

Effektive Methode zur Untersuchung von Spritzspülprozessen

Von E. Giebler, S. Hauser, K.-H. Neumann und A. Reich, Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden

1 Einleitung

Bei der nasschemischen Oberflächenbehandlung erfolgen zwischen den einzelnen Behandlungsschritten im Allgemeinen Spülarbeitsgänge, die seit langem besonders bei ebenen Werkstücken (Blechen, Bändern, Leiterplatten usw.) als Spritzprozesse ausgeführt werden. Diese Verfahrensweise hat den Vorteil einer Intensivierung des Spülvorgangs bei gleichzeitiger Verminderung der Spülwassermenge.

Führt man diese Spülungen getaktet (Intervallspritzspülen) durch, hat das Spülwasser die Möglichkeit, zwischen den einzelnen Spültakten abzulaufen, sodass ein *Mehrkaskadeneffekt* eintritt und der Wasserverbrauch nochmals gesenkt werden kann [1]. Diese Technik kann außerdem noch in Kombination mit einem Abblasen der Ware nach dem Spülen eingesetzt werden.

Nach [2] soll der Spritzdruck dabei nicht besonders hoch sein, da ansonsten das Spülwasser nach dem Auftreffen auf die Warenoberfläche sofort zurückgeworfen wird, ohne dass eine Vermischung mit den anhaftenden Ausschleppungen geschieht. Es ist also vorteilhaft, zu *sprühen* und nicht zu *spritzen*.

Bei mehreren Spülstationen einer Anlage kommt es oft durch Druckunterschiede im Leitungssystem zu schwankenden Wassermengen pro Spülung. Daher ist es zweckmäßig, aus *Druckflaschen* ein definiertes Wasservolumen mittels Pressluft auf die Warenoberfläche zu fördern [3].

Diese Druckflaschen werden im Allgemeinen direkt am Rand des Aktiv- bzw. Spülbades angeordnet, sodass das Spritzspülen während des Herausfahrens der Werkstücke erfolgt. Somit kann die Spritzspülluösung zur Stoffrückführung und zum Ausgleich von Verdunstungsverlusten genutzt werden.

Beim Einsatz von Spritzspültechnik ist es möglich, den Bedarf an Spülwasser zu senken, die Spülqualität zu verbessern (Erhöhung des Spülkriteriums)

und unter Umständen kann sogar ein Spülbad eingespart werden. Allerdings besteht bei der Konzeption von Spülprozessen das Problem, die Wirkung geplanter Spritzspülen abzuschätzen.

Hierzu sind quantitative Angaben zur Wirksamkeit des Spritzspülens nötig. Da jedoch in der Literatur entsprechende Werte kaum zu finden sind und außerdem die konkreten Prozessbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf das Spritzspülergebnis haben, können Daten zur Wirksamkeit des Spritzspülens nur experimentell gewonnen werden.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit solchen Experimenten zum Spritzspülen. Um fundierte Kenntnisse zur Wirksamkeit von Spritzspülvorgängen zu gewinnen, sind verschiedene, das Spritzspülen beeinflussende Faktoren wie die Art der Ware, das Spritzspülvolumen, die Abtropfzeit, die Anordnung der Spritzdüsen usw. zu untersuchen.

Hier sollen weniger die Ergebnisse von Untersuchungen zur Vielfalt der Einflussfaktoren präsentiert werden; vielmehr wird eine Methode vorgestellt, mit der unter betrieblichen Bedingungen in effektiver Weise Spritzspülexperimente durchgeführt werden können.

Die Methode konnte im Rahmen des *BMBF*-Verbundvorhabens *Umstellung auf eine stoffverlustminimierte Prozesstechnik* [4] in einer Lohngalvanik erfolgreich eingesetzt werden, um mit überschaubarem Aufwand wichtige, das Spritzspülen beeinflussende Faktoren zu untersuchen.

Nach einer kurzen Vorstellung der prinzipiell möglichen Herangehensweisen beim Experimentieren mit Spritzspülprozessen wird ein auf Aufkonzentrierungsversuchen basierendes Vorgehen im Detail beschrieben und gezeigt, wie aus den Versuchsdaten ein Maß zur Quantifizierung der Spritzspülvirkung berechnet werden kann. Danach werden Ergebnisse aus den angesprochenen Versuchen vorgestellt und abschließend kurz diskutiert.

2 Experimentiermöglichkeiten zum Spritzspülen

Um die Wirkung von Spritzspülvorgängen zu ermitteln, ist es sinnvoll, vergleichende Experimente der Spülwirkung ohne und mit Spritzspülen durchzuführen. Da eine direkte Bestimmung der auf der Ware verschleppten Stoffmenge kaum möglich ist, wird die Konzentration im Spülbad, welches direkt auf den Spritzspülprozess folgt, erfasst und daraus auf die Menge verschleppter Stoffe (Fracht) zurückgeschlossen. Derartige Versuche werden als *Aufkonzentrierungsversuche* bezeichnet.

Prinzipiell sind zwei unterschiedliche Herangehensweisen bei der Durchführung von Aufkonzentrierungsversuchen möglich. Die erste Möglichkeit ist das Einstellen so genannter Fließgleichgewichte. Dabei werden die Spülprozesse unter gleich bleibenden Bedingungen betrieben und es wird abgewartet, bis sich für die Konzentrationen stationäre Endwerte einstellen. Problematisch bei diesem Vorgehen sind die zumeist erheblichen Versuchszeiten. *Abbildung 1* verdeutlicht die Problematik an einem Beispiel. Dargestellt ist der Konzentrationsverlauf im zweiten Spülbad einer Fließkaskade (Volumen der Spüle: 1 m³). Pro Warenträger (WT) werden 300 ml Prozesslösung verschleppt. Zuerst wird

das Spülsystem als einfache Kaskadenspüle (ohne Spritzspülen) mit einem Spülwasservolumenstrom von 2 l/WT betrieben. Nach ca. 4000 gespülten Warenträgern ist ein stationärer Endwert der Konzentration annähernd erreicht. Nun wird begonnen, über dem ersten Spülbad abzuspülen, das heißt, der Gegenstrom der Kaskadenspüle wird nicht mehr direkt vom zweiten in das erste Spülbad geleitet, sondern über der aus dem ersten Spülbad kommenden Ware versprüht. Wiederum sind eine erheblich Anzahl von Warenträgern bis zum Erreichen stationärer Verhältnisse zu spülen.

Nach 7000 Warenträgern wird die Spülwassermenge der Kaskadenspüle und somit auch das Spritzvolumen über der ersten Spüle erhöht, wodurch sich nach ca. 10 000 Warenträgern ein neuer Betriebspunkt eingestellt hat. Hierbei ist die nochmals gesunkene Konzentration im zweiten Spülbad nicht ausschließlich auf den gesteigerten Spülwasservolumenstrom zurückzuführen, sondern sie wird zusätzlich durch eine bessere Wirkung des Spritzspülens bewirkt. Die sich überlagernde Wirkung dieser beiden Effekte ist bei geeigneter Auswertung voneinander zu trennen.

Mit der dargestellten Versuchsdurchführung ließe sich die Wirkung des Spritzspülens sowie ihre Ver-

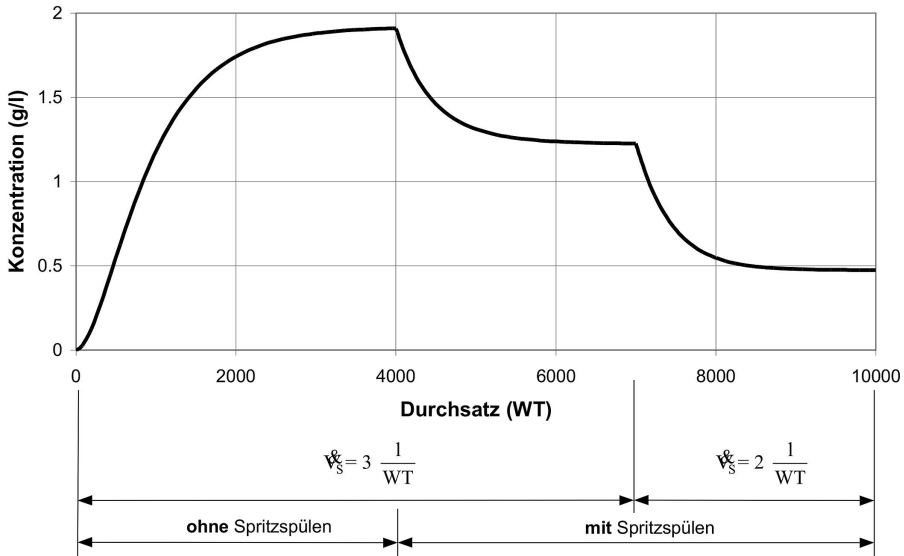


Abb. 1: Einstellen stationärer Arbeitspunkte (simulierter Versuchsablauf)

änderung bei gesteigertem Sprühvolumen ermitteln. Wie jedoch an dem Beispiel deutlich wird, ist der nötige Aufwand für entsprechende Versuche erheblich. Außerdem wäre es unter betrieblichen Bedingungen schwierig, über eine so große Anzahl von Warenträgern konstante Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Diese Probleme werden bei der zweiten möglichen Herangehensweise zur Durchführung von Aufkonzentrationsversuchen vermieden. Dabei wird nicht das Einstellen stationärer Verhältnisse abgewartet, sondern es werden bereits die Daten der zeitlichen Konzentrationsverläufe genutzt. Dadurch können schon mit dem Spülen einiger weniger Warenträger quantitative Informationen über das Spritzspülen gewonnen werden. Die Nutzung einer solchen instationären (dynamische) Methode zur experimentellen Untersuchung von Spritzspülvorgängen soll im Folgenden detailliert beschrieben werden.

3 Dynamische Experimente

3.1 Konzentrationsermittlung

Um Ergebnisse aus zeitlichen Prozessverläufen effektiv zu gewinnen, müssen die entsprechenden dynamischen Experimente in geeigneter Weise durchgeführt werden. So ist als Erstes die Frage der Versuchsdatengewinnung zu entscheiden.

Der klassische Weg, die zur Untersuchung der Wirkung von Spritzspülvorgängen nötigen Konzentrationen zu bestimmen, sind Analysen im chemischen Labor. Konzentrationsanalysen sind jedoch für eine effektive Versuchsdurchführung aus verschiedenen Gründen weniger zweckmäßig als geeignete Onlineverfahren der Konzentrationsmessung. Erstens verlangen Laboranalysen einen erheblichen personellen und gerätetechnischen Aufwand. Das gilt insbesondere, wenn zum Verfolgen von Konzentrationsverläufen eine große Anzahl von Einzelanalysen nötig sind. Zweitens ist das Beobachten und Überwachen laufender Experimente bei Nutzung von Konzentrationsanalysen schwierig, denn die Ergebnisse stehen nur zeitverzögert und nur für einzelne Messpunkte zur Verfügung. Drittens ist jede Einzelanalyse mit einem zufälligen Fehler behaftet, der die Versuchsergebnisse erheblich beeinflussen kann. Dagegen besteht bei zeitlich fortlaufenden

Messreihen die Möglichkeit, die zufälligen Fehler durch Mittelwertbildung zu minimieren.

Aus diesen Gründen ist der Einsatz von Onlinemessmethoden zum Verfolgen der Konzentrationsverläufe von Vorteil. Ist es möglich, ein geeignetes Konzentrationsmessverfahren bei den experimentellen Arbeiten zum Einsatz zu bringen, ergibt sich eine einfache Versuchsdurchführung. Außerdem lässt sich der erfolgreiche Verlauf der Experimente schon während der Versuchsarbeiten abschätzen und die Versuchsdurchführung kann während der Arbeiten nötigenfalls an konkrete Gegebenheiten angepasst werden.

Die Online-Konzentrationsmessung in Spülwässern ist relativ einfach zu realisieren, da in diesem Fall keine selektive Messung einzelner Stoffe nötig ist. Es genügt, die Anreicherung der Stoffe aus der Prozesslösung als Summenparameter zu bestimmen. Dafür eignen sich insbesondere die Leitfähigkeit und unter Umständen auch der pH-Wert. Im günstigsten Fall ist eine entsprechende Messung bereits am zu untersuchenden Spülprozess instrumentiert. Ist das nicht der Fall, kann die Messung für die Zeit der Versuchsdurchführung provisorisch installiert werden.

Wichtig für die Genauigkeit der Versuchsergebnisse ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen gemessener Größe (z. B. Leitfähigkeit) und der Konzentration in der Spüllösung. Ist dieser nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt, muss er in Vorversuchen bestimmt werden.

3.2 Durchführung von Aufkonzentrationsversuchen

In *Abbildung 2* ist eine prinzipielle Anordnung für Aufkonzentrationsversuche zur Ermittlung der Wirkung von Spritzspülvorgängen dargestellt. Zu der Versuchsanordnung gehören eine höherkonzentrierte Lösung (z. B. ein Prozessbad) und ein Aufkonzentrationsbad (Spüle), die während der Spritzspülversuche als Standbäder betrieben werden. Ein Träger mit Ware muss nun lediglich zwischen der höherkonzentrierten Lösung und dem Aufkonzentrationsbad hin- und hertransportiert werden, wobei die Ware nach dem Tauchen in die höherkonzentrierte Lösung abgespritzt wird. Aus dem Konzentrationsverlauf im Aufkonzentrie-

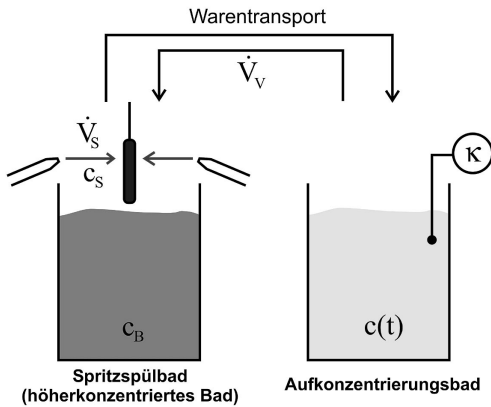


Abb. 2: Versuchsanordnung zum Spritzspülen

rungsbad kann die verschleppte Fracht und somit die Wirkung des Spritzspülens ermittelt werden.

Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- in einem ersten Spülversuch ohne Spritzspülen wird das warentypische Verschleppungsvolumen V_V ermittelt;
- die Ware wird mit einer Lösung bekannter Konzentration abgespritzt. Es kann sich dabei um Wasser oder um eine niedriger konzentrierte Spüllösung mit einer Konzentration c_S handeln;
- zusätzlich kann die Spritzspülwirkung für veränderte Spritzspülbedingungen (z. B. Spritzspül-

volumen, Form und Anordnung der Spritzdüsen) verändert werden. Somit lässt sich das Spritzspülensystem in seiner Wirkung optimieren.

Zur Ermittlung des Verschleppungsvolumens und der Spritzspülwirkung muss die Konzentration der sich vor dem Spritzspülen auf der Ware befindlichen Lösung bekannt sein. Diese kann aus der Konzentration im Spritzspülbad ermittelt werden, wenn Vollvermischung vorliegt. Eine hinreichende Tauchzeit und/oder mehrfaches Eintauchen der Ware sichern diese für genaue Versuchsergebnisse unerlässliche Bedingung.

Die Verschleppung führt zu einem Konzentrationsanstieg im Aufkonzentrierungsbad. Ein solcher Konzentrationsverlauf ist beispielhaft in *Abbildung 3* dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Konzentration durch die eingeschleppte Fracht ansteigt und sich allmählich einem Endwert annähert. Um aus dem Konzentrationsverlauf auf die eingeschleppte Fracht zu schließen, ist eine Anfangskonzentration von Null nicht nötig, das heißt, ein Neuanfang des Aufkonzentrierungsbades mit Frischwasser ist nicht zwingend.

Allerdings ist in *Abbildung 3* auch zu erkennen, dass der durch eine bestimmte Fracht zu erzielende Konzentrationsanstieg in niedrigen Konzentrationsbereichen größer ist als in hohen. Wird in einem hohen Konzentrationsbereich gearbeitet, muss also

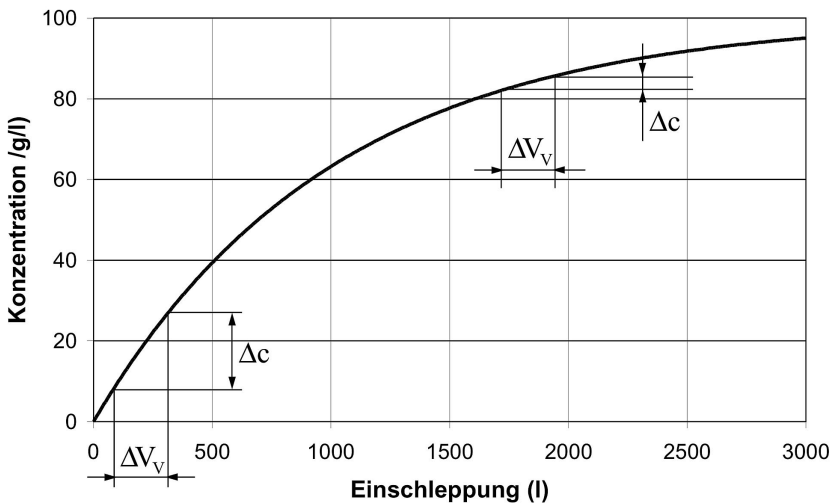


Abb. 3: Konzentrationsverlauf im Aufkonzentrierungsbad

eine größere Fracht eingebracht werden (größere Anzahl von Wareträgern – höherer Experimentieraufwand). Andernfalls wird nur eine kleine Konzentrationsdifferenz erreicht, bei deren Bestimmung Messfehler stärker ins Gewicht fallen. Daher ist es empfehlenswert, die Aufkonzentrierungsversuche in niedrigen Konzentrationsbereichen durchzuführen.

3.3 Auswertung der Versuchsdaten

Zur Ermittlung der Spritzspülwirkung muss das Verschleppungsvolumen bekannt sein. Wie oben beschrieben wird dieses in einem ersten Spülversuch ohne Spritzspülen ermittelt. Dazu werden zu Versuchsbeginn die Konzentrationen c_B in der hochkonzentrierten Lösung, welche ohne Spritzspülen gleich der Verschleppungskonzentration c_V ist, sowie die Konzentration c_0 im Aufkonzentrierungsbad ermittelt. Darauf wird der Testwareträger mehrfach zwischen beiden Lösungen hin- und hergefahren (n Spülvorgänge) und dadurch ein messbarer Anstieg der Konzentration im Aufkonzentrierungsbad auf den Endwert c_e bewirkt.

Mit der Durchführung mehrerer Spülschritte ist eine Mittelung von Schwankungen der einzelnen Verschleppungsvorgänge möglich, wodurch zufällige Fehler ausgeglichen werden. Wird nun angenommen, dass die Ein- und Ausschleppungsvolumina gleich sind und dass sich die Konzentration in der hochkonzentrierten Lösung während des Versuchs nicht wesentlich ändert, kann das in n Spülvorgängen verschleppte Volumen V_V wie folgt berechnet werden:

$$V_V = V \cdot \ln((c_B - c_0)/(c_B - c_e)) \quad <1>$$

In vielen Fällen lässt sich folgende vereinfachte Formel zur Berechnung des Verschleppungsvolumens anwenden:

$$V_V = V((c_e - c_0)/(c_B - c_e)) \quad <2>$$

Diese Beziehung gilt in guter Näherung, wenn der im Aufkonzentrierungsbad durchlaufene Konzentrationsbereich nicht zu groß ist.

Aus dem in n Spülvorgängen ermittelten Verschleppungsvolumen kann einfach das Verschleppungsvolumen pro Wareträger \bar{V}_V ermittelt werden:

$$\bar{V}_V = V_V/n \quad <3>$$

Nach der Ermittlung des Verschleppungsvolumens folgen die eigentlichen Spritzspülversuche. Dabei soll die Spülwirkung mit und ohne Spritzspülen verglichen und durch einen entsprechenden Parameter ausgedrückt werden. Hierzu dient das folgende einfache Modell des Spritzspülvorgangs:

$$c_V = c_B - (c_B - c_S) \cdot \alpha_S \quad <4>$$

Hierbei ist c_B die Konzentration im Prozess- oder Spülbad, aus der die abzuspitzende Ware kommt. Abgespritzt wird mit einer Lösung der Spritzspülkonzentration c_S und nach dem Spritzspülen wird eine Lösung mit der Konzentration c_V verschleppt. Der in Gleichung <4> enthaltene *Spritzspülkoeffizient* α_S drückt die Wirksamkeit des Spritzspülens aus. Der Spritzspülkoeffizient liegt zwischen Null und Eins. Dabei bedeutet $\alpha_S = 0$ die vollkommene Unwirksamkeit des Spritzspülens (Verschleppungskonzentration c_V nach dem Spritzspülen gleich der Prozess- bzw. Spülbadkonzentration c_B) und $\alpha_S = 1$ entspricht idealem Spritzspülen (Verschleppungskonzentration c_V gleich der Spritzspülkonzentration c_S). Praktisch wird sich die Verschleppungskonzentration immer zwischen diesen beiden Grenzfällen einstellen.

Bei der Durchführung eines Spritzspülexperiments wird zuerst die Anfangskonzentration c_0 im Aufkonzentrierungsbad ermittelt. Dann wird eine bestimmte Anzahl von Wareträgern zwischen der höherkonzentrierten Lösung und dem Aufkonzentrierungsbad hin- und hergefahren, wobei über dem höherkonzentrierten Bad mit einer Lösung der Konzentration c_S abgespritzt wird (Abb. 2). Danach wird die Endkonzentration im Aufkonzentrierungsbad c_e ermittelt.

Der Spritzspülkoeffizient lässt sich allgemein nach Gleichung <5> der Tabelle 1 berechnen. Da das Volumen des Aufkonzentrierungsbades in der Regel wesentlich größer als das eingeschleppte Volumen ist, kann auch die vereinfachte Gleichung <6> angewendet werden. Für den Fall, dass mit Frischwasser abgespritzt wird, vereinfacht sich die Berechnung des Spritzspülkoeffizienten nochmals gemäß den Gleichungen <7> und <8>.

4 Ergebnisse der Untersuchungen

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojekts [4] wurden durch Mitarbeiter des Instituts für Automa-

Tab. 1: Formeln zur Berechnung des Spritzspülkoeffizienten

	Berechnung allgemein	vereinfachte Berechnung ($V \gg V_V$)
Spritzspülen allgemein ($c_S > 0$)	$\alpha_S = \frac{c_B - \left(\Delta c \frac{V}{V_V} + c_0 + \Delta c \right)}{c_B - c_S} \quad <5>$	$\alpha_S = \frac{c_B - \Delta c \frac{V}{V_V}}{c_B - c_S} \quad <6>$
Spritzspülen mit Wasser ($c_S = 0$)	$\alpha_S = 1 - \frac{1}{c_B} \left(\Delta c \frac{V}{V_V} + c_0 + \Delta c \right) \quad <7>$	$\alpha_S = 1 - \frac{\Delta c V}{c_B V_V} \quad <8>$

α_S – Spritzspülkoeffizient
 V – Volumen im Aufkonzentrierungsbad
 V_V – Volumen der Einschleppung in das Aufkonzentrierungsbad
 c_B – Konzentration im Spritzspülbad
 c_S – Konzentration der Spritzspüllösung
 c_0 – Konzentration im Aufkonzentrierungsbad am Versuchsanfang
 $\Delta c = c_E - c_c$ – Konzentrationsdifferenz während des Spritzspülversuchs

tisierungstechnik der TU Dresden in einer Lohngalvanik Untersuchungen zum Spritzspülen an einem Nickelprozess durchgeführt. Ziel war dabei, die hier beschriebene Methode zur effektiven Untersuchung von Spritzspülprozessen unter betrieblichen Bedingungen zu erproben. Gleichzeitig konnte für die untersuchte Prozessstufe eine Abschätzung getroffen werden, welche Steigerung der Spülwirkung durch Spritzspülen unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Spritzspülvolumen, Art der Ware, Abtropfzeit) erreichbar ist.

4.1 Vorversuche

Um die oben beschriebenen Vorteile einer Online-Konzentrationsmessung während der Versuchsdurchführung nutzen zu können, wurden Vorversuche zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Konzentration und Leitfähigkeit durchgeführt. Dazu wurde der hochkonzentrierte Nickelelektrolyt stufenweise verdünnt und die zugehörigen Leitfähigkeitsmesswerte aufgenommen. Weiterhin wurde der Temperaturkoeffizient der Leitfähigkeit für die verdünnte Lösung ermittelt.

Während der Spritzspülversuche wurde das im Normalbetrieb als Fließspüle genutzte Spülbad als Standspüle betrieben, sodass eine Versuchsanordnung zum wechselseitigen Eintauchen der Ware entsprechend Abbildung 2 realisiert werden konnte. Am Spülbad wurde provisorisch eine Leitfähigkeitsmessung installiert, wobei die Messergebnisse auf einem Rechner erfasst und deren Zeitverläufe

angezeigt wurden. Ein erster einfacher Spülversuch diente der Ermittlung der zum Erreichen von Vollvermischung nötigen Tauchzeit. In Abbildung 4 ist der Konzentrationsverlauf nach Eintauchen eines Warenträgers (zum Zeitpunkt $t = 0$) abgebildet. Es ist zu erkennen, dass drei Minuten zum sicheren Erreichen der Vollvermischung nötig sind. Diese Mindesttauchzeit wurde bei den folgenden Versuchen eingehalten, um die zu untersuchenden Spritzspülvorgänge nicht durch Effekte unvollständiger Vermischung zu überlagern.

4.2 Spritzspülversuche

Nach Ermittlung der nötigen Tauchzeit begann das eigentliche Versuchsprogramm zur Untersuchung des Spritzspülens. Die Versuche wurden jeweils doppelt, nämlich zum einen mit gut abspritzbare Ware (glatte, gut zugängliche Oberfläche) und zum

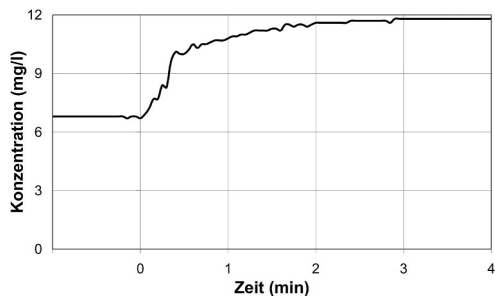


Abb. 4: Konzentrationsanstieg nach Eintauchen eines Warenträgers

anderen mit schlecht abspritzbarer Ware (dünne Rohre) durchgeführt. Entsprechend dem oben beschriebenen Vorgehen fand der erste Aufkonzentrierungsversuch ohne Spritzspülen statt und diente der Ermittlung des Verschleppungsvolumens pro Warenträger. Es folgten Versuche mit Spritzspülen über dem Nickelelektrolyten, wobei die zum Spritzspülen verwendete Frischwassermenge variiert wurde.

In weiteren Versuchen wurde die Abtropfzeit nach dem Spritzspülen verlängert. Alle Einzelversuche wurden jeweils mit einer Folge von fünf bzw. zehn Spülvorgängen durchgeführt. In *Tabelle 2* sind die Ergebnisse der Versuche und die daraus berechneten Verschleppungen und Spritzspülkoeffizienten zusammengestellt.

4.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Wie die ermittelten Spritzspülkoeffizienten zeigen, ist generell eine deutliche Wirksamkeit des Spritzspülens zu erkennen. Bereits mit dem geringeren Spritzspülvolumen lässt sich eine gute Wirkung des Spritzspülens erreichen (Versuche 5 und 6). Bei der schlecht abspritzbaren Ware ist die Spritzspülwir-

kung durch Verdoppelung des Spritzspülvolumens merklich steigerbar (Versuche 5 und 4).

Durch die Verlängerung der Abtropfzeit konnte das Verschleppungsvolumen kaum noch verringert werden (Versuche 1 und 7 sowie 3 und 9). Offensichtlich ist die Abtropfzeit von 2 Sekunden bezüglich des verschleppten Volumens hinreichend. Allerdings lohnt sich die verlängerte Abtropfzeit in Kombination mit dem Spritzspülen. So konnte trotz des reduzierten Spritzspülvolumens eine gesteigerte Spritzspülwirkung erzielt werden (Versuche 6 und 8 sowie 5 und 10).

4.4 Bedeutung der ermittelten Spritzspülkoeffizienten

Die Bedeutung der ermittelten Spritzspülkoeffizienten soll an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden. Es sei angenommen, dass die schlecht abspritzbare Ware (Verschleppung 0,24 l/WT) mit einem Spülkriterium von 10 000 zu spülen ist. Es lässt sich errechnen, dass für eine dreistufige Fließkaskade ohne Spritzspülen 5,1 Liter Frischwasser pro Warenträger nötig sind, um dieses Spülkriterium zu erreichen. Wird über den drei Spülbädern abgespritzt, sinkt der Wasserverbrauch schon beim

Tab. 2: Versuchsergebnisse

Versuch Nr.	Teil	Spritzspülen (l/WT)	Abtropfzeit (s)	Anzahl (WT)	Leitfähigk. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Konz. (mg/l)	Verschleppung (l/WT)	Spritzspülkoeffizient
–	–	–	–	–	55	7	–	–
0	1	0	2	1	86	12	0,123	–
1	1	0	2	5	212	37	0,118	–
2	1	3,25	2	10	311	59	0,118	54,4%
3	2	0	2	5	509	109	0,241	–
4	2	3,65	2	10	704	164	0,241	45,4%
5	2	1,85	2	10	913	227	0,241	36,5%
6	1	1,75	2	10	988	250	0,118	51,8%
7	1	0	10	5	1065	275	0,119	–
8	1	1,76	10	10	1117	292	0,119	65,4%
9	2	0	10	5	1243	333	0,202	–
10	2	1,89	10	10	1389	383	0,202	39,5%

Anmerkung: Teil 1 – gut abspritzbar; Teil 2 – schlecht abspritzbar

Badvolumen: $V = 2220 \text{ l}$

Verschleppungskonzentration aus dem Nickelelektrolyten: Versuchsbeginn: $c_B = 92,7 \text{ g/l}$, Versuchsende: $c_B = 91,5 \text{ g/l}$

niedrigsten Spritzspülkoeffizienten von 36,5 % auf 3,3 l/WT.

Es taucht nun die Frage auf, ob durch das Spritzspülen eine gesamte Spülstufe eingespart werden kann. Bei einem Frischwassereinsatz von 5,1 l/WT zum Spritzspülen, darf ein Spritzspülkoeffizient von mindestens 45,4 % erwartet werden. Damit wird jedoch in einer zweistufigen Spüle nur ein Spülkriterium von 1 522 erreicht. Das Spritzspülen alleine ersetzt also noch keine Spülstufe.

Wird jedoch zusätzlich der Wassereinsatz auf 13 l/WT erhöht, ist das Spülkriterium 10 000 auch bei der zweistufigen Spüle gesichert. Das ist zwar ein merklicher Mehrverbrauch an Wasser, er liegt jedoch deutlich unter den 24 l/WT, die bei einer zweistufigen Fließkaskade ohne Spritzspülen benötigt würden. Außerdem können die 13 l/WT noch unterschritten werden, da bei dem (im Vergleich zu den 3,65 l/WT) relativ großen Spritzspülvolumina eine weitere Steigerung der Spritzspülwirkung zu erwarten ist und bei warm arbeitenden Prozessstufen zum Ausgleich von Verdunstungsverlusten ggf. auch über diesen abgespritzt werden kann.

5 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurde eine experimentelle Methode vorgestellt mit der in effektiver Weise Kenntnisse zur Wirksamkeit von Spritzspülvorgängen gewonnen werden können. Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen ist es einfach möglich, solche Versuche unter betrieblichen Bedingungen nachzuvollziehen. Mit den angegebenen Formeln lässt sich dann problemlos der hier eingeführte Spritzspülkoeffizient als quantitatives Maß für die Wirksamkeit des Spritzspülens berechnen.

Wie die in einem galvanotechnischen Betrieb entsprechend dem beschriebenen Vorgehen durchgeführten Experimente eindrucksvoll belegen, ist es möglich, in sehr überschaubarer Zeit (Versuchszeit ca. 13 Stunden) und mit vertretbarem Aufwand (Warenträger 81mal zwischen Prozess- und Aufkonzentrierungsbad hin- und hergefahren) zu den gewünschten Spritzspülkoeffizienten zu gelangen. Wären hingegen die gleichen Ergebnisse durch das

eingangs beschriebene Einstellen von Fließgleichgewichten zu ermitteln, würden Versuche mit mehreren tausend Warenträgern nötig werden.

Die gewonnenen Zahlenwerte gelten exakt nur für die beiden untersuchten Teilearten und unter den konkreten Prozessbedingungen. Trotzdem liegen durch die Experimente mit einem gut und einem schlecht abspritzbaren Teil sowie mit unterschiedlichen Spritzvolumina und Abtropfzeiten erste Werte für günstig und ungünstige Spritzspülbedingungen vor. Sicher ist zu erwarten, dass sich in vielen praktischen Fällen Spritzspülkoeffizienten innerhalb des experimentell ermittelten Bereichs ergeben.

Insgesamt ist einzuschätzen, dass das Spritzspülen zwar eine weitverbreitete aber wenig untersuchte Technologie ist. Hinderlich sind die fehlenden quantitativen Angaben zur Wirksamkeit des Spritzspülens bei einer zielgenauen Auslegung von Spülsystemen (Gewährleistung der Spülqualität ohne unnötigen Wasserverbrauch). Neben Experimenten, mit denen Anwender Aufschluss über ihre konkreten Spritzspülprozesse gewinnen, sind zukünftig Arbeiten nötig, durch die prinzipielle Zusammenhänge zwischen Spritzspülwirkung und Faktoren wie Spritzspülvolumen, Abtropfzeit, Anordnung der Spritzdüsen, Art der Ware, Konzentration und Zusammensetzung der Prozesslösung usw. geklärt werden. Die hier vorgestellte Versuchsmethode kann für beide Untersuchungsziele sinnvoll eingesetzt werden.

Danksagung

Dieser Beitrag ist im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundvorhabens *Umstellung bestehender galvanotechnischer Anlagen auf eine stoffverlustminimierte Prozesstechnik bei gleichzeitiger Kostensenkung* entstanden. Projektträger ist die Umweltforschung und -technik der DLR. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Reh, H.-J.: Kostensenkung und Umweltschutz; *Galvanotechnik* 70 (1970) 8, S. 720–728
- [2] Schene, H.: Einsparung und Rückgewinnung durch richtige Spültechnik; *Galvanotechnik* 67 (1976) 4, S. 377–381
- [3] Winkel, R.: *Wasser und Abwasser*; Saulgau, Eugen G. Leuze Verlag, 1992
- [4] Hauser, S.; Giebler, E.; Neumann, K.-H.; Reich, A.: Schlussbericht für das BMBF-Verbundvorhaben *Umstellung bestehender galvanotechnischer Anlagen auf eine stoffverlustminimierte Prozesstechnik bei gleichzeitiger Kostensenkung – Teilvorhaben: Automatisierungslösungen bei Umstellung der Prozesstechnik*. Dresden 2003