

Entfernung von Chromat

bei der Trinkwasseraufbereitung

Bedingt durch sein natürliches Vorkommen in Gesteinen, kann das Element Chrom in seiner drei- oder sechswertigen Form **natürlicherweise in Grundwässern vorkommen. Der aktuelle Grenzwert des Stoffes im Trinkwasser ist bei der Änderung der Trinkwasserverordnung auf 0,0050 mg/l herabgesetzt worden. Im DVGW-Forschungsvorhaben W 4/02/13 wurden vor diesem Hintergrund **verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Entfernung** von sechswertigem Chrom (Chromat) bei der Trinkwasseraufbereitung untersucht.**

von: Dr. Frank Sacher, Dr. Marcel Riegel & Volker Schlitt (alle: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser)

Der **Verordnungsentwurf** des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) und des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zur Neuordnung trinkwasserrechtlicher Vorschriften vom 27. Juni 2017 (Referentenentwurf) enthält zahlreiche Änderungen an der aktuell gültigen Fassung der Trinkwasserverordnung (TrinkwV). Diese Änderungen dienen der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie 2015/1787 (Änderungsrichtlinie) zur Änderung der Anhänge II und III der Richtlinie 98/83/EG des Rates der Europäischen Union über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (EG-Trinkwasserrichtlinie), die bis zum 27. Oktober 2017 erfolgen muss.

Die vorgeschlagenen Änderungen betreffen auch Anlage 2, Teil I der Trinkwasserverordnung („Chemische Parameter, deren Konzentration sich im Verteilungsnetz einschließlich der Trinkwasser-Installation in der Regel nicht mehr erhöht“), in der der aktuell gültige Grenzwert für Chrom von 0,050 mg/l auf 0,0050 mg/l herabgesetzt wird. Der neue Grenzwert, der für den Gesamtchrom-Gehalt gilt, ist mit der Bemerkung versehen: „Die Konzentration von sechswertigem Chrom (Cr-VI) ist nach dem Stand der Technik zu minimieren. Die Regelungen zum Parameter Chrom sind nach Ablauf von drei Kalenderjahren nach Inkrafttreten dieser Verordnung zu überprüfen und

ggf. anzupassen“. In Zusammenhang mit der Änderung des Grenzwertes werden auch die Verfahrenskennwerte in Anlage 5 angepasst. Für die Bestimmung des Gesamtchrom-Gehaltes werden eine Messunsicherheit von 30 Prozent und eine Bestimmungsgrenze von 0,0001 mg/l (0,1 µg/l) gefordert.

Bereits im Jahr 2012 hatte das DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) in Karlsruhe ein durch den DVGW gefördertes Forschungsvorhaben durchgeführt, in dem erste Informationen zum Vorkommen von sechswertigem Chrom in deutschen Roh- und Trinkwässern gesammelt wurden [1, 2]. Durch die Untersuchung von etwa 150 Proben wurde gezeigt, dass Roh- und Trinkwässer in Deutschland sechswertiges Chrom enthalten können. In einem zweiten, ebenfalls durch den DVGW geförderten Vorhaben, das gemeinsam mit der Hessenwasser GmbH & Co. KG bearbeitet wurde, konnten die Untersuchungen weitergeführt und vertieft werden [3]. Zudem wurden Versuche im kleintechnischen Maßstab zur Entfernung von Chrom bei der Trinkwasseraufbereitung durchgeführt. Die Schwerpunkte der Arbeiten lagen bei Ionenaustauschverfahren und dem sogenannten RCF-Prozess (Reduktion, Flockung und Filtration) unter Verwendung von Eisen(II)salzen. Über die Ergebnisse der Untersuchungen wird im Folgenden berichtet.

Auswertung eines Monitoring-Programms hinsichtlich des Verhaltens von sechswertigem Chrom bei der Trinkwasseraufbereitung

An dem Monitoring-Programm zum Vorkommen von drei- und sechswertigem Chrom beteiligten sich 44 Wasserversorgungsunternehmen. Dabei stellten viele Unternehmen Proben aus mehreren Werken zur Verfügung, sodass insgesamt Daten von 184 Wasserwerken für die Auswertung genutzt werden konnten. In der Mehrzahl der Fälle wurden Roh- und Trinkwasserproben untersucht, in einigen Fällen auch Proben nach einzelnen Aufbereitungsstufen. Auch wenn diese Proben häufig nicht korrespondierend entnommen wurden, erlaubt die Auswertung der erhaltenen Ergebnisse eine erste Einschätzung der Entfernbarkeit von Chrom bei verschiedenen Verfahren der Trinkwasseraufbereitung.

Allgemein lässt sich bei einem Vergleich der Gehalte an sechswertigem Chrom in Roh- und Trinkwasserproben sehr häufig der in **Abbildung 1** dargestellte Zusammenhang feststellen: Die Konzentrationen an sechswertigem Chrom in Roh- und Trinkwasser sind vergleichbar, d. h., durch die Aufbereitung findet in der Regel keine Reduzierung der Gehalte an sechswertigem Chrom statt. Diese Erkenntnis wird für die natürlichen Aufbereitungsverfahren Lang-

sandsandfiltration bzw. Bodenpassage oder Uferfiltration ebenso durch zahlreiche Einzelergebnisse belegt wie für technische Verfahren wie Flockung, Ultrafiltration, Aktivkohlefiltration oder Desinfektionsverfahren wie die UV-Bestrahlung oder die Zugabe chemischer Desinfektionsmittel.

Eine Verminderung der Gehalte an sechswertigem Chrom während der Aufbereitung wurde nur in wenigen Einzelfällen beobachtet. Ein Beispiel für einen solchen Fall zeigt **Abbildung 2**, wo für ein Wasserwerk, in dem ein reduziertes eisen- und manganhaltiges Grundwasser aus drei Brunnen gefördert und mittels Belüftung und Sandfiltration aufbereitet wird, die Gehalte an sechswertigem Chrom in den drei genutzten Brunnenwässern und im Trinkwasser nach Aufbereitung dargestellt sind. Erkennbar ist, dass durch die Enteisung bzw. Entmanganung die Gehalte an sechswertigem Chrom deutlich verringert werden. Es ist bekannt, dass zweiwertiges Eisen Chromat auch bei Anwesenheit von Sauerstoff zu dreiwertigem Chrom reduzieren kann [4–6]. Der Mechanismus für die Entfernung von Chrom bei einer Enteisung besteht daher in einer Reduktion des sechswertigen Chroms durch zweiwertiges Eisen und dem gemeinsamen Rückhalt von Eisen- und Chromhydroxid in der Filterstufe.

Eintrag von sechswertigem Chrom durch Aufbereitungschemikalien

Die Ergebnisse des Monitoring-Programms zeigten auch, dass in einigen Fällen im Trinkwasser geringfügig höhere Gehalte an sechswertigem Chrom auftreten können als im Rohwasser. Insbesondere bei Aufbereitungsstufen zur chemischen Entsäuerung oder Entcarbonisierung stiegen die Konzentrationen an sechswertigem Chrom in manchen Fällen an. Ein Beispiel für ein Wasserwerk, bei dem die chemische Entsäuerung mit Calciumhydroxid zu einem geringfügigen Ansteigen der Gehalte an sechswertigem Chrom im behandelten Trinkwasser führte, ist in **Abbildung 3** dargestellt. Auch eine

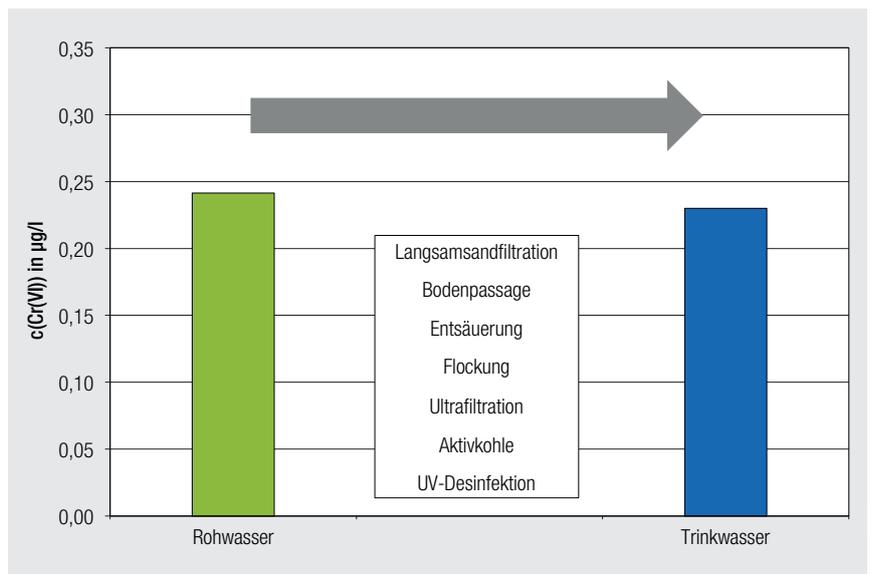


Abb. 1: Entfernbarkeit von sechswertigem Chrom bei verschiedenen Aufbereitungsverfahren

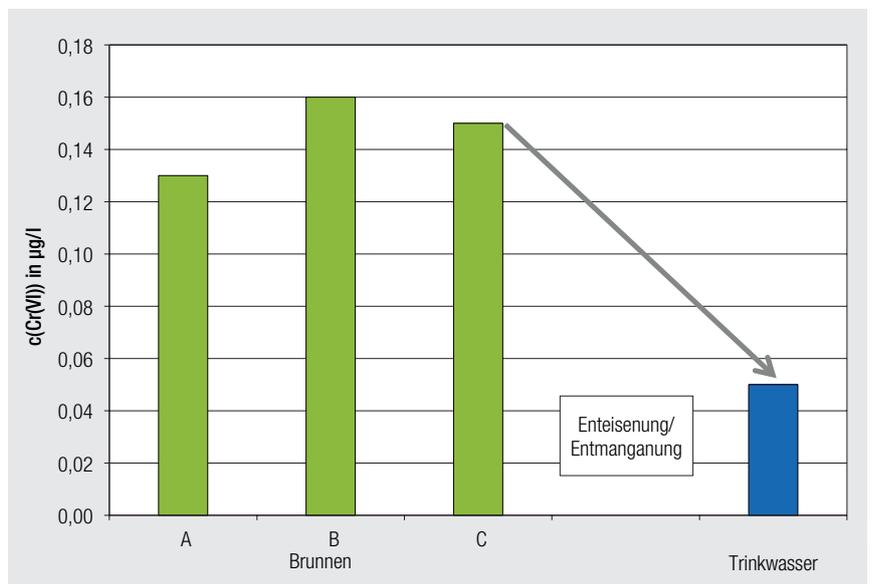


Abb. 2: Entfernung von sechswertigem Chrom bei der Enteisung

aktuelle Veröffentlichung zu Ergebnissen aus Wasserwerken in Schleswig-Holstein weist auf eine Zunahme der Gehalte an sechswertigem Chrom beim Einsatz von Kalkprodukten zur Entsäuerung oder Aufhärtung hin [7].

Als Folge dieser Ergebnisse wurden für die in der § 11-Liste nach TrinkwV aufgeführten Aufbereitungsstoffe Modellrechnungen mit den maximal zulässigen Chromgehalten durchgeführt [3]. Es zeigte sich, dass durch einige in der Trinkwasseraufbereitung eingesetzte Chemikalien ein Eintrag von Chrom stattfinden kann: Insbesondere eisen-

haltige Flockungsmittel wie Eisen(III)-chlorid oder Eisen(III)chloridsulfat sowie die auf Kalk basierenden Stoffe Calciumhydroxid, Calciumcarbonat und halbgebrannter Dolomit können demnach eine Zunahme der Konzentration an sechswertigem Chrom im aufbereiteten Wasser bewirken. In einigen Wasserwerken konnten Messungen der Chromgehalte in den zur Aufbereitung zugesetzten Stoffe direkt mit dem Anstieg der Gehalte an sechswertigem Chrom im aufbereiteten Wasser korreliert werden, was die Relevanz der theoretischen Betrachtungen für die Praxis belegt.

Kleintechnische Versuche zum Rückhalt von sechswertigem Chrom mittels Anionenaustauscher

Zur Entfernung von sechswertigem Chrom können nach den Angaben in der Literatur sowohl schwach als auch stark basische Anionenaustauscher eingesetzt werden [8]. In zwei Wasserwerken wurden daher Anlagen im Labormaßstab aufgebaut, um das Adsorptionsverhalten von insgesamt acht schwach und stark basischen Anionenaustauschern zu untersuchen.

Die Versuchsanlagen wurden an beiden Standorten dreistraßig ausgeführt, sodass jeweils drei Ionenaustauscher parallel untersucht werden konnten. Das Rohwasser wurde zunächst in einen im Überlauf betriebenen Vorlagebehälter gespeist. Bei Bedarf bestand die Möglichkeit der pH-Wert-Einstellung, indem in den Zulauf zum Vorlagebehälter Säure oder Base durchsatzproportional dosiert wurde. Der pH-Wert konnte im Vorlagebehälter kontinuierlich gemessen werden. Die drehzahlregulierten Pumpen wurden mit dem statischen Vordruck des Vorlagebehälters betrieben und be-

schickten die drei Filtersäulen mit einem konstanten Wasservolumenstrom. Die Fließrichtung war in den Säulen von oben nach unten gerichtet. Die Filtersäulen selbst bestanden aus 2-cm-PVC-transparent-Rohren, sämtliche Fittings und Armaturen aus PVC-grau. Die Säule war aus insgesamt vier Segmenten zusammengesetzt, sodass in vier unterschiedlichen Bettiefen Probenahmen möglich waren. Die Proben wurden stets im Vollstrom genommen, wobei der nachfolgende Filter komplett abgeschiebert war. Die vier Segmente waren mit unterschiedlichen Schütthöhen von ca. 10, 32, 33 und 75 cm befüllt, sodass eine Gesamtbethöhe von ca. 150 cm resultierte. An beiden Standorten wurden die lokalen Grundwässer für den Betrieb der Versuchsanlage genutzt, wobei sich die Wässer in ihrer Beschaffenheit, insbesondere in ihrem Mineralisierungsgrad, unterschieden. Das Wasser am Standort II enthielt deutlich mehr Mineralstoffe: So war die Sulfatkonzentration im Grundwasser am Standort II viermal so hoch wie im Wasser am Standort I.

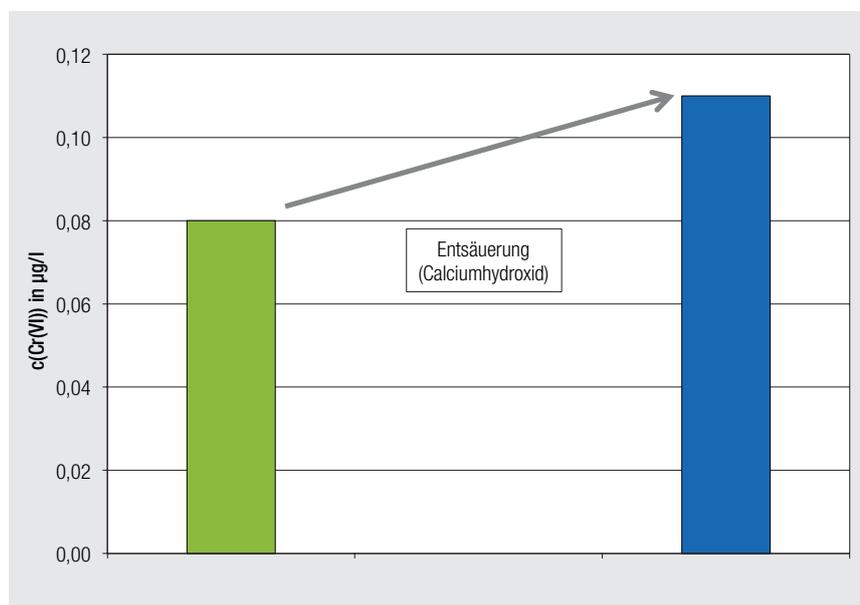


Abb. 3: Verhalten von sechswertigem Chrom bei der Entsäuerung mit Calciumhydroxid

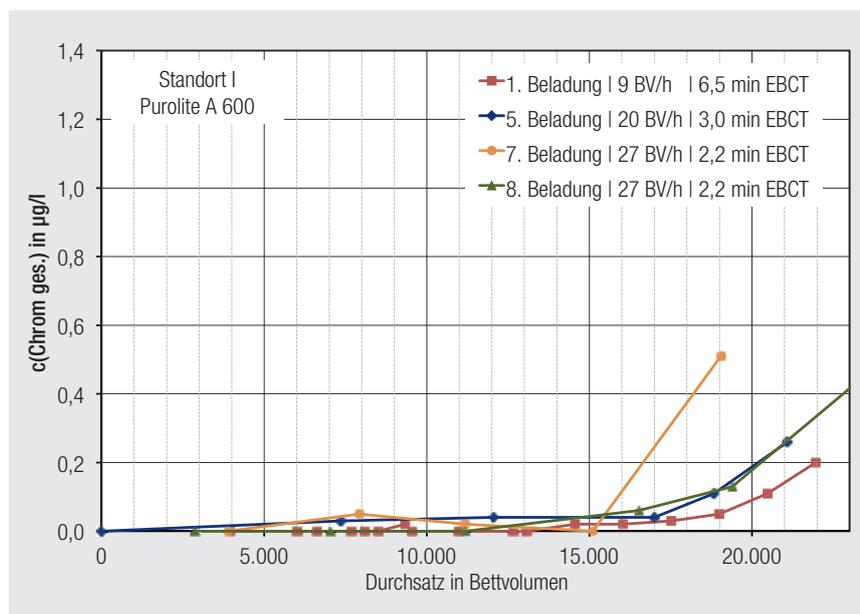


Abb. 4: Rückhalt von sechswertigem Chrom mit einem stark basischen Anionenaustauscher an Standort I

Die Untersuchungen mit den schwach basischen Anionenaustauschern wurden am Standort II durchgeführt. Der Verlauf der ermittelten Durchbruchkurven zeigt, dass der Durchbruch für Chrom bereits nach sehr kurzen Filterlaufzeiten, teilweise sogar direkt nach Inbetriebnahme der Filter, erfolgt. In einer zweiten Versuchsphase wurde der pH-Wert des Rohwassers im Vorlagebehälter vor den Filtersäulen mittels Salzsäure auf 5,8 bis 6,0 eingestellt. Der Verlauf der Durchbruchkurven für die drei schwach basischen Ionenaustauscher zeigt allerdings, dass durch die pH-Wert-Einstellung die Adsorptionskapazität für Chrom nicht wesentlich gesteigert werden kann. Schwach basische Anionenaustauscher sind daher für die Entfernung von Chrom wenig geeignet.

Die Ergebnisse der Versuche zum Chromrückhalt mit einem stark basischen Anionenaustauscher (Purolite A 600) am Standort I zeigt **Abbildung 4** (dunkelrote Kurve). Für zwei weitere getestete Austauscher (Lewatit DW 630 und Lewatit M 800 von Lanxess) erhielt

man ähnliche Kurvenverläufe. Bezogen auf die gesamte Betthöhe wird ein beginnender Durchbruch nach einer Filterlaufzeit zwischen 15.000 und 20.000 Bettvolumina (BV) beobachtet, d. h., es wird ein guter Rückhalt für sechswertiges Chrom erreicht.

Aufgrund der guten Ergebnisse für die stark basischen Anionenaustauscher an Standort I wurden ergänzende Versuche zur Regeneration der Materialien durchgeführt. In Becherglasversuchen im Labor wurden zunächst verschiedene Regenerationsmittel verglichen. Aufgrund der Ergebnisse dieser Vorversuche wurde vor Ort eine 1-molare Kochsalzlösung zur Regeneration eingesetzt, die aus einer Vorlage mit einem vergleichsweise hohen Durchsatz von 3 BV/h von oben nach unten, d. h. in derselben Fließrichtung wie bei der Beladung, durch die Filtersäule gefördert wurde. Im großtechnischen Betrieb werden Ionenaustauscher in der Regel im Gegenstrom mit einem geringeren Durchsatz regeneriert. In dem Pilotversuch wurden sehr gute Ergebnisse für die Regeneration erhalten. **Abbildung 4** zeigt die Durchbruchskurven nach verschiedenen Regenerationszyklen: Es sind nur geringe Unterschiede im Rückhaltevermögen des Anionenaustauschermaterials erkennbar; insbesondere ist keine systematische Verkürzung der Laufzeit mit der Anzahl der Regenerationen zu erkennen. Durch eine Bilanzierung konnte gezeigt werden, dass es durch die Regeneration mit 1-molarer Kochsalzlösung gelingt, nahezu das gesamte, auf den Ionenaustauschern abgeschiedene Chrom wieder zu entfernen. Bei den Versuchen zum Rückhalt von sechswertigem Chrom mit drei stark basischen Anionenaustauschern an Standort II erfolgte der Durchbruch mit allen Materialien bereits nach ca. ▶



Quelle: TZW

Abb. 5: Halbtechnische Versuchsanlage zur Untersuchung des RCF-Prozesses



Wir machen aus Messwerten wertvolle Daten

Die Itron smart ready Wasser- und Gaszähler können ohne zusätzlichen Aufwand in innovative Datenerfassungssysteme eingebunden werden. Mit der innovativen Lösung für die mobile Datenerfassung mit Geo-Ortung und Cloud Technologie kombiniert mit der herausragenden Messgenauigkeit der Itron-Zähler sind Sie für die Zukunft gerüstet.



START HERE ▶ Itron.com/de

Besuchen Sie uns vom 28.-30.11.2017
auf der GAT/WAT in Köln
Halle 7, Stand D-042

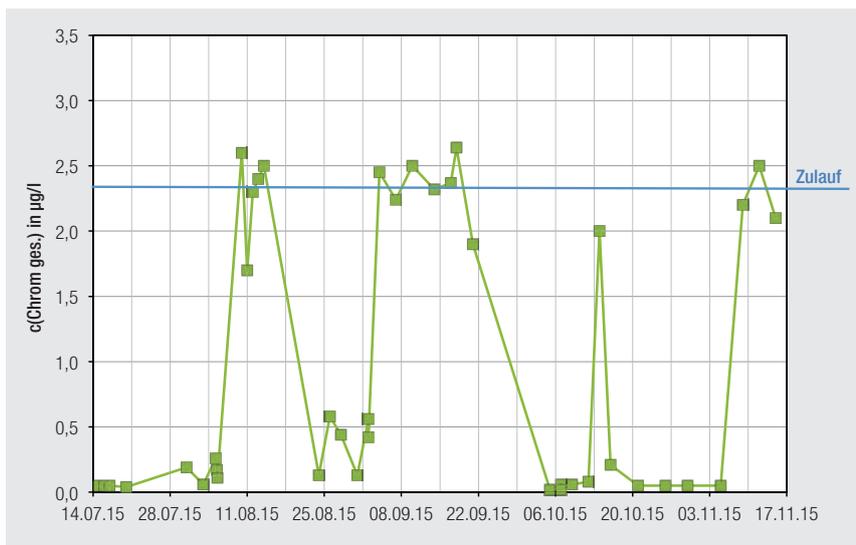


Abb. 6: Ergebnisse der halbtechnischen Versuche zum Chromrückhalt beim RCF-Prozess

5.000 Bettvolumen. Dieser deutlich frühere Durchbruch von Chrom ist auf die unterschiedliche Wasserbeschaffenheit der beiden Rohwässer zurückzuführen. Die höhere Mineralisierung des Wassers am Standort II, d. h. der deutlich höhere Anionengehalt und insbesondere die höhere Konzentration an Sulfat, führt bei der Sorption zu einer verstärkten Konkurrenz und somit zu einer geringen Aufnahmekapazität für Chromat. Die Effektivität und damit letztendlich die Wirtschaftlichkeit des Chromrückhaltes mit stark basischen Anionenaustauschern hängt nach diesen Ergebnissen stark von der vorliegenden Wasserbeschaffenheit ab: Während für gering mineralisierte Wässer in den kleintechnischen Versuchen vergleichsweise lange Filterlaufzeiten erreicht werden konnten, erfolgte bei dem stärker mineralisierten Wasser der Durchbruch rascher.

Kleintechnische Versuche zum Rückhalt von sechswertigem Chrom mittels RCF-Prozess

In der Literatur wird beschrieben, dass die Chromabtrennung im RCF-Prozess durch die Reduktion des im Rohwasser vorliegenden sechswertigen Chroms durch Eisen(II)salze zu dreiwertigem Chrom und die anschließende filtrative Behandlung des Wassers gelingen kann [4–6]. Durch Laborversuche an

einer Flockungsbank konnten diese Ergebnisse bestätigt werden. Daher wurden Versuche im halbtechnischen Maßstab am Standort II durchgeführt. Die Versuchsanlage (Abb. 5) bestand aus einem Plexiglasfilter (Durchmesser 0,3 m), der für die Untersuchungen als Einschichtfilter betrieben wurde. Als Filtermaterial wurde Quarzsand der Körnung 0,71 bis 1,25 mm in einer Schütthöhe von 150 cm eingefüllt; die Freibordhöhe betrug 70 cm. Der Durchsatz war über den gesamten Untersuchungszeitraum auf ca. 450 l/h eingestellt, was einer Filtergeschwindigkeit von 6,5 m/h entspricht. Die Dosierung von Eisen(II)sulfat erfolgte vor einem statischen Mischer unmittelbar vor dem Filtereinlauf. Die Verweilzeit des Wassers im Überstau und somit die Reaktionszeit betrug ca. 6,5 Minuten. Der Filter wurde alle zwei bis drei Tage mit Luft und Wasser gespült. Die Probenahmen wurden stets einen Tag nach der Spülung und unmittelbar vor einer Spülung zum Ende des Filterlaufs durchgeführt.

Die Ergebnisse der halbtechnischen Untersuchungen sind in **Abbildung 6** zusammenfassend dargestellt. Die Daten zeigen, dass ein Chromrückhalt durch den RCF-Prozess prinzipiell möglich ist. Immer wieder gab es Versuchsphasen, in denen im Filterablauf kein Chrom oder nur Spuren an Chrom nachgewiesen werden konn-

ten. Allerdings war es über die gesamte Versuchsdauer von vier Monaten nicht möglich, stabile Betriebszustände zu erreichen; insbesondere die Ausbildung und Abtrennung der Flocken erwiesen sich als schwierig. Ferner fiel an der Versuchsanlage zeitweise die Eisendosierpumpe aus und die verwendete Eisen(II)salz-Lösung war bei den vorliegenden Temperaturen nicht stabil. In weiteren Versuchen wären daher Detailfragen zu Kontaktzeiten oder zum Filteraufbau zu klären. Mit anderen Filterschichtaufbauten (Mehrschichtfilter) oder einem anderen Material könnten voraussichtlich sowohl die Filtergeschwindigkeit als auch die Filterlaufzeit optimiert werden.

Zusammenfassung

Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem DVGW-Forschungsvorhaben hinsichtlich technischer Möglichkeiten zur Entfernung von sechswertigem Chrom bei der Trinkwasseraufbereitung lassen sich in den folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Durch die derzeit in den Wasserwerken vorhandene Aufbereitungstechnik findet in der Regel keine Reduzierung der Gehalte an sechswertigem Chrom statt. Durch eine Enteisung bzw. Entmanganung können die Gehalte an sechswertigem Chrom in Abhängigkeit von den Kontaktzeiten und Redox-Bedingungen deutlich reduziert werden. Ein guter Rückhalt wurde auch bei einer Nanofiltration beobachtet.
- Bei einigen Aufbereitungsverfahren können die Konzentrationen an sechswertigem Chrom ansteigen. Untersuchungen zur Reinheit der Aufbereitungschemikalien zeigen, dass insbesondere eisenhaltige Flockungsmittel wie Eisen(III)chlorid oder Eisen(III)chloridsulfat sowie die auf Kalk basierenden Stoffe Calciumhydroxid, Calciumcarbonat und halbgebrannter Dolomit eine Zunahme der Konzentration an sechswertigem Chrom im aufbereiteten Wasser bewirken können. The-

oretische Betrachtungen zeigen ebenso wie Messungen in Wasserwerken, dass die Konzentrationserhöhungen bei üblichen Zugabemengen der Aufbereitungskemikalien im Bereich von 0,05 bis 0,3 µg/l liegen können.

- Grundsätzlich sind stark basische Anionenaustauscher geeignet, sechswertiges Chrom aus Wasser zu entfernen. Die experimentellen Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass die Aufnahmekapazität der Austauscher sehr stark von der vorliegenden Wasserbeschaffenheit abhängt: So führen höhere Gehalte insbesondere an Sulfat zu einem deutlichen Rückgang der Filterlaufzeit. Die untersuchten, stark basischen Anionenaustauscher ließen sich mit 1-molarer Kochsalzlösung gut regenerieren. Eine merkliche Einbuße der Adsorptionskapazität über die Anzahl der Beladungszyklen ließ sich nicht beobachten. Die Aufarbeitung oder Wiederverwendung der Regenerate, die vergleichsweise hohe Konzentrationen an Chrom und organischen Inhaltstoffen aufweisen, wurde allerdings nicht untersucht.
- Schwach basische Anionenaustauscher sind deutlich schlechter zur Entfernung von Chrom geeignet als stark basische.
- Die Versuche zum RCF-Prozess zeigen, dass – abhängig von der vorliegenden Wasserbeschaffenheit – Chrom über einen Filtrationsprozess mit vorgeschalteter Reduktion durch Eisen(II)salze entfernt werden kann. Die über den gesamten Versuchsbetrieb stark schwankenden Entfernungsraten weisen jedoch darauf hin, dass der Prozess empfindlich auf sich ändernde Betriebsbedingungen reagiert.

- Unabhängig von der gewählten Aufbereitungstechnologie ist vor Beginn der Planung für eine Großanlage in jedem Fall eine Pilotierung im halbertechnischen Maßstab erforderlich. Diese Pilotierung muss im Fall der Anionenaustauscher weitere Untersuchungen zur Standfestigkeit der verschiedenen Ionenaustauschertypen und die Behandlung des Regenerats mit dem Ziel einer Wiederverwendung oder Entsorgung beinhalten. Für den RCF-Prozess müssen halbertechnische Versuche zur Ermittlung der optimalen Prozessbedingungen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Rohwässer und zur Langzeitstabilität des Verfahrens erfolgen. Auch für dieses Verfahren muss vor einer großtechnischen Umsetzung die Entsorgung der chromhaltigen Rückstände geklärt werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der kleintechnischen Versuche Ansatzpunkte zur Entfernung von Chrom bei der Trinkwasseraufbereitung. Die Wirksamkeit der einzelnen Verfahren ist allerdings jeweils stark von der Wasserbeschaffenheit abhängig, was die praktische Umsetzung komplex gestaltet. Vor einer großtechnischen Umsetzung sind noch zahlreiche betriebstechnische Fragen zu beantworten, die im Rahmen von halbertechnischen Pilotversuchen zu klären sind.

Danksagung

Die Autoren danken dem DVGW für die finanzielle Förderung des Projekts und allen an der Durchführung des Projekts beteiligten Kollegen vom TZW, von der Hessenwasser GmbH & Co. KG und von der Oberhessischen

Versorgungsbetriebe Aktiengesellschaft (OVAG) für ihre Unterstützung und ihre konstruktive Mitarbeit. ■

Literatur

- [1] S. Mertineit, B. Raue, A. Thoma, F. Sacher: Studie zur Belastung von Trinkwasser in Deutschland mit Chromat. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W 2/02/11 (2013).
- [2] F. Sacher, A. Thoma: Vorkommen von Chromat in Roh- und Trinkwässern in Deutschland. DVGW energie I wasser-praxis 64, 52-56 (2013).
- [3] A. Allendorf, O. Huschens, B. Post, A. Weygand, M. Riegel, V. Schlitt, F. Sacher: Untersuchungen zum Vorkommen von sechswertigem Chrom und seiner Entfernung bei der Trinkwasseraufbereitung. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W 4/02/13 (2016).
- [4] G. Qin, M. J. McGuire, N. K. Blute, C. Seidel, L. Fong: Hexavalent chromium removal by reduction with ferrous sulfate, coagulation, and filtration: a pilot-scale study. Environ. Sci. Technol. 39(16), 6321-6327 (2005).
- [5] M. J. McGuire, N. K. Blute, C. Seidel, G. Qin, L. Fong: Pilot-scale studies of hexavalent chromium removal from drinking water. J. American Water Works Association 98(2), 134-143 (2006).
- [6] L. S. McNeill, J. E. McLean, J. L. Parks, M. A. Edwards: Hexavalent chromium review, part 2: Chemistry, occurrence, and treatment. J. American Water Works Association 104(7), E395-E405 (2012).
- [7] G. Ostendorf: Vorkommen von sechswertigem Chrom im schleswig-holsteinischen Trinkwasser. gwf Wasser Abwasser 156(9), 884-887 (2015).
- [8] P. Brandhuber, M. Frey, M. J. McGuire, P. Chao, C. Seidel, G. Amy, J. Yoon, L. McNeill, K. Banerjee: Low-level hexavalent chromium treatment options: Bench-scale evaluation. Abschlussbericht zu einem Forschungsvorhaben der American Water Works Association Research Foundation (2004).

Die Autoren

Dr. Frank Sacher ist Leiter der Abteilung Technologie und Wirtschaftlichkeit im TZW.

Dr. Marcel Riegel und **Volker Schlitt** sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung Technologie und Wirtschaftlichkeit im TZW.

Kontakt:

Dr. Frank Sacher
TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser
Karlsruher Str. 84
76139 Karlsruhe
Tel.: 0721 9678-120
E-Mail: frank.sacher@tzw.de
Internet: www.tzw.de

Warum Michell?

gat 2017
Köln 28.-30.11.
Halle 7, Stand C-012

Weil wir die Spezialisten für Taupunkt, Relative Feuchte und Sauerstoff sind!

www.michell.de

 **MICHELL**
Instruments