

# Spülen ist berechenbar und beherrschbar

Nora Erlacher und Herbert Hauser

Nora Erlacher  
Galvanikerin FA  
ProWaTech AG  
8416 Flaach

Tel. 052 224 06 50  
info@prowatech.ch  
www.prowatech.ch  
Herbert Hauser  
Diplom Ingenieur FH  
Hauser + Walz GmbH  
8416 Flaach  
Tel. 052 224 06 58  
info@hauserwalz.ch  
www.hauserwalz.ch

Eine effiziente Spülung der Werkstücke ist nur durch die gezielte Unterstützung des Spüleffekts möglich. Die Elektrolytverschleppung bestimmt dabei den Bedarf an Spülwasser zum Erzielen des gewählten Spülkriteriums. Die Anforderungen an die Wasserqualitäten sind vielfältig und steigen laufend.

Un rinçage efficace des pièces usinées est possible grâce au soutien ciblé des fonctions de ce processus. Pour ce faire, le transfert des électrolytes détermine le besoin en eau de rinçage pour atteindre les critères choisis. Les exigences relatives à la qualité de l'eau sont nombreuses et augmentent sans cesse.

Die Spülung der Werkstücke in der Oberflächen-technik-Branche mit Wasser zwischen beziehungsweise nach dem nasschemischen Prozessschritt beeinflusst direkt die Beschichtungsqualität. Der Einsatz von qualitativ hochwertigem Spülwasser und hohen Quantitäten zur Erzielung höchster Beschichtungsqualitäten steht konträr zum steigenden Kostendruck, gerade in Hochlohnländern. Dazu kommen gesetzliche Anforderungen an umweltschonende und somit abwasser- und abfallarme Prozesse in der Oberflächentechnik. Nur durch Online-Messungen sowie turnusmässige Prozesswasseruntersuchungen wird eine bessere Protokollierung und Rückverfolgbarkeit des Vorgangs «Spülen» erzielt.

## Grundlagen der Spültechnik

Das Spülen hat zwei Aufgaben: einerseits eine chemie- und fleckenfreie Spülung der veredelten Werk-

stücke und andererseits eine Reduktion des Eintrags von Prozesslösung in eine nachfolgende Prozesslösung, was häufig unterschätzt wird. Wasser dient in der Regel als «Betriebsmittel» für Spülprozesse der nasschemischen Oberflächenbehandlung. Durch den ausgeprägten Dipolcharakter ist es ein universelles Lösungsmittel. Reines Wasser hat einen hohen elektrischen Widerstand von 18,18 Megaohm x cm.

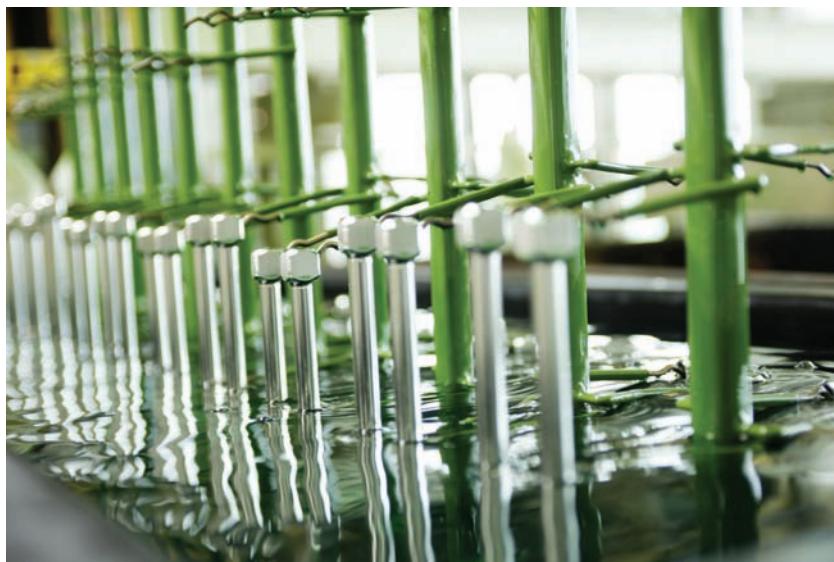
An der Phasengrenze fest/flüssig ist die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit an der Feststoffoberfläche gleich Null. Es bildet sich die so genannte Prandtl'sche Grenzschicht aus, in der eine laminare Strömung vorliegt. Sie sorgt dafür, dass es kaum zum Abtransport von Stoffen durch Konvektion kommt. Dies hat fatale Folgen für den Spülprozess, bei dem die anhaftende Prozesslösung durch Spülwasser verdünnt werden soll. Die Prandtl'sche Grenzschicht ist unter anderem abhängig vom Oberflächenprofil (wie Rauigkeit) sowie Strömungsgeschwindigkeit in der Flüssigkeit.

Ein weiteres Modell von Walther Nernst (Nobelpreisträger) beschreibt die Diffusionsvorgänge an der Grenzschicht fest/flüssig. Die treibende Kraft für den Massentransport von der Oberfläche in die Flüssigkeit ist der Diffusionsgradient. Je höher der Konzentrationsunterschied zwischen der Lösung auf der Feststoffoberfläche und in der homogenen Flüssigkeit ist, desto höher ist der Massestrom und somit der Abtransport von Ionen. Die Diffusion führt jedoch zu keinem Abtransport von zum Beispiel Partikeln.

Eine Temperaturerhöhung führt zwar zur Reduktion der beiden Grenzschichten. Sie ist jedoch gegenüber einer Erhöhung der Anströmung der Oberfläche (Geschwindigkeit der Konvektion) deutlich teurer.

## Verdünnungslehre

Das Spülen von Werkstücken stellt eine Verdünnung des verschleppten Flüssigkeitsfilms auf der Oberfläche der Ware und deren Hilfseinrichtungen mit dem Spülwasser dar. Aus ökologischen aber auch ökono-



Die gespülten Werkstücke werden aus der Spülwanne gezogen.  
(Bild: Stalder AG, Engelburg)

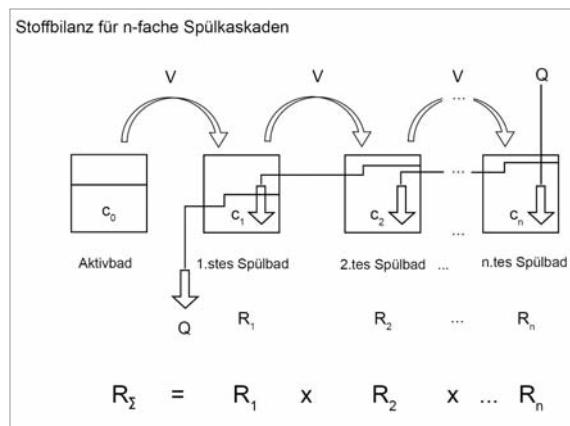


Bild 1: Stoffbilanz für n-fache Spülkaskaden.

mischen Gründen sollte nur so viel Wasser wie notwendig eingesetzt werden. Fällt viel Spülwasser an, so ist die hydraulische Belastung der Spülwasser-Kreislaufanlagen und der Abwasser-Reinigungsanlagen unnötig hoch. Als Mass für die Qualität der Spülung ( $V$  = Verdünnungsgrad) wird das dimensionslose Spülkriterium ( $R$ ) definiert. Dies ist das Verhältnis der ursprünglichen Konzentration  $c_0$  im Prozessbad zur Konzentration  $c_n$  in der  $n$ -ten Spüle. Das Spülkriterium lässt sich aber auch als Verhältnis von eingesetzter Spülwassermenge zur Verschleppung bei gleicher Zeiteinheit berechnen. Bei mehreren Spül-schritten handelt es sich um eine mathematische Reihe, bei der sich die einzelnen Spülkriterien multiplizieren (Bild 1).

In erster Näherung kann das Spülkriterium als Wassermenge  $Q$  geteilt durch die Verschleppung  $V$  berechnet werden. Die Berechnung zeigt, dass beim Einsatz mehrerer Spülschritte der Spülwasserbedarf bei gleichem Spülkriterium (der letzten Spüle in Relation zum Prozessbad) massiv abnimmt. Bei einer Verschleppung von 1 l/h und einem erwünschten Spülkriterium von 5000 muss man 5000 l/h Spülwasser in einer Fliesspüle einsetzen, jedoch nur 16,75 l/h bei einer dreifach durchflossenen Spülkaskade.

Die jeweilige Elektrolytverschleppung ist die entscheidende Grösse für die erforderliche Spülwassermenge, aber auch die Schadstoffbelastung für den Spülwasserkreislauf und die Abwasserbehandlung (Chemikalienbedarf, Schlammanfall). Daher ist es wichtig, die Verschleppung in den jeweiligen Prozessschritten zu erfassen. Diese hängen von vielen Faktoren ab, wie Oberflächengeometrie, Flächen-durchsatz, Abtropfzeiten, Viskosität der Flüssigkeit usw. In Tabelle 1 sind einige typische Verschleppun-

Fertigungsart	Geometrie	Verschleppung (V)
Gestelltechnik	Schwach schöpfende Teile (Stossdämpfer, 10 s Abtropfzeit)	0,1 bis 0,15 l/m <sup>2</sup>
Massenware (Trommel)	50 kg Schüttgewicht (Schrauben, zweimal eine halbe Drehung)	2 bis 3 l/Trommel
Vibratoren (Vibrobot)	15 kg Chips (2 Mio. Teile)	3 bis 4 l/Charge

Tabelle 1: Typische Verschleppungen, die in der Praxis erfasst wurden.

gen, die in der Praxis erfasst wurden, dargestellt.

Die Autoren legen für eine Galvanik mittlerer Anforderung die in Tabelle 2 aufgeführten Spülkriterien fest. Diese können je nach Anforderungen in der Praxis aber auch bis zu 2 Mio. betragen, um eine ausreichende Qualität der Spülung zu erzielen.

Prozess	Spülkriterium (R)
Vorbehandlung	500 bis 2000
Abscheidebäder	2000 bis 5000
Nachbehandlung	5000 bis 20000

Tabelle 2: Spülkriterien für eine Galvanik mittlerer Anforderung.

### Präventive Massnahmen

Die Elektrolytverschleppung stellt die Alles entscheidende Grösse dar. Zur Reduktion des Spülwasserbedarfs sollte die Verschleppung durch folgende Massnahmen klein gehalten werden:

- Abspitzen über dem Prozessbad
- Wirkkonzentration im Prozessbad reduzieren
- Rückführung des Spülwassers in warm betriebene Prozessbäder
- Abtropfzeiten bei Gestellen: 10 s über dem Prozessbad
- Verschleppungsarme Gestelltechnik, zum Beispiel Kippvorrichtung bei Hohlware
- Massenware: zweimal eine halbe Umdrehung der Trommeln über dem Prozessbad
- Einsatz von Drainagetrommeln oder Saug-Blas-Systemen für Trommeln
- An die Werkstücke angepasste Perforation der Trommeln

Beim Elektropolieren von Edelstahl wird in der Praxis nach dem Prozessbad eine leere Wanne eingesetzt. Dabei können die benetzten Werkstücke nach dem Prozess minutenlang abtropfen. Solch lange Abtropfzeiten führen jedoch bei fast allen andern Prozessen zu Störungen, da die Oberfläche reaktiv ist (ausser beim Elektropolieren).

Zur Erhöhung des Spülkriteriums beziehungsweise zur Erniedrigung des Spülwasserbedarfs bei gleichem Spülkriterium können - neben der bereits erwähnten Kaskadierung - folgende Spültechniken zum Einsatz kommen:

**Rekuperativspülen (Bild 2):** Ohne Spülwasserwechsel stellt sich eine Konzentration in der Spüle von 50% in Relation zum Prozessbad ein (Badfolge 2-1-2). Diese Technik wird zum Beispiel beim Brünieren (Schwarzfärbung von Stahl) eingesetzt, bei dem die Werkstücke zusätzlich vorgewärmt werden. Sie kommt auch bei Edelmetall-Abscheidebädern zum Einsatz, bei der keine Rückführung durch natürliche Badverdunstung möglich ist und gleichzeitig die Prozesslösung kostenintensiv in der Beschaffung ist.

**Mehrachverwendung von Spülwasser (Bild 3):** Die Mehrachverwendung wird sowohl beim Anodisieren als auch in der Elektronik (Leiterplattenherstellung) erfolgreich eingesetzt. Sie hat zusätzlich den Vorteil, dass die Teile mit Prozesslösung aus Bad 3 vorgespült werden, bevor sie in dieses Prozessbad gelangen.

### Unterstützung des Spüleffekts

Die Verdünnungslehre geht von einer Einstellung eines Gleichgewichts aus. Der Zeitbedarf ist zu hoch,

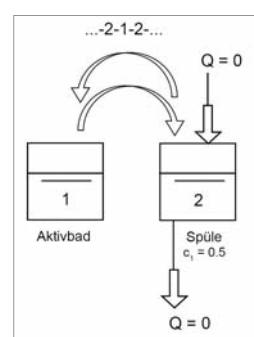


Bild 2: Schematische Darstellung des Rekuperativspülens.

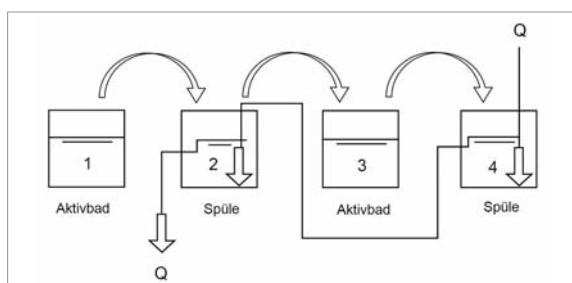


Bild 3: Schematische Darstellung der Mehrfachverwendung von Spülwasser.

als dass man in der Praxis damit wirtschaftlich arbeiten könnte. Für eine effiziente Spülung der Werkstücke ist in den Spülungen die Fliessgeschwindigkeit der Flüssigkeit zu erhöhen. Für eine Erhöhung der Diffusion sind auch die Spülwasserqualität (niedrige Salzkonzentration) sowie die Temperatur und die Reaktionszeiten zu steigern. Die Geschwindigkeit wird durch Badumwälzung mittels Pumpen, Warenbewegung, Lufteinblasung, Schwalldüsen, mehrfaches Ein- und Ausfahren oder Spritzspültechnik erhöht (Bild 4).

Mittlerweile wird auch die Sonografie (Ultraschalltechnik) zur Unterstützung des Spülprozesses eingesetzt. Ultraschall sind Druckwellen oberhalb der Hörfrequenz, wobei an der Phasengrenze fest/flüssig so hohe Drücke erzielt werden, dass Dampfblasen entstehen, die wieder kollabieren. Dabei entsteht ein so genannter «Mikrojet» (Anströmung der Oberfläche), der zu einem Abtransport von Ionen, Pigmente, Emulsionen usw. führt. Es kommen unterschiedliche Frequenzen zum Einsatz, zum Beispiel 27 kHz. Wichtig ist ein Abtransport der Verunreinigungen durch Spülwasseraustausch. Bei weichen Werkstoffen und längerer Einwirkzeit kann es aber zu Kavitation und somit Materialausbrüchen kommen.

In der Praxis wird das Volumen von Fliesspulen (Raumtemperatur, Spülwasserkreislauf) ein- bis siebenmal pro Stunde umgewälzt. Zur Kreislaufführung und somit Einsparungen von etwa 95% des Spülwasservolumens haben sich seit Jahrzehnten Ionenaustauscher bewährt. Umkehrosmoseanlagen zur Kreislaufführung sind heikel wegen der Ausfällung von basischen Metallsalzen in der Membranen, wegen des erhöhten Reinigungsaufwands und der kurzen Lebensdauer der Membranen. Zudem ist die Wasserausbeute mit rund 75% deutlich geringer als bei Ionenaustauschern.

Bereich	Leitwert ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Mikroorganismen (KBE/ml)	Organika (TOC, mg/l)	Endotoxine (LAL-Test, EU/ml)
Kreislaufwasser (Lohngalvanik)	<30	100 bis 10000	0,1 bis 5	
Reinwasser (Lohngalvanik)	5 bis 30	<300	0,1 bis 3	
Reinstwasser (Lohngalvanik)	1 bis 5	<300	0,1 bis 3	
Kreislaufwasser (Medizinaltechnik)	<2,5	<100	<0,5	<0,5
Highly Purified Water (gemäß EP)	<1,1 (20 °C)	<10	<0,5	<0,25

Tabelle 3: Konzentrationsbereiche, die in der Praxis über Jahre gemessen wurden.

### Anforderungen an die Prozesswasserqualität

Die Anforderungen an die Spülwasserqualität sind so vielfältig wie die Branchen in denen eine Oberflächenbehandlung eingesetzt wird. Neben der elektrischen Leitfähigkeit ist eine turnusmässige Messung der Konzentration an Organika, gemessen als gesamter organischer Kohlenstoff (TOC) sowie die Messung von mesophilen aeroben Keimen (koloniebildende Einheiten, KBE) von Bedeutung. Nur entsprechend geschultes Personal und spezielle Probenflaschen gewährleisten reproduzierbare Werte.

In Tabelle 3 sind Konzentrationsbereiche aufgeführt, die in der Praxis über Jahre gemessen wurden und die in der Regel zu keinen Störungen der Prozesse geführt haben. Die vierte Zeile umfasst Anforderungen, die das Europäische Pharmakopöe (Arzneibuch) vorschreibt.

Trinkwasser, auch Stadt- oder Frischwasser genannt, stellt für viele Prozesse immer noch eine ausreichende Qualität dar. Auf der andern Seite werden die Inhaltsstoffe und deren Anreicherung durch Ergänzung von Verdunstungsverlusten in Prozessbädern häufig unterschätzt. Beispiele dafür sind unter anderem Kalzium (Ausfällungen), Chloride (verschlechterte Streuung in Cr-Elektrolyten), Kieselsäure (Probleme beim Sealing von Al), Huminstoffe (Partikel auf Leiterplatten), Mikroorganismen (Behinderung der Ni-PTFE-Dispersionsabscheidung).

### Vermeidung von Mikroorganismen

Bei mikrobiologischen Anforderungen gilt der Grundsatz zur Vermeidung der Bildung von Kleinstlebewesen im Prozesswasser, zum Beispiel Bakterien, Pilze, Algen, Flusskrebsen. Präventive Massnahmen sind: Niedriger TOC-Eintrag und niedrige Temperaturen, geringe Lichteinwirkung, Vermeidung von Wasserrückstand, Toträume, Siphons usw. sowie turnusmässiger Wasserwechsel, Wannenreinigung, Abtrocknung und gegebenenfalls der Einsatz von Breitbandantibiotika. Entsprechende Reinigungs- und Wartungspläne für die Produktion sorgen für mehr Prozesssicherheit.

Die Entkeimung des Wassers durch UV-Strahlung bei 253,7 nm Wellenlänge gewinnt immer mehr an Bedeutung, da die Mikroorganismen keine Resistenzen bilden. Moderne UV-Strahler haben nach 12000 Betriebsstunden noch 75% Strahlerleistung. Die UV-Strahlung inaktiviert das Erbgut (DNA) der Mikroorganismen. ■

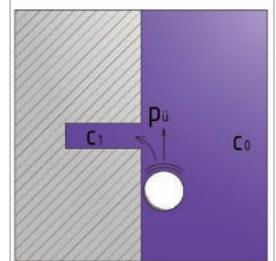
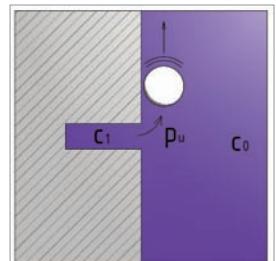


Bild 4: Luftblasen, die an einem Sackloch vorbeiströmen, bewirken durch Über- und Unterdruck einen Flüssigkeitsaustausch.