinuierlich hergestellte, korrosionsgeschützte Halbzeuge und Rohre)*
DIN-Taschenbuch 286/4	*„Korrosionsschutz durch Beschichtungen und Überzüge 4“ (Korrosionsgeschützte Erzeugnisse, allgemeine Normen)*

Metallische Überzüge

DIN 50979:2008-07	*Metallische Überzüge - Galvanische Zink- und Zinklegierungsüberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlichen Cr(VI)-freien Behandlungen*
DIN EN ISO 2081:2009-05	*Metallische und andere anorganische Überzüge - Galvanische Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlicher Behandlung (ISO 2081:2008)*

Schrifttum

[01] Simon, H., M. Thoma:
Funktionelle Bauteiloberflächen durch angewandte Galvanotechnik, Teil 1.
Konstruktion 37 (1985) Nr. 6, S. 140 – 142 und 235 – 241.

[02] Czichos, H.: *Konstruktionselement Oberfläche.* Konstruktion 37 (1985) Nr. 6, S. 219 – 227.

[03] *Einfluss des Grundwerkstoffes Stahl auf das Ergebnis galvanotechnischer Fertigung (1980)*
Einfluss des Grundwerkstoffes Aluminium und seiner Legierungen auf das Ergebnis galvanotechnischer Fertigung (1981).
Einfluss des Grundwerkstoffes Kupfer und seiner Legierungen auf das Ergebnis galvanotechnischer Fertigung (1982)
Einfluss des Grundwerkstoffes Zink-Druckguss auf das Ergebnis galvanotechnischer Fertigung (1982).
Arbeitsblätter der DGO Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V..
Max-Vollmer-Straße 1, 40724 Hilden.

[04] *Checkliste für zu galvanisierende Teile (1981).*
Arbeitsblatt der DGO Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V..
Max-Volmer-Straße 1, 40724 Hilden.

[05] *Vermeidung einer Wasserstoffversprödung galvanisierter Bauteile aus Stahl (1980)*
Arbeitsblatt der DGO Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V..
Max-Volmer-Straße 1, 40724 Hilden.

[06] Schmaltz, G.: *Technische Oberflächenkunde. Springer-Verlag (1936), Berlin.*

[07] Habig, K- H.: *Vergleich verschiedenartiger Oberflächenschutzschichten.*
VDI-Berichte Nr. 506 (1984) S. 87 – 96, VDI Verlag GmbH, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf.

[08] Richtlinie VDI-VDE2601, Blatt 1 (1977):
Anforderungen an die Oberflächengestalt zur Sicherung der Funktionstauglichkeit spanend hergestellter Flächen.
VDI Verlag GmbH, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf.

[09] Illgner, K H.: *Forderungen des Ingenieurs an die Galvanotechnik.* Galvanotechnik 71 (1980), Nr. 5 S. 452 – 457.

[10] Habig, K-H.: *Verschleiß und Härte von Werkstoffen.*
Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG (1980), D-81631 München.

[11] Taschenbuch der Vernickelung.
International Nickel Deutschland GmbH (1967), Klosterstr. 18, D-40211 Düsseldorf.

[12] Buß, G.: *Galvanisier gerechtes Gestalten.*
in Dettner-Elze: Handbuch der Galvanotechnik Band I/1 (1963), S. 178 – 234.
Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG (1980), D-81631 München.

[13] *Korrosionsschutzgerechte Konstruktion – Merkblätter zur Verhütung von Korrosion durch konstruktive und fertigungstechnische Maßnahmen.*
DECHEMA (1981), Frankfurt/Main.

[14] Hirth, F. W, Speckhardt, H., K Stallmann: *Schäden an galvanisierten Bauteilen.*
Eugen G. Leuze Verlag KG (1987) D-88348 Bad Saulgau.

[15] Gugau, M., Hirth, F. W., Keinz, H., H. Speckhardt: *Galvanisier gerechtes Konstruieren.*
Galvanotechnik 78 (1987) Nr. 12, S. 3528 – 3537.

[16] Stallmann, K, Gugau, M., Hirth, F. W., und H. Speckhardt:
Galvanisier gerechtes Konstruieren – Folgerungen aus Schadensfällen. Der Konstrukteur (1984), Nr. 11, S. 23 – 32.

[17] Geissman, W., R. Carlson: *Current Distribution in Barrel Plating. A Statistical Survey.*
Proc. Amer. Electroplaters Soc.39 (1952), S. 152 – 161.

[18] Wallbank, A. W., D. N. Layton: *Plating of Screw Threads.*
Trans. Inst. Metal Finish. 32 (1955) S. 308 – 325.

[19] AHC-Oberfläche.
AHC-Oberflächentechnik GmbH, Bölckestraße 25, D-50171 Kerpen

[20] Wallbank, A. W.: *„Barrel Plating with Special Consideration to Protection of Thread Diameter."*
Proc. Amer. Electroplaters' Soc. 46 (1959), S. 306 – 317.

[21] Kloos, K H., Landgrebe, R., Speckhardt, H.:
„Untersuchungen zur wasserstoffinduzierten Rissbildung bei hochfesten Schrauben aus Vergütungsstählen."
VDI-Zeitschrift 127 (1985), Nr. 19, S. 92 – 102.

[22] *„Kühlschmierstoffe für die Metallbearbeitung – Arten – Auswahl – Grundlagen."*
„Kühlschmierstoffe für die Metallbearbeitung Probleme – Anwendung – Umlaufsysteme."
Mobil Oil AG in Deutschland, Kapstadtring 2, D-22297 Hamburg.

Zentralverband
Oberflächentechnik e.V.

Postfach 101063, 40710 Hilden
Telefon +49 (0) 2103-25 56 20
Telefax +49 (0) 2103-25 56 27
service@zvo.org