
Qualitätsgerechte Prozessführung von Chemisch-Nickel-Verfahren

Siegfried Hauser, Eckart Giebler, Karl-Heinz Neumann, Andy Reich; Dresden

Voraussetzungen für einen qualitätsgerechten Betrieb

Eigenschaften (Glanz, Korrosionsbeständigkeit, innere Spannungen) von mit Chemisch-Nickel-Verfahren erzeugten Oberflächen verändern sich deutlich mit dem Alter der Prozesslösung, charakterisiert durch die Anzahl von MTO (metall turn over) [1], [2].

Ebenso ist die Abscheidegeschwindigkeit vom Badalter abhängig. Deren Veränderung kann durch Anpassung der Behandlungsdauer kompensiert werden. Falls der Chemisch-Nickel-Prozess integraler Bestandteil eines komplexen Oberflächenbehandlungsprozesses ist, resultiert daraus eine unerwünschte Veränderung im geplanten zeitlichen Ablauf der Behandlung in einem Galvanikautomaten.

Gleichbleibende Eigenschaften der erzeugten Oberfläche und eine konstante Abscheidegeschwindigkeit können nur mit Bädern „gleich bleibenden“ Alters (konstante MTO-Anzahl) erzielt werden. Die Konzentration der Inhaltsstoffe der Prozesslösung solcher Bäder muss zeitlich weitgehend konstant sein. Das betrifft sowohl die Einsatzstoffe (Metallkomponente, Reduktionsmittel, organisches Gerüstsystem, Stabilisatorsystem und organische Zusätze) als auch die Fremdstoffe (oxidiertes Reduktionsmittel, Gegenionen nachdosierter Komponenten und der pH-Werteinstellung sowie Fremdmetalle).

Bäder mit derartiger, zeitlich unveränderlicher Zusammensetzung können entweder durch einen kontinuierlichen Verwurf eines Teiles der Prozesslösung und Ergänzung mit Einsatzstoffen (so genannte Feed-and-bleed-Technik; kontinuierlicher Teilverwurf) oder durch „echte“ Regeneriermaßnahmen mit zusätzlichen verfahrenstechnischen Komponenten, z.B. zur Elektrodialyse, zum Ionenaustausch, ... erreicht werden.

Der Fokus in der Argumentation für eine Einführung von Regeneriersystemen hat sich gewandelt. Wurde anfangs vor allem die Einsparung an Einsatzstoffen hervorgehoben, ist heute die gleich bleibende Qualität der beschichteten Ware in den Vordergrund getreten. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit solcher Regeneriersysteme wurden von [3] in

einer Modellrechnung die erzielbaren Einsparungen an Einsatzstoffen, die verbesserte Qualität (Senkung von Nachbesserungen am Ausschuss) und eine erhöhte Produktivität (Wegfall von Stillstandszeiten) analysiert. Danach ist jeder der genannten Effekte zu etwa einem Drittel an der verbesserten Wirtschaftlichkeit beteiligt.

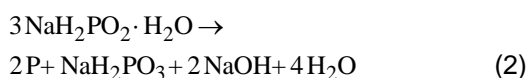
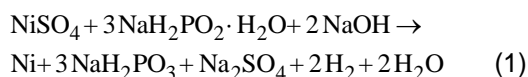
Für eine Gesamtschätzung muss die so erzielbare Verbesserung der Wirtschaftlichkeit noch den Investitionskosten für die Regeneriertechnik sowie den Kosten zu deren Betrieb gegenüber gestellt werden. Beide Vorgehensweisen (kontinuierlicher Teilverwurf und echte Regenerierung) mit dem Ziel gleich bleibender Eigenschaften der Prozesslösung führen bzgl. der Aspekte Qualität und Produktivität zu gleichen positiven Ergebnissen. Sie unterscheiden sich aber in den Mengen an Einsatzstoffen sowie den erforderlichen Aufwendungen an Investitions- und Betriebskosten.

Nachfolgend sollen die beiden Vorgehensweisen bzgl.

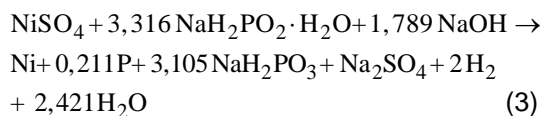
- der einzusetzenden Menge an Einsatzstoffen,
 - den Anforderungen an eine qualitätsgerechte Prozessführung und
 - den notwendigen Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb
- untersucht werden.

Massenbilanzen als Modellierungsgrundlage

Betrachtet werden hier Chemisch-Nickel-Verfahren, die Hypophosphit als Reduktionsmittel verwenden und eine Nickel/Phosphor-Legierung abscheiden. Der Reaktionsmechanismus soll hier vereinfachend mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:



Für eine abgeschiedene Legierung mit z.B. 90% Nickel und 10% Phosphor ergibt sich dann als Summengleichung:



Im Folgenden wird nur noch die Nickelabscheidung nach Gl. (1) betrachtet. Alle damit nicht beschriebenen weiteren Reaktionen beim Chemisch-Nickel-Verfahren bleiben unberücksichtigt. Für eine Legierungsabscheidung wäre analog vorzugehen, die dabei entstehenden Beziehungen sind sperriger ohne grundsätzlich andersartige Aussagen.

Ausgangspunkt für eine Modellierung sind Massenbilanzen für ein Prozessbad.

$$\frac{d n_i}{d t} = \dot{n}_i^e - \dot{n}_i^a + r_i \quad (4)$$

Darin bedeuten:

- $\frac{d n_i}{d t}$ die zeitliche Änderung der in der Prozesslösung enthaltenen Stoffmenge des Stoffes i ;
- \dot{n}_i^e Stoffmengeneintrag des Stoffes i durch Dosierung, Rückführung aus einem Regeneriersystem oder Rückführung von in das Spülsystem mit der Ware ausgeschleppten Stoffes (hier nicht betrachtet);
- \dot{n}_i^a Stoffmengenaustrag des Stoffes i durch kontinuierlichen Teilverwurf, Weiterleitung an ein Regeneriersystem oder mit der Ware in das Spülsystem (hier nicht betrachtet);
- r_i Stoffmengenänderung des Stoffes i durch Umsatz gem. Gl. (1); das Vorzeichen dieses Terms ist negativ für verbrauchte und positiv für gebildete Stoffe.

In der Galvanotechnik wird bei der Interpretation solcher Bilanzgleichungen bisher fast ausschließlich von stationären Verhältnissen ausgegangen, die linke Seite der Gl. (4) wird hierbei zu Null. Dagegen wird eine zeitliche Veränderung der in der Prozesslösung enthaltenen Stoffe bzgl. der Masse und damit der Konzentration, z.B. infolge veränderten Warendurchsatzes und damit einhergehender veränderter Literbelastung oder auch durch Ausfall / Funktionsfehler verfahrenstechnischer Komponenten, im Allgemeinen nicht betrachtet.

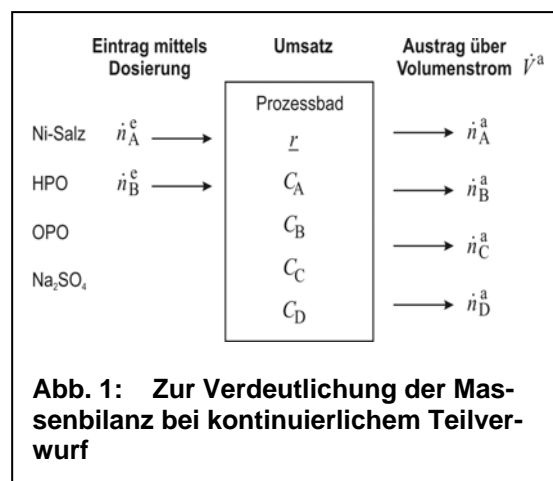
Kontinuierlicher Teilverwurf

Die allgemeine Massenbilanzgleichung (4) wird nun für einen kontinuierlichen Teilverwurf als eine der Vorgehensweisen zur Erzielung eines festen Arbeitspunktes (eine konstante MTO-

Anzahl – ein „gleich bleibendes“ Badalter) für nachfolgende Bestandteile der Prozesslösung untersetzt.

- Stoff A: NiSO_4 (Ni-Salz)
- Stoff B: $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (HPO - Hypophosphit)
- Stoff C: NaH_2PO_3 (OPO - Orthophosphit)
- Stoff D: Na_2SO_4

Abb. 1 zeigt schematisiert die Verhältnisse bei kontinuierlichem Teilverwurf. C_i sind darin die molaren Stoffkonzentrationen und \dot{V}^a der dem Prozessbad ständig entnommene Volumenstrom.



Die Massenbilanzgleichungen lauten für die Einsatzstoffe

$$\dot{n}_{A,B}^e = \dot{n}_{A,B}^a + r_{A,B} = C_{A,B} \dot{V}^a + r_{A,B} \quad (5)$$

und für die Fremdstoffe

$$0 = \dot{n}_{C,D}^a - r_{C,D} = C_{C,D} \dot{V}^a - r_{C,D} \quad (6)$$

Ein fester Arbeitspunkt setzt voraus, dass die Konzentrationen C_i sowohl der Einsatzstoffe A und B als auch der Fremdstoffe C und D konstant gehalten werden. Für die Einsatzstoffe wird dies durch entsprechende Dosierung erreicht, die Fremdstoffe müssen in dem Maße, wie sie bei der Nickelabscheidung gebildet werden, über einen entsprechend gewählten Volumenstrom dem Prozessbad kontinuierlich entnommen werden. Damit ist der Volumenstrom \dot{V}^a bemessen

$$\dot{V}^a = \frac{r_{C,D}}{C_{C,D}}$$

oder unter Nutzung der stöchiometrischen Zusammenhänge gem. Gl. (1)

$$\dot{V}^a = \frac{1}{N} \frac{r_{Ni}}{C_{Ni}} \quad (7)$$

Darin bedeuten N die dem Arbeitspunkt charakterisierende Anzahl von MTO, r_{Ni} den molaren Massenumsatz der Metallkomponente und C_{Ni} deren molare Konzentration.

Mit dem gem. Gl. (7) festgelegten Volumenstrom und den stöchiometrischen Zusammenhängen nach Gl. (1) ist der Masseneintrag für die Einsatzstoffe A und B und deren Mehrverbrauch infolge kontinuierlichem Teilverwurfs bestimmt. So ergeben sich Mehrverbräuche für Nickelsalz

$$\dot{n}_{Ni} = \frac{1}{N} r_{Ni} \quad (\text{absolut})$$

$$\text{bzw.} \quad \delta_{Ni} = \frac{1}{N} \quad (\text{relativ}) \quad (8)$$

und für Hypophosphit

$$\dot{n}_{HPO} = \frac{1}{N} \cdot \frac{C_{HPO}}{C_{Ni}} \cdot r_{Ni} \quad (\text{absolut})$$

$$\text{bzw.} \quad \delta_{HPO} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \frac{C_{HPO}}{C_{Ni}} \quad (\text{relativ}) \quad (9)$$

mit $\nu = 3$ gem. stöchiometrischer Gl. (1).

Die Mehrverbräuche nach Gl. (8) und (9) für kontinuierlichen Teilverwurf stimmen mit denen bei konventionellem Betrieb von Chemisch-Nickel-Verfahren (Neuansatz, Nutzung bis zum Erreichen von N MTO und anschließendem vollständigen Verwurf der Prozesslösung) überein. Konventioneller Betrieb führt aber zu Qualitätsschwankungen bei der Beschichtung und aufgrund der Stillstandszeiten bei Verwurf und Neuansatz zu einer geringeren Produktivität.

Entscheidend für den relativen Mehrverbrauch an Einsatzstoffen sind der von den angestrebten Eigenschaften der erzeugten Schichten abhängige Arbeitspunkt (N MTO) und die verfahrensspezifischen Konzentrationsverhältnisse in der Prozesslösung (C_{HPO} / C_{Ni}).

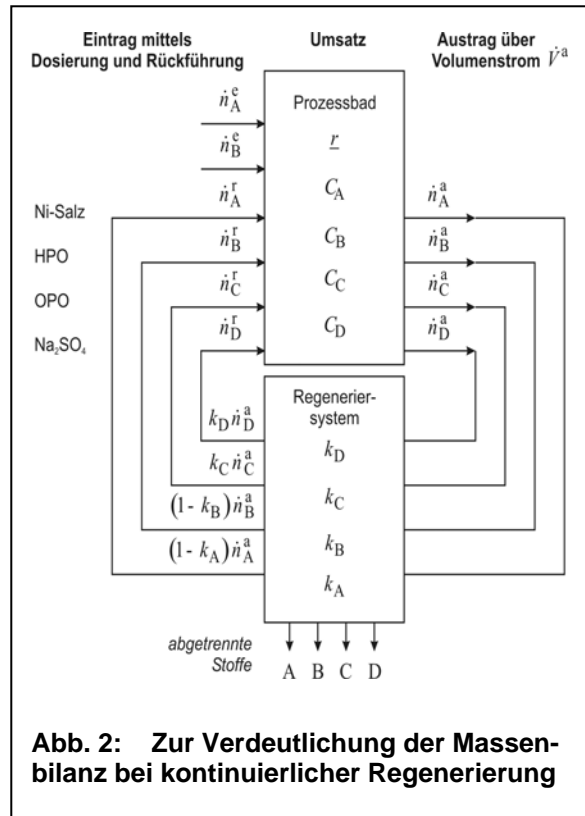
Kontinuierliche Regenerierung

Bei diesem Vorgehen zur Stabilisierung eines Arbeitspunktes (konstante MTO-Anzahl) wird dem Prozessbad kontinuierlich ein Volumenstrom entnommen, einem Regeneriersystem (bestehend z.B. aus Komponenten zur Elektrodialyse und/oder zum Ionenaustausch) zugeführt und der dort behandelte Volumenstrom in das Bad rückgespeist.

Ziel der Behandlung im Regeneriersystem ist die vollständige Abtrennung der Fremdstoffe (oxidierte Reduktionsmittel, Gegenionen nach-

dosierter Komponenten und der pH-Werteinstellung sowie Fremdmetalle) für eine interne / externe Verwertung / Entsorgung und der vollständige Erhalt der Einsatzstoffe. Diese idealen Ziele werden aufgrund des realen Trennverhaltens des Regeneriersystems nur eingeschränkt erreicht.

Abb. 2 zeigt schematisiert die Verhältnisse bei kontinuierlicher Regenerierung.



Darin sind $k_A \dots k_D$ Trennfaktoren, die im Fall idealer Regenerierung zu Null werden. Die Indizes a, e und r stehen für Austrag, Eintrag und Rückführung (aus dem Regeneriersystem).

Die Massenbilanzen lauten

für die Einsatzstoffe

$$\dot{n}_{A,B}^e + \dot{n}_{A,B}^r = \dot{n}_{A,B}^a + r_{A,B}$$

$$\dot{n}_{A,B}^e = r_{A,B} + k_{A,B} \cdot C_{A,B} \cdot \dot{V}^a \quad (10)$$

und für die Fremdstoffe

$$\dot{n}_{C,D}^r = \dot{n}_{C,D}^a - r_{C,D}$$

$$\dot{n}_{C,D}^a = C_{C,D} \cdot \dot{V}^a = \frac{r_{C,D}}{1 - k_{C,D}} \quad (11)$$

Diese Gleichungen werden analog dem Vorgehen bei kontinuierlichem Verwurf ausgewertet und liefern folgende Ergebnisse:

- Volumenstrom

$$\dot{V}^a = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{1 - k_{\text{OPO}}} \cdot \frac{r_{\text{Ni}}}{C_{\text{Ni}}} \quad (12)$$

mit $k_{\text{OPO}} (= k_{\text{C}})$ – Trennfaktor für Orthophosphit

- relativer Mehrverbrauch an Nickelsalz

$$\delta_{\text{Ni}} = \frac{1}{N} \cdot \frac{k_{\text{Ni}}}{1 - k_{\text{OPO}}} \quad (13)$$

mit $k_{\text{Ni}} (= k_{\text{A}})$ – Trennfaktor für Nickelsalz

- relativer Mehrverbrauch an Hypophosphit

$$\delta_{\text{HPO}} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \frac{k_{\text{HPO}}}{1 - k_{\text{OPO}}} \cdot \frac{C_{\text{HPO}}}{C_{\text{Ni}}} \quad (14)$$

mit $k_{\text{HPO}} (= k_{\text{B}})$ – Trennfaktor für Hypophosphit und $\nu = 3$ gemäß stöchiometrischer Gleichung (1).

Die Auswirkungen realen Trennverhaltens des Regeneriersystems auf die Konzentration der Einsatzstoffe im Prozessbad können durch eine Änderung der Konzentration der nachzudosierenden Einsatzstoffe kompensiert werden. Problematisch bleibt, dass sich das Trennverhalten über große Zeiträume ändern wird und sich damit die Konzentrationsverhältnisse im Prozessbad sowohl bei Einsatz- als auch bei Fremdstoffen verschieben werden.

Zeitveränderliche Vorgänge

Die vorangegangenen Betrachtungen zum kontinuierlichen Teilverwurf und zur kontinuierlichen Regenerierung basieren auf der Annahme stationärer Verhältnisse, d.h. die Masse und Konzentration von Inhaltsstoffen der Prozesslösung im Prozessbad wird als zeitlich konstant angenommen (der Term dn_i/dt in Gl. (4) wird Null gesetzt).

Die Annahme stationärer Verhältnisse liegt im Allgemeinen solchen Aufgaben wie der Stoffstromanalyse oder der Bemessung von Anlagen bzw. einzelnen verfahrenstechnischen Komponenten zugrunde. Interessierende Fragestellungen sind dabei oft noch analytisch (geschlossen) lösbar.

Zeitveränderliche Vorgänge führen zu einer zeitlichen Veränderung von Masse und Konzentration der Inhaltsstoffe, in Gl. (4) wird nun auch der Term dn_i/dt ungleich Null und die Beschreibung der Vorgänge geschieht mit Differenzialgleichungen. Eine analytische Berechnung solcher Vorgänge ist vielfach nicht mehr möglich oder zumindest sehr zeitaufwendig. Die numerische Simulation der modell-

mäßig beschriebenen Zusammenhänge schafft hier Abhilfe. Nachdem die zeitveränderlichen Vorgänge in einen neuen Arbeitspunkt gemündet sind ($dn_i/dt = 0!$), werden auch stationäre Zusammenhänge in numerischer Form abgebildet.

Nachfolgend sind einige Fragestellungen aufgelistet, deren Beantwortung auf eine Behandlung zeitveränderlicher Vorgänge führt.

- Wie verändert sich die Konzentration von Inhaltsstoffen der Prozesslösung vom Neuanfang bis zum Erreichen eines festen (stationären) Arbeitspunktes? Welche Auswirkung haben diese Veränderungen auf das Beschichtungsergebnis?
- Wie verändern sich die Konzentration der Inhaltsstoffe und die Menge nachzudosierender Einsatzstoffe bei Änderung des Warendurchsatzes und damit einhergehender Veränderung der Literbelastung des Bades und der Ausschleppung?
- Welche Zeit für eine Fehlerbehebung nach Ausfall / Funktionseinschränkung von Komponenten für die Dosierung oder Regenerierung steht zur Verfügung, ohne dass die Konzentrationen der Inhaltsstoffe der Prozesslösung einen aus Qualitätssicht zulässigen Bereich verlassen?
- Nach welchen Steuergesetzen werden Dosiereinrichtungen und Regeneriersysteme betrieben?

Im Vortrag werden einige derartige Fragestellungen behandelt, wobei die präsentierten Ergebnisse unter Verwendung der am Institut für Automatisierungstechnik der TU Dresden entwickelten *ECE-Toolbox* zur Modellierung und Simulation von Prozessen der Galvano- und nasschemischen Oberflächentechnik [4] gewonnen wurden.

Automatisierter Betrieb

Ziel eines automatisierten Betriebes von Chemisch-Nickel-Verfahren, die um eine der oben dargestellten Vorgehensweisen (Teilverwurf oder Regenerierung) zur Stabilisierung des Arbeitspunktes (konstante MTO-Anzahl) erweitert sind, ist die selbsttätige, nicht dem Betreiber obliegende Durchführung der damit verbundenen Dosier- und Regeneriermaßnahmen.

Nachfolgend werden die für einen automatisierten Betrieb notwendigen Voraussetzungen (Online-Erfassung entscheidender Prozessgrößen, Steuerung der Regeneriermaßnahmen, Dosierung von Einsatzstoffen) sowie der Stand der Technik zur Lösung der Aufgaben und noch bestehende Defizite dargestellt. Nicht

betrachtet werden die von einer Basisautomatisierung zu übernehmenden Aufgaben, wie Messung, Überwachung und Regelung von z.B. Temperatur und Füllstand.

Stabilisierung eines gewünschten Arbeitspunktes bedeutet, die Konzentration der Inhaltsstoffe der Prozesslösung entsprechend der Verfahrensspezifikation weitgehend konstant zu halten. Dazu müssen die für die Beschichtung entscheidenden Einsatz- und Fremdstoffe online erfasst und daraus Steuerungseingriffe abgeleitet werden. Diese haben zum einen ein kontinuierliches Ausschleusen der Fremdstoffe und zum anderen die kontinuierliche Nachdosierung von Einsatzstoffen zum Ziel.

Aus der Konzentration der Fremdstoffe (betrachtet wurden hier OPO und Na_2SO_4) ist nach Gl. (7) bzw. Gl. (12) der dem Prozessbad zu entnehmende, entweder zu verwerfende oder zu regenerierende Volumenstrom bestimmbar. Im Fall einer Regenerierung muss zusätzlich das Regeneriersystem gesteuert werden. Die dabei zu erfüllenden Steuerungsaufgaben leiten sich aus der zur Regenerierung benutzten Verfahrenstechnik ab. So könnte im Fall einer Regenerierung mittels Elektrodialyse anstelle des nach Gl. (12) bestimmten Volumenstromes der elektrische Strom (stetig oder auch Pulsbreiten-veränderlich) gesteuert werden.

Aus den Konzentrationen der Einsatzstoffe in der Prozesslösung (betrachtet wurden hier Ni-Salz und HPO) werden die nachzudosierenden Mengen dieser Bestandteile abgeleitet und über Dosierpumpen entsprechende Volumenströme realisiert.

Stand der Technik für die Online-Erfassung der Fremdstoffe sind indirekte Messverfahren, bei denen die Konzentration dieser Stoffe auf eine physikalische Größe abgebildet wird. Zumeist wird hierfür eine Dichtemessung eingesetzt.

Stand der Technik für die Online-Erfassung der Inhaltsstoffe sind so genannte Nickelcontroller, die mittels photometrischem Messverfahren die Nickelkonzentration und darüber hinaus den für die Beschichtung wichtigen pH-Wert bestimmen. Während die nachzudosierende Menge Nickelsalz unmittelbar aus der gemessenen Nickelkonzentration folgt, wird die nachzudosierende Menge Reduktionsmittel HPO über einen stöchiometrischen Faktor aus der Nickelsalzmenge abgeleitet (siehe Gl. (1) oder (3)).

Falls der hierfür benutzte mit dem tatsächlich erforderlichen Faktor nicht übereinstimmt, die

Trennfaktoren zur Charakterisierung des Verhaltens des Regeneriersystems (siehe Gl. (14)) nur näherungsweise bekannt oder zeitlichen Veränderungen unterliegen oder auch die Dosierpumpen nicht exakt arbeiten, weicht die sich einstellende HPO-Konzentration C_{HPO} u. U. erheblich von der Verfahrensvorschrift ab.

Werden o. g. Ursachen in einer relativen Abweichung α der tatsächlichen von der Soll-dosierung zusammengefasst, so wird im Fall einer Stabilisierung des Arbeitspunktes über Teilverwurf

$$C_{\text{HPO}} = \tilde{C}_{\text{HPO}} \left(1 + \alpha \left[1 + \nu \cdot N \cdot \frac{C_{\text{Ni}}}{C_{\text{HPO}}} \right] \right), \quad (15)$$

mit $\nu = 3$ gem. stöchiometrischer Gl. (1).

Bei kontinuierlicher Regenerierung ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Für eine qualitätsgerechte Prozessführung ist ein Online-Messverfahren für das Reduktionsmittel HPO unbedingt erforderlich; hier besteht dringender Entwicklungsbedarf.

Für eine komplexe Überwachung des Beschichtungsvorgangs wäre die Online-Messung der Abscheidengeschwindigkeit zweckmäßig. Hierzu müssten für Laborarbeiten bereits bestehende Möglichkeiten in eine betriebstaugliche Gerätetechnik umgesetzt werden.

Neben den im Beitrag betrachteten wesentlichen Einsatz- und Fremdstoffen beeinflussen auch die eingangs genannten weiteren Inhaltsstoffe von Prozesslösungen für Chemisch-Nickel-Verfahren den Beschichtungsvorgang. Die Online-Erfassung dieser Bestandteile, insbesondere der organischen Komponenten, ist derzeit mit akzeptablem Aufwand kaum möglich. Die Bestimmung dieser Komponenten wird auch zukünftig mittels Laboranalysen beim Verfahrensentwickler / -lieferanten erfolgen müssen.

Zusammenfassung

Beide im Beitrag dargestellten Vorgehensweisen (kontinuierlicher Teilverwurf und echte Regenerierung) erfüllen die verfahrenstechnischen Voraussetzungen, um Chemisch-Nickel-Prozesse an einem festen Arbeitspunkt zu betreiben und damit über größere Zeiträume ohne Unterbrechung qualitativ stabil beschichten zu können. Die Vorgehensweisen unterscheiden sich bezüglich der Menge an Einsatzchemikalien sowie der Menge und der Zusammensetzung entstehenden Abfalls.

Aus Sicht einer stoffverlustminimierten Prozesstechnik ist kontinuierliche Regenerierung

zu favorisieren. Diese Vorgehensweise erfordert ein an das Prozessbad anzukoppelndes Regeneriersystem, wodurch beträchtliche Investitions- und Betriebskosten entstehen. Hinzu kommt, dass die Trenneigenschaften solcher Regeneriersysteme über größere Zeiträume nicht in engen Grenzen bleiben werden und somit die Konzentration der Einsatzstoffe diesen Veränderungen nachgeführt werden müssen. Hierzu sind zusätzliche Laboranalysen nötig.

Die für einen automatisierten Betrieb zu schaffenden Voraussetzungen – Online-Messung wesentlicher Einsatz- und Fremdstoffe sowie Dosieren von Einsatzstoffen und Auskreisen von Prozesslösung – stimmen für beide Vorgehensweisen weitgehend überein. Im Fall der kontinuierlichen Regenerierung muss zusätzlich das hierfür eingesetzte Regeneriersystem automatisiert werden.

Für einen konkreten Anwendungsfall sind die genannten Argumente quantitativ zu bewerten und eine der Vorgehensweise zu wählen.

Literatur

- [1] Riedel, W.: Funktionelle Chemische Vernickelung.
Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag 1989
- [2] Czeska, B.: Wirtschaftliche Produktion in der Galvanotechnik. Kapitel: Chemische Vernickelung.
Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag 2002
- [3] Heydecke, J.: Neue Systemtechnik für die chemische Vernickelung.
Galvanotechnik 96 (2005) 3, 713-722
- [4] Giebler, E.: Simulation von Verfahrensprozessen.
Metalloberfläche 57 (2003) 1/2, 21-26

Formel- und Symbolverzeichnis

HPO	Hypophosphit	<i>Indizes</i>
OPO	Orthophosphit	A Einsatzstoff Ni
MTO	metall turn over	B Einsatzstoff HPO
C	Molare Konzentration [mol/l]	C Fremdstoff OPO
\hat{C}	Molare Sollkonzentration [mol/l]	D Fremdstoff Na_2SO_4
k	Trennfaktor	e Eintrag
n	Stoffmenge [mol]	a Austrag
N	Anzahl an MTO	r Rückführung
r	Reaktions- und Umsatzgeschwindigkeit [mol/h]	
\dot{V}	Volumenstrom [l/h]	
α	Abweichung von Sollkonzentration	
δ	Relativer Mehrverbrauch	
ν	Stöchiometrischer Faktor	