

Chemie und Wasser: Herausforderungen und Lösungen in einer sich wandelnden Welt

Ergebnisse des 6. Chemical Sciences
and Society Symposiums (CS3)

Leipzig · September 2015





Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
Varrentrappstraße 40 – 42
60486 Frankfurt am Main
www.gdch.de
Geschäftsführer: Professor Dr. Wolfram Koch

Kontakt:

Dr. Hans-Georg Weinig, Abteilungsleiter Bildung, Karriere & Wissenschaft
h.weinig@gdch.de

März 2016 englische Originalversion / deutsche Fassung November 2016

Inhalt

1	Über das Chemical Sciences and Society Symposium (CS3)	4
2	Zusammenfassung	5
3	Einführung	9
4	Wasser, Gesundheit und Umwelt	12
	4.1 Der Status Quo	12
	4.2 Die bevorstehenden Herausforderungen	12
	4.3 Warum wird Chemie benötigt?	14
5	Detektion von Schadstoffen	16
	5.1 Der Status Quo	16
	5.2 Die bevorstehenden Herausforderungen	16
	5.3 Warum wird Chemie benötigt?	17
6	Wasser- und Abwasserbehandlung	20
	6.1 Der Status Quo	20
	6.2 Die bevorstehenden Herausforderungen	21
	6.3 Warum wird Chemie benötigt?	24
7	Rückgewinnung von Ressourcen	25
	7.1 Der Status Quo	26
	7.2 Die bevorstehenden Herausforderungen	26
	7.3 Warum wird Chemie benötigt?	27
8	Ausblick	31
9	Literaturhinweise	32
10	CS3-Teilnehmer 2015	33

Fallstudien

Deutschland: Wiederherstellung einer Flusslandschaft	15
China: Vollständig kontrollierter Wasserkreislauf	22
USA: Trinkwasser-Produktion	23
UK: Vereinfachung des Stickstoff-Kreislaufs	29
Japan: Rohstoffquelle Klärschlamm	30

1 Über das Chemical Sciences and Society Symposium (CS3)

Die CS3-Initiative ist eine Zusammenarbeit zwischen der Chinesischen Chemischen Gesellschaft (CCS), der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), der Chemischen Gesellschaft Japans (CSJ), der Royal Society of Chemistry (RSC) und der American Chemical Society (ACS). Die Serie der Symposien wird unterstützt von der Nationalen Forschungsförderung Chinas (NSFC), der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Japans Agentur für Wissenschaft und Technik (JST), dem Forschungsrat für Ingenieurs- und physikalische Wissenschaften im Vereinigten Königreich (EPSRC), und der Nationalen Forschungsförderung der USA (NSF).

Chemie und Wasser: Herausforderungen und Lösungen in einer sich wandelnden Welt fasst die Ergebnisse des 6. Chemical Sciences and Society Symposiums (CS3) zusammen, das vom 14.–18. September 2015 in Leipzig stattfand und die folgenden Themenbereiche behandelte: Wasser, Gesundheit, Umwelt; Detektion von Schadstoffen; Wasseraufbereitung; Rückgewinnung von Ressourcen.

Führende WasserchemikerInnen und -Ingenieure aus China, Deutschland, Japan, dem Vereinigten Königreich und den Vereinigten Staaten versammelten sich in Leipzig, um bedeutende wissenschaftliche und technologische Herausforderungen an die For-

schung zu identifizieren, die bewältigt werden müssen, um die Wasserchemie in einer Weise voranzubringen, die den gesellschaftlichen Bedürfnissen für eine nachhaltige Entwicklung am besten entgegenkommt.

Der Wissenschaftsautor Michael Groß erstellte dieses Weißbuch in Abstimmung mit der Gesellschaft Deutscher Chemiker und mit Hinweisen von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Veranstaltung.



2 Zusammenfassung

Wasser bereitzustellen für eine Weltbevölkerung, die weiterhin wächst und gleichzeitig städtischer, wohlhabender und langlebiger wird, ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Der Klimawandel beeinflusst die Wasserkreisläufe rund um den Globus und kann zu katastrophalen Dürren ebenso beitragen wie zu massiven Überschwemmungen und somit die Probleme rund um die Wasserversorgung verschärfen. Die Chemie kann helfen, diese Herausforderungen zu bewältigen, indem sie Innovationen im Bereich der Wasseranalytik, der Aufbereitung, und der Rückgewinnung von Rohstoffen zur Verfügung stellt, die wertvolle Beiträge zur Verbesserung der nachhaltigen Nutzung von Wasser und der globalen Versorgungssicherheit leisten können.

Beim 6. Chemical Sciences and Society Symposium (CS3) versammelten sich knapp 40 Fachleute aus China, Deutschland, Großbritannien, Japan und den USA und diskutierten diese Probleme in Bezug auf vier Kerngebiete: Wasser, Gesundheit und Umwelt; Detektion von Schadstoffen; Wasseraufbereitung; Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser.

Wasser, Gesundheit und Umwelt sind überlebenswichtig, angefangen auf lokaler Ebene bis hin zu globalen Zusammenhängen mit ihren jeweiligen Problemen. Diese sind eng miteinander verknüpft, was in dem englischen Slogan „one water, one environment, one health“ zum Ausdruck kommt. Nachhaltige Nutzung von Wasser-Ressourcen, tiefgreifendes Verständnis der relevanten natürlichen Prozesse, sowie deren Handhabung mit geringstmöglichem Einsatz von Chemikalien – dies sind die Voraussetzungen für den Schutz der menschlichen Gesundheit und einer gesunden Umwelt.

Umweltbelastungen aus landwirtschaftlichen, städtischen und industriellen Quellen bedrohen die Versorgungssicherheit mit Trinkwasser. Pharma-Wirkstoffe und Chemikalien aus Verbrauchsgütern, die sich im Wasserkreislauf wiederfinden, bereiten zunehmend Probleme, und insbesondere die Verschmutzung mit Pestiziden und Industrie-Chemikalien bleibt weiterhin eine bedeutende Gefahr. Nanopartikel und

Mikroplastik sind in den vergangenen Jahren als neuartige Belastung der Umwelt hinzugekommen. Pathogene Mikroben und Viren bedrohen vor allem in den tropischen Entwicklungsländern die Gesundheit der Bevölkerung, aber die möglichen Gefahren, die von ihnen ausgehen, müssen überall und immer mit in Betracht gezogen werden. Veränderungen im globalen Maßstab wie der Klimawandel, die Veränderung der Landnutzung, sowie Wachstum, Migration und demographischer Wandel der Bevölkerung verschärfen ebenfalls die Herausforderungen auf diesem Gebiet.

Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert neues Denken, das Forschungsdisziplinen und Wirtschaftsbranchen übergreifend vereint, sowohl bei der Reaktion auf akute Krisen als auch bei der langfristigen Planung. Chemisches Verständnis und Analytik müssen im Zusammenhang mit der medizinischen Versorgung, dem Verstehen sozialer Zusammenhänge und dem Umwelt-Management rund um Wasser, Gesundheit und die Umwelt zum Einsatz kommen. Ein besseres Verständnis der natürlichen Abbauprozesse für Schadstoffe in der Umwelt ist erforderlich, sowohl auf dem Niveau der Gewässersysteme, als auch bei möglichen Aufbereitungsstrategien, da natürliche Prozesse vergleichsweise energieeffizient sind. In den Gewässersystemen ist es bisher nur unzureichend verstanden, in welchen

Bereichen unter welchen Bedingungen Schadstoffe am wirksamsten umgesetzt werden („hot spots“ und „hot moments“). Bei der Aufbereitung wird gerade erst damit begonnen, die nützlichen Effekte des natürlichen Abbaus auszunutzen. Impulse aus verschiedenen Richtungen – darunter innovative analytische Chemie, bioanalytisches Hochdurchsatz-Screening, sowie computergestützte Verfahren, um unser Verständnis von Prozessen zu fördern und das Design von besser abbaubaren Wirkstoffen zu ermöglichen, sowie „grüne Chemie“, um umweltschädliche Lösungsmittel von vornherein zu vermeiden – können bei der Überwindung dieser Herausforderungen eine wichtige Rolle spielen.

Detektion von Schadstoffen ist eine unabdingbare Grundlage einer jeden nachhaltigen Wasserwirtschaft. Sie erfordert sowohl robuste und einfache als auch komplexe und hochmoderne analytische Methoden. Um die Wasserversorgung nachhaltig bewirtschaften zu können, müssen wir verstehen welche Schadstoffe ein Risiko darstellen und was die Analytik detektieren sollte.

Die Schadstoff-Detektion beinhaltet sowohl die Überwachung bekannter Problemstoffe, als auch den Blick auf neu auftauchende Stoffe. Einerseits müssen sich analytische Methoden an den Erfordernissen der nationalen und internationalen Richtlinien orientieren, etwa der Wasserrahmenrichtlinie der EU von 2000. Andererseits sind Anstrengungen für die Entwicklung von innovativen analytischen Hilfsmitteln nötig, um Wasserbelastungen zu erkennen, die bisher übersehen wurden, etwa durch neue Verunreinigungen wie Umwandlungsprodukte von Wirkstoffen, Nanopartikel und Mikroplastik.

Die Entwicklung neuer Detektionsmethoden muss die wachsende Vielfalt von Substanzen berücksichtigen, die aus natürlichen und anthropogenen Prozessen entstehen. Der Schwerpunkt sollte darauf gelegt werden, eine Wasserqualität zu garantieren, die für die gewünschte Verwendung angemessen ist („fit for purpose“). Dafür ist ein Repertoire verschiedener Analyseverfahren erforderlich, zu dem sowohl

spezifische Detektionsmethoden als auch weiter entwickelte Screeningmethoden gehören.

Entlang des gesamten analytischen Prozesses, von der Probennahme bis zum gemessenen Endpunkt, muss eine Standardisierung sowohl der chemischen Analysenmethoden als auch der Bioassays erreicht werden, um die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Eine wichtige Forschungslücke betrifft die harmonisierte Vorgehensweise anhand von Validierungskriterien für die Identifizierung von Umwandlungsprodukten sowie für das Screening noch unbekannter oder nur vermuteter Stoffe.

Im Idealfall sollte die Notwendigkeit, industriell produzierte Chemikalien im Abwasser nachzuweisen, bereits bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden, im Rahmen eines gesamtheitlichen Ansatzes, welcher den gesamten Lebenszyklus einer Substanz abdeckt.

Chemikaliengemische stellen eine besondere Herausforderung für die Risikobewertung dar. Gegenwärtige Gefahreneinstufungen berücksichtigen Chemikalien lediglich einzeln. In Wirklichkeit sind wir jedoch mit Tausenden, vielleicht sogar Millionen von Chemikalien konfrontiert, welche zu Mischungseffekten beitragen können, selbst wenn ihre einzelnen Konzentrationen zu klein sind, um einen Nachweis zu ermöglichen. Deshalb müssen wir nicht nur verstehen lernen, wie Chemikalien in solchen Gemischen zusammenwirken können, sondern auch Detektionsmethoden entwickeln, die diesen Mischungseffekten Rechnung tragen.

Bioanalytische Techniken, wie etwa zellbasierte Bioassays, ermöglichen Bestimmungen der Auswirkungen der Gesamtbelastung an Chemikalien, und sie ergänzen die auf konkrete Verbindungen zielenden chemischen Analysen. Toxizitätstests auf molekularer Ebene (Ökotoxikogenomik) können das Screening erleichtern. Zusätzlich eröffnen neue Entwicklungen in der hochauflösenden Massenspektrometrie neue Möglichkeiten, den Blickwinkel

zu erweitern und auch Substanzgemische mit bisher unbekanntem Mikroverunreinigungen und deren Umwandlungsprodukten zu erfassen. Diese breit angelegte Vorgehensweise könnte ein wirkungsvolles Hilfsmittel für eine umfassende chemische Bewertung darstellen, welche dann für die Evaluierung von Aufbereitungstechnologien und für die Schadstoffüberwachung eingesetzt werden sollte.

Die Wasseranalytik benötigt die gezielte Entwicklung von kombinierten Methoden (wie GC-MS, LC-MS) für die Anwendung in der Umweltforschung. Zum Beispiel kann verbindungs-spezifische Isotopenanalyse durch GC- oder LC-IRMS Isotopenverhältnisse als Beweis für die Umwandlung von Verunreinigungen ermitteln, wenn andere Methoden versagen (z. B. auf der Ebene der Gewässersysteme oder in komplexen technischen Anlagen). Andererseits sollte für Routineanwendungen die Entwicklung schneller, kostengünstigerer und leichter zu verwendender Detektionsmethoden und -instrumente, insbesondere für nicht-spezialisierte Nutzer vor Ort, eine Priorität sein.

Die Wasseranalytik benötigt außerdem bessere Datenbanken und eine umfassendere Datenverwaltung und -auswertung, was auch das Teilen von analytischen Daten und computergestützte Auswertungen einschließt. Die nationenübergreifende Umsetzung dieser Ziele ist eine große Herausforderung.

Die **Wasser- und Abwasserbehandlung** hat im 20. Jahrhundert bemerkenswerte Erfolge verzeichnet, indem sie zunehmende Abwasserströme bewältigte und zu einer erheblichen Verbesserung der Wasserqualität vor allem in industrialisierten Ländern beigetragen hat. Damit sie auch die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts bewältigen kann, müssen Forschung und Entwicklung weiter vorangetrieben werden, und zwar sowohl bei den Grundlagen (Materialien, zum Beispiel Membranen, veränderte Mikroorganismen, Sorbentien, Katalysatoren), im Übergangsbereich (Technologietransfer, Scale-up) und bei Großanlagen (Prozesse, Reaktoren), um die Produktion von größeren Mengen an sicherem und gesundem Wasser zu ermöglichen.

Die Erfordernisse reichen von fortgeschrittenen Wasseraufbereitungssystemen, die mit komplexen Abwasserströmen zurechtkommen, bis hin zu grundlegenden, kostengünstigeren Systemen, die in Entwicklungsländern die Wasserversorgung sicherstellen könnten. Die Technologie der Wasser-Infrastruktur sollte insgesamt flexibler werden, um sich den lokalen Bedürfnissen und Gegebenheiten anpassen zu können. So können zum Beispiel sowohl Zu- als auch Abnahmen der Bevölkerungsdichte die etablierte Wasser-Infrastruktur in Schwierigkeiten bringen.

Zu den wichtigen Aufgaben auf diesem Gebiet gehören die Entwicklung von kostengünstigeren und energieeffizienteren Technologien (Katalysatoren, Sorptionsmittel), Investitionsmittel für das Scale-up von Methoden, die aus der Grundlagenforschung hervorgehen, sowie ein umfassendes Verständnis der Wassersysteme einschließlich des Schutzes der Wasserressourcen, flexibler und minimaler Einsatz von Chemikalien nach Bedarf, sowie die Anpassung der Wasseraufbereitung an den Standard, der für die beabsichtigte Nutzung benötigt wird.

Die Herausforderungen bei der Finanzierung von neuen Wasseraufbereitungsprojekten und -technologien im Grenzbereich zwischen öffentlicher Infrastruktur und der Industrie müssen in Angriff genommen werden.

Während sich rasch entwickelnde Wirtschaftsgebiete wie China die Chance haben, beim Neubau von Wasser-Infrastruktur auch neue Technologien und Vorgehensweisen zum Einsatz zu bringen, werden die etablierten Abwasseraufbereitungsmethoden, wie sie in der industrialisierten Welt in großem Umfang und erfolgreich eingesetzt werden, aus Angst vor etwaigen Risiken meist bevorzugt. Diese konservative Haltung stellt ein Hindernis für die notwendige Einführung neuer Technologien und Vorgehensweisen dar.

Pilot- und Demonstrationsanlagen sollten auf allen Ebenen der Erprobung neuer Technologien einge-

richtet werden. Kumulierte, risiko-basierte Reinheitskriterien müssen definiert werden, mit denen die Wasserqualität auf der Grundlage von potentiellen zu reduzierenden negativen Effekten beurteilt werden kann.

Die Aufbereitung von Abwasser befindet sich im Übergang von der traditionellen Handhabung als reine Notwendigkeit für den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt hin zu einer Chance für die **Rückgewinnung** von Ressourcen. Zu den Ressourcen, die zurückgewonnen werden können, zählen etwa die Energie (aus Kohlenstoff, Stickstoff, sowie Wärme) eine ganze Reihe von Metallen (etwa Gold, Lithium), Pflanzennährstoffe wie Phosphat und Stickstoffverbindungen, andere Salze und Chemikalien ebenso wie – trivial, aber wichtig – Wasser von einem gewünschten Reinheitsgrad. Ein stärkeres Hervorheben dieser Chancen kann mithelfen, weitere Anreize für die Wasseraufbereitung zu liefern und diese für Investoren attraktiv zu machen.

Um den Schritt von der Last der Aufreinigung zur Chance der Rohstoffgewinnung zu machen, ist die Implementierung des Rückgewinnungskonzepts auf allen Ebenen erforderlich, von der Grundlagenforschung bis hin zu seiner Umsetzung in der Praxis.

Obwohl in einigen wichtigen Bereichen bereits deutliche Fortschritte gemacht wurden, haben die CS3-Teilnehmer spezielle Technologien und Fähigkeiten identifiziert, welche die Forschung und Ent-

wicklung auf diesem Gebiet in Angriff nehmen muss. Dazu gehören: Technologien zur Erzeugung und Entnahme von Energie aus Bestandteilen des Abwassers; neue chemische Methoden zur Charakterisierung und Überwachung der Zusammensetzung und Variabilität von Bestandteilen in den Rohmaterialien von Rückgewinnungsanlagen; Methoden für eine a-priori-Bewertung der Energieausbeute und des Potenzials zur Verwendung als Rohmaterial. Darüber hinaus spielt die Weiterentwicklung von Technologien zur Erleichterung der hocheffizienten Rückgewinnung und Wiederverwertung von Nährstoffen und Metallen (anstelle lediglich ihrer Abscheidung aus dem Abwasserstrom) eine wichtige Rolle.

Um das übergreifende Ziel der zweckmäßigen, nachhaltigen und der Gesundheit von Menschen und Umwelt dienlichen Wasserversorgung zu erreichen, müssen die Probleme der Detektion, Aufbereitung und Rückgewinnung im Abwasserbereich gemeinsam angegangen werden. Dabei sind die Quellen der Verschmutzung im industriellen, landwirtschaftlichen und Haushaltsbereich zu berücksichtigen, ebenso wie die nachfolgende Weiterverwertung der zurückgewonnenen Rohstoffe. Einige vielversprechende Beispiele werden in diesem White Paper in Fallstudien vorgestellt. Die weitere Umsetzung dieser Chancen erfordert eine strategische, langfristige, internationale Zusammenarbeit, die sich auf die Grundlagenforschung aller beteiligter Disziplinen stützt, vor allem auch auf die der Ingenieurwissenschaften und der Chemie.

3 Einführung

Wasser ist eine unabdingbare Voraussetzung für das Leben auf unserem Planeten. Das Überleben der Menschen ist ebenso wie das aller anderen terrestrischen Arten vom regelmäßigen Zugang zu sauberem Wasser abhängig. Während 71% der Erdoberfläche von Ozeanen bedeckt sind, umfassen die Süßwasser-Reserven in Grundwasserleitern, Flüssen und Seen lediglich 3% der gesamten Wassermenge auf unserem Planeten. Das gesamte Wasser auf der Erde ließe sich in einem Kugelvolumen von nur 1391 km Durchmesser unterbringen. Der entsprechende Süßwassertropfen würde 203 km im Durchmesser ausmachen.¹

Süßwasser ist, zum Glück, eine erneuerbare Ressource, da der Wasserkreislauf es immer wieder nachliefert. Allerdings liefert der natürliche Kreislauf das Wasser nicht unbedingt dort ab, wo es gerade benötigt wird. Deshalb ist Trinkwasser von akzeptabler Qualität an vielen Orten der Welt knapp.

Die Weltbevölkerung ist seit der Industriellen Revolution exponentiell angewachsen und hat inzwischen einen Stand erreicht, der nach Ansicht mancher Experten bereits an die Grenzen der Kapazität unseres Planeten stößt.² Auch Wasser ist in vielen Regionen zu einer Schlüsselressource geworden, deren begrenzte Verfügbarkeit die Überlebensfähigkeit von menschlichen Gemeinschaften und ihren Wirtschaftssystemen einschränkt. Die globale Nachfrage nach Trinkwasser hat mit der Ausbreitung der Industrialisierung und dem damit verbundenen Lebensstandard zugenommen. Obwohl in den meisten Industrieländern der Wasserverbrauch pro Kopf inzwischen stagniert oder sogar zurückgeht, sind das Bevölkerungswachstum und die Verstädterung insbesondere in den Entwicklungsländern weiter fortgeschritten, ohne die Grenzen der örtlichen Wasserversorgung und Infrastruktur zu berücksichtigen. Probleme der Wasserversorgung sind somit nicht gleichmäßig auf der Welt verteilt sondern treten auf lokaler bzw. regionaler Ebene auf. Dieser Trend wird sich den Prognosen nach voraussichtlich fortsetzen und noch in diesem Jahrhundert weitreichende Wasserknappheit verursachen.

Weitere Herausforderungen gehen auf die Umweltverschmutzung zurück, die bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts viele Wasserläufe für die Nutzung durch Mensch und Tier unbrauchbar gemacht hat. Seitdem haben Kläranlagen und die Renaturierung von Flüssen, die in der Vergangenheit als Ablauf für städtische und industrielle Abwässer gedient hatten, wie etwa Emscher und Rhein in Deutschland, die Situation deutlich verbessert. Diese Trendumkehr hat sich allerdings noch nicht global durchgesetzt. Zusätzlich bringen neuartige Chemikalien und Materialien, darunter bioaktive Substanzen, Mikroorganismen mit Antibiotika-Resistenzen, und Plastik-Mikropartikel neue Herausforderungen.

Der Klimawandel beeinträchtigt bereits in vielen Gegenden der Welt den natürlichen Wasserkreislauf. Schwere Dürreperioden, die in jüngster Zeit Kalifornien, Australien sowie Teile von China und Afrika heimgesucht haben, sind nur einige Beispiele für die Wasserknappheit, die schon bald auch viele andere Gegenden betreffen wird. In anderen Regionen kann auch das entgegengesetzte Problem auftreten, wenn erhöhte Wassertemperaturen in den Ozeanen die Häufigkeit von Unwettern erhöhen und somit zu Überschwemmungen führen. Dies wurde zum Beispiel im Herbst 2015 in Südfrankreich beobachtet. In solchen Fällen ist die existierende Infrastruktur oft unzureichend, um mit den unerwarteten Veränderungen der Niederschlagsmengen – in der einen oder der anderen Richtung – zurechtzukommen.

Die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten erhöhen vermutlich auch die Wahrscheinlichkeit von extrem starken El-Niño-Ereignissen. Der gegenwärtige El Niño (2015-1016) gilt bereits als mindestens so stark wie der bisherige Rekordhalter von 1997-98. Diese Temperatur-Anomalie im äquatorialen Bereich des Pazifiks beeinflusst Niederschläge rund um den Globus. Der jüngste El Niño hat bereits zu Dürre und Waldbränden in Indonesien geführt. Trockenheit wird auch Indien, Vietnam, Australien, Südafrika und Teile von Chile betreffen. Ernteausfälle in Südasiens können zu erheblichen humanitären Krisen führen, vergleichbar mit der Dürre in der Sahel-Region in Ostafrika in den 1990er Jahren.³

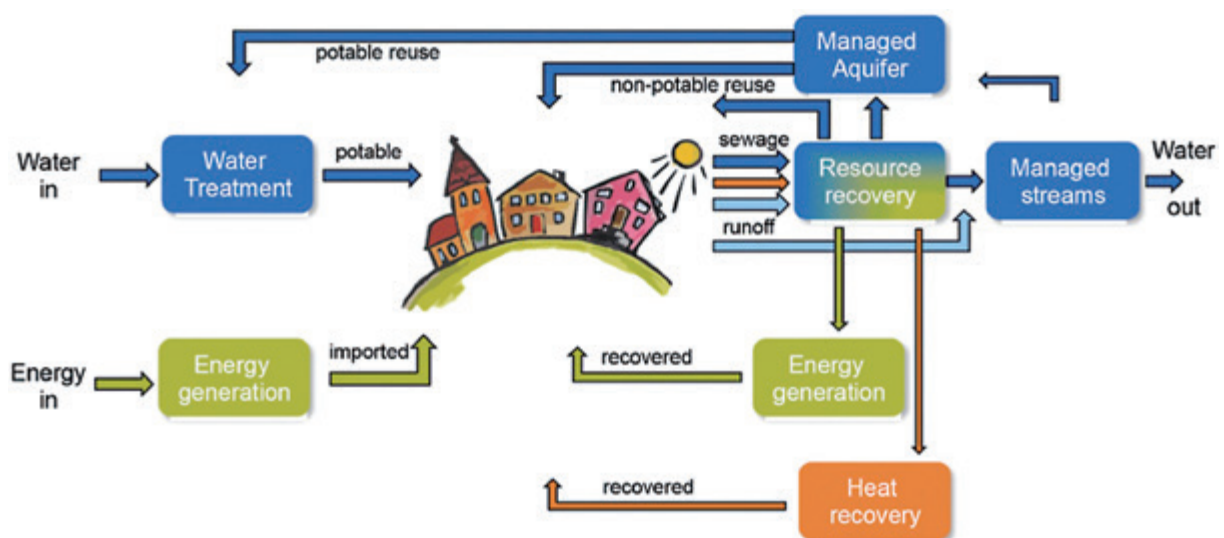
In dem Bestreben, Wasser-Ressourcen für ihren eigenen Bedarf zu sichern, geraten Bewohner der betroffenen Regionen oft in Konflikt mit anderen Gruppen und können überdies erhebliche Schäden an natürlichen Ökosystemen verursachen. So durchqueren die Flüsse Euphrat und Tigris im legendären Zweistromland des Nahen Ostens mehrere Länder. Staudammprojekte, die in der Türkei geplant werden, können die Wasserversorgung im Irak gefährden und somit diese bereits von politischen und militärischen Auseinandersetzungen erschütterte Region weiter destabilisieren.

Eine Herausforderung für die kommenden Jahrzehnte liegt darin, immer größere Mengen an Trinkwasser

bereitzustellen, die von einer wachsenden Bevölkerung benötigt werden – und das angesichts zunehmender Störungen durch Klimawandel, Konflikte und andere anthropogene Beeinträchtigungen der natürlichen Kreisläufe. Eine weitere Herausforderung ist die Sicherstellung der Qualität des Trinkwassers, vor allem durch Verringerung und Beseitigung von Verschmutzung und Versalzung. Die dritte Herausforderung ist es, Energie und wertvolle Chemikalien aus bereits benutzten Wasser-Ressourcen (unter anderem auch aus geschlossenen und halb geschlossenen Wasserkreisläufen) zurückzugewinnen und eine sozial und wirtschaftlich vertretbare Versorgung mit Wasser für unterschiedliche Bedürfnisse bereitzustellen.

Die städtische Infrastruktur muss so entworfen und verbessert werden, dass sie einen nachhaltig nutzbaren städtischen Wasserkreislauf ermöglicht, der Kläranlagen, natürliche Quellen und eine zuverlässige Trinkwasserversorgung miteinander verbindet und die Bewältigung der genannten Herausforderungen ermöglicht (Abbildung).

Die Chemie kann wertvolle Beiträge dazu leisten, diese Herausforderungen zu bewältigen und Probleme zu reduzieren. Sie kann neue und verbesserte Lösungen bei Wasser-Verbrauch, -Qualität und -Wiederverwendung anbieten, etwa durch die Entwicklung von neuen Methoden zur Entsalzung



von Brack- und Meerwasser und durch die modernsten Methoden zur Reinigung von benutztem Wasser. Weiterhin sind Fortschritte bei der Analyse und Detektion von Schadstoffen mit einer Empfindlichkeit möglich, die zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt beitragen können. Neue physikochemische und biochemische Prozesse können die nachhaltige Wiederverwendung von Wasser ermöglichen und die Rückgewinnung von Energie und wertvollen Chemikalien aus genutztem Wasser erleichtern.

Verglichen mit der Situation im 20. Jahrhundert wertet die Rolle der Chemie sich nun aus, da die Lösung der Wasser-Probleme immer öfter eine multi-disziplinäre Vorgehensweise erfordert, die auf den chemischen Grundlagen aufbaut. Ein Beispiel hierfür ist die Abwasserbehandlung, die traditionell auf biologischen Verfahren beruhte. Jetzt werden allerdings immer öfter chemische Lösungsansätze erforderlich, um die Rückgewinnung von Wertstoffen in das zeitgemäße Design von Kläranlagen zu integrieren.

Auf diese Weise kann die Chemie als Forschungsdisziplin mithelfen, eine sichere Versorgung mit sauberem Wasser zu gewährleisten (Versorgungssicherheit⁵).

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die am 6. Chemical Sciences and Society Symposium (CS3) im September 2015 in Leipzig teilnahmen, diskutierten diese Themen und konzentrierten sich dabei auf vier Kerngebiete:

- 1) Wasser, Gesundheit und Umwelt
- 2) Detektion von Schadstoffen;
- 3) Wasser- und Abwasserbehandlung;
- 4) Rückgewinnung von Ressourcen

Dieses Weißbuch fasst die im Rahmen des Symposiums geführten Diskussionen zusammen und gibt Empfehlungen für Verbesserungen in Forschung und Politik, die einen nachhaltigen Umgang mit Wasserressourcen ermöglichen können.

4 Wasser, Gesundheit und Umwelt

Wasser und die Gesundheit von Mensch und Umwelt sind von Natur aus miteinander verbunden. In einer Welt mit zunehmender Ressourcenknappheit kann diese wechselseitige Abhängigkeit mit dem englischen Slogan „one water, one health, one environment“ zusammengefasst werden – Wasser, Gesundheit und Umwelt sind als eine Einheit zu sehen, die es global zu schützen gilt. Um in der Zukunft eine ideale, nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen zu erreichen und die menschliche Gesundheit ebenso wie eine gesunde Umwelt zu schützen, ist nach Ansicht der Symposiumsteilnehmer ein tiefgreifendes Verständnis der natürlichen Prozesse des Schadstoffabbaus nötig. Erst dann können die natürlichen Prozesse in Kombination mit einer angemessenen Anwendung chemischer Methoden optimal genutzt werden.

4.1 Der Status Quo

Gegenwärtig erleben mehr als 40% der Weltbevölkerung Wasserknappheit. Dazu gehört ein Fünftel der Menschheit, das in Gegenden mit physikalischer Wasserknappheit lebt, also mit dem Fehlen hinreichender Wasserressourcen. Ein weiteres Viertel ist ökonomisch bedingter Wasserknappheit ausgesetzt, lebt also in Ländern, denen die Infrastruktur fehlt, um die vorhandenen Wasserressourcen angemessen zu nutzen.

Klimawandel und Entwaldung können die natürliche Wasserversorgung auch in Gegenden gefährden, die früher nicht für Dürre anfällig waren. Ungewöhnliche Dürreperioden haben in jüngster Zeit zum Beispiel Kalifornien heimgesucht und sollen auch zu der Entstehung des Bürgerkriegs in Syrien beigetragen haben.

Ein Mangel an Wasserversorgung, Sanitäreinrichtungen und Hygiene kann erhebliche Schäden an Gesundheit und Wohlbefinden der Bevölkerung anrichten und verursacht erhebliche finanzielle Kosten, unter anderem durch den signifikanten Verlust an Wirtschaftsaktivität. Im Jahr 2014 hatten 750 Millionen Menschen keinen Zugang zu unbedenklichem Trinkwasser. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) von 2015 sterben immer noch eine halbe Million Menschen pro Jahr

an Durchfallerkrankungen, die von verunreinigtem Wasser verursacht werden.

Natürliche Ökosysteme leiden ebenfalls unter einem Rückgang der Verfügbarkeit und der Qualität von Wasser, vor allem aufgrund von anthropogenen Veränderungen von Wasserläufen, Verschmutzung und Überbeanspruchung. Ganze Seen sind schon vertrocknet, was zum Verlust von Lebensräumen für zahlreiche Arten führte, und verschiedene Ökosystem-Dienstleistungen sind ebenfalls in bedroht.

Die von der UNO erstellten Nachhaltigkeitsziele für die Zeit ab 2015 (Sustainable Development Goals, SDG) ersetzen nun die Millennium Development Goals (MDG) aus dem Jahr 1990 und weiten die Wasser-Agenda dahingehend aus, dass diese jetzt auch die Industrieländer umfasst und Ziele wie den Schutz von Ökosystemen, Begrenzung der Umweltverschmutzung und rasche Reaktion auf Gefahren durch Wasser einschließen.

4.2 Die bevorstehenden Herausforderungen

Im Jahr 2050 wird die Welt Wasser, Nahrung und Energie für neun bis zehn Milliarden Menschen zur Verfügung stellen müssen.⁶ Dies gilt zwar als prinzipiell machbar, erfordert aber einen Schub für Innovation und globale Zusammenarbeit.

Globale Veränderungen wie Klimawandel, Veränderung der Landnutzung, Globalisierung des Handels, sowie Wachstum, Migration und demographische Verschiebungen der Bevölkerung verschärfen die Herausforderungen auf diesem Gebiet auch auf lokaler Ebene. Das Fehlen einer internationalen Steuerung für Probleme auf dem Gebiet der Wasserversorgung behindert strategische Aktionen und mögliche Schadensbegrenzungen.⁷

Wasser ist an manchen Orten im Überfluss vorhanden, an vielen anderen hingegen knapp, was Großprojekte zum Transfer von Wasser motiviert. Diese können örtliche Versorgungsprobleme lösen, aber auch unbeabsichtigte Auswirkungen haben (wie etwa am Colorado in den USA).

Zu den Gefahren für die zuverlässige und sichere Versorgung mit Trinkwasser gehören Verunreinigungen aus geologischen, landwirtschaftlichen, städtischen und industriellen Quellen.

Pharma-Wirkstoffe, Industrie-Chemikalien und Chemikalien aus Konsumprodukten stehen zunehmend im Fokus, da sie der Detektion entgehen und durch bisherige Aufbereitungsmethoden schlecht zu eliminieren sind sowie unter Umständen schädliche Effekte auf die Gesundheit von Mensch und Umwelt ausüben können. Dies wurde zum Beispiel für einige Hormone und endokrine Disruptoren (EDCs für englisch *endocrine disrupting chemicals*) nachgewiesen. EDCs sind ein Problem, da sie bereits im Nanogramm-pro-Liter Bereich⁸ subtile Auswirkungen auf Ökosysteme zeigen können und außerdem in Mischungen bei sehr geringen Konzentrationen zusammenwirken können, selbst wenn die einzelnen Substanzen zu verdünnt sind, um nachweisbar zu sein.

Auch andere Chemikalien werden als besorgniserregend wahrgenommen, da es Belege für Auswirkungen in Gewässern gibt. Zur Bewältigung dieser Herausforderung sind verknüpfte Toxizitäts-Screenings, verbesserte Risikoabschätzungen sowie ein besseres Verständnis der Gesamt-Belastung durch Gemein-

sche notwendig. Obwohl bereits viel Forschung in dieser Richtung zum Beispiel in Großbritannien, in den USA und in von der EU geförderten internationalen Programmen stattfindet, sind verstärkte Anstrengungen nötig, insbesondere in den Bereichen der kumulativen Belastung, endokrinen Schädwirkungen bei geringer Konzentration und der Bewertung der Auswirkungen von Chemikaliengemischen auf empfindliche Populationen bzw. Stadien im Lebenszyklus.

Pestizide und Industrie-Chemikalien bleiben bedeutende Risiken auf globaler Ebene, ebenso wie Nitrat aus überwiegend landwirtschaftlichen Aktivitäten sowie Arsen und Fluorid aus geologischen Quellen. Gleichzeitig sind die Orte und die Bedingungen, an bzw. unter denen Konzentrationen dieser Verbindungen auf natürlichen Wegen verringert werden („hot spots“ und „hot moments“), auf der Skala der Einzugsgebiete von Flüssen erst sehr unzureichend verstanden.

Kleine Kunststoffpartikel (Mikroplastik) haben in den letzten Jahren aufgrund ihrer weiten Verbreitung und möglichen negativen Auswirkungen auf die Umwelt für Aufmerksamkeit gesorgt. Diese Partikel entstehen vor allem bei dem Abbau größerer Plastikteile in Flüssen und Ozeanen. Sorgen bereiten allerdings auch die Mikroartikel, die in Kosmetika enthalten sind oder von Kleidungsstücken aus Synthetikfasern abgegeben werden und dann im Abwasser der Haushalte landen. Die Verwendung von polymeren Mikropartikeln in Konsumgütern wurde deshalb kritisiert und wird jetzt vielerorts bereits zurückgefahren oder untersagt.

Kunststoffabfälle wurden zunächst vor allem in den Weltmeeren als Problem erkannt, wo sich ein Großteil, welcher der ordnungsgemäßen Entsorgung entgeht, letztendlich anreichert – insbesondere in den fünf großen Wirbeln der Ozeane. Neuere Arbeiten haben allerdings Verschmutzung durch Mikroplastik auch in Süßwasser-Seen nachgewiesen, wie etwa den Großen Seen Nordamerikas,⁹ dem Gardasee in Italien¹⁰ und sogar im Eis der Arktis.¹¹

Da Fortschritte in der Technik zu weiterer Miniaturisierung führen, ist es durchaus möglich, dass in Zukunft viele weitere Arten von Mikro- und Nanopartikeln ihren Weg in die Gewässer finden und dort neue und bisher unbekannte Auswirkungen haben werden.

Mikrobielle und virale Krankheitskeime, die sich durch Wasser ausbreiten, stellen in vielen Ländern weiterhin eine erhebliche Gefährdung der öffentlichen Gesundheit dar. Im Jahr 1996 gab es zum Beispiel in der Stadt Ogose in Japan eine Durchfall-Epidemie, die mit dem Trinkwasser in Verbindung gebracht wurde und 8000 der 10000 Einwohner der Stadt betraf. Noroviren und andere Krankheitserreger werden oft in Seen nachgewiesen, etwa im Süd-Teil des Biwa-Sees in Japan, der als Erholungsgebiet, zur Trinkwassergewinnung und zum Angeln genutzt wird. Die Überschwemmungen des Tsunami von 2011 verursachten ebenfalls weitreichende Wasserverschmutzung. Im Norden Englands gab es 2015 einen Ausbruch von Cryptosporidien (einzellige Parasiten).

4.3 Warum wird Chemie benötigt?

Die Entdeckung neuer chemischer Prozesse wird die öffentliche Gesundheit verbessern, indem sie besseren Zugang zu sicherer Trinkwasserbehandlung und Hygiene verschafft und gleichzeitig die ökonomische Wasserknappheit im Einklang mit den Zielen Nachhaltiger Entwicklung (Sustainable Development Goals; SDGs) der UNO überwindet.

Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert gemeinsames Denken und Handeln, sowohl bei der Reaktion auf akute Krisensituationen als auch bei der langfristigen Planung. Die Entwicklung und behördliche Genehmigung neuer Pharma-Wirkstoffe zum Beispiel sollte im Idealfall nicht nur deren Wirksamkeit und Nebenwirkungen in Betracht ziehen, sondern auch jegliche Stoffwechselprodukte, die wahrscheinlich ausgeschieden werden, und deren Verbleib. Ähnliche Überlegungen gelten auch für Chemikalien in Desinfektionsmitteln und Reinigungsmitteln. Bereits existierende „Alt“-Wirkstoffe sollten im Lichte ihrer Umweltrisiken neu evaluiert werden.

Gleichzeitig werden immer noch nachhaltige Lösungen für „traditionelle“ Umweltgifte gesucht (z. B. Arsen, Nitrat, Atrazin), und zwar in einem Umfeld mit niedrigem Einkommensniveau ebenso wie in der hoch entwickelten Landwirtschaft.

- Die chemische Forschung sollte mit relevanten Erkenntnissen aus anderen Gebieten verknüpft werden, einschließlich ökologischer und epidemiologischer Untersuchungen. Dies bedeutet, dass chemische Prozesse und analytische Möglichkeiten im Kontext der medizinischen Versorgung, soziologischem Verständnis und Umwelt-Management rund um Wasser, Gesundheit und Umwelt angewendet werden müssen.
- Die modernste bioanalytische Forschung (z. B. selektive und hochempfindliche Hochdurchsatz-Techniken) müssen mit der Wasserchemie und der Aufbereitungstechnologie verknüpft werden, um sicherzustellen, dass Bioassays Informationen liefern, die der Wasserwissenschaft nützlich sind.
- Ein besseres Verständnis der „hot spots“ und „hot moments“ des natürlichen Abbaus von Schadstoffen ist in allen Umweltbereichen erforderlich, sowohl um die Regenerationsfähigkeit der Natur bewahren und optimieren zu können (Vorsorgeprinzip), als auch als energie-effiziente Strategie der biologischen Schadensbehebung.
- Computergestützte Chemie kann ein nützliches Hilfsmittel sein, um die potentielle toxikologische Bedeutung von neuen Stoffen abzuschätzen, für die noch keine Daten bezüglich der Gesundheit von Mensch oder Tier vorliegen. So können dann Prioritäten für die weitere Erfassung und experimentelle Untersuchung solcher Schadstoffe gesetzt werden.
- Im Idealfall sollte Umweltverschmutzung vermieden werden. „Grüne Chemie“ kann mithelfen, zum Beispiel den Einsatz von Lösemitteln in der Industrie und damit auch die Freisetzung von Chemikalien zu reduzieren.

Fallstudie Deutschland: Wiederherstellung einer Flusslandschaft

Unbehandelte Abwassereinleitungen haben viele Flusslandschaften nach und nach zerstört. Im Ruhrgebiet nähert sich ein Großprojekt zur Renaturierung eines der am schlimmsten betroffenen Flüsse jetzt der Vollendung.

Bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts war die Emscher ein recht unauffälliger kleiner Fluss, der sich auf einer Länge von 109 km seinen Weg durch ländliche Gegenden bahnte, von der Quelle in Holzwickede bis zur Mündung in den Rhein in der Nähe von Duisburg. Ihr Schicksal besiegelte ihre geographische Lage entlang der Ost-West-Achse des Ruhrgebiets, als Mittellinie zwischen den parallelen Flüssen Lippe und Ruhr, wo sich die Schwerindustrie mit Bergwerken und Stahlhütten ausbreitete. Aufgrund der Bergsetzungen in den Bergbaugebieten war es in der Region nicht möglich, große Netzwerke geschlossener Abwasserkanäle zu bauen. Deshalb wurde die Emscher, dank ihrer zentralen Lage, zum offenen Abwasserkanal für ein riesiges Industriegebiet mit zahlreichen schnell anwachsenden Städten ausgebaut. Bereits 1882 dokumentiert ein Brief einer Gruppe besorgter Bürger an das preußische Parlament das Absterben des Flusses und die unhygienischen Zustände, die jedes Mal eintraten, wenn Hochwasser in die Städte vordrang.

Fast im gesamten 20. Jahrhundert war die Emscher, die bis dahin längst in standardisierten Betonröhrchen kanalisiert war, vor allem für ihren widerlichen Geruch und ihr giftiges Wasser bekannt, in dem keine Spur von Leben mehr nachweisbar war. Aufgrund der Absenkung des Ruhrgebiets durch den Bergbau konnte sie nicht mehr an ihrem früheren Mündungsort in den Rhein fließen sondern musste umgeleitet werden, um weiter stromabwärts, auf niedrigerem Geländeniveau zu münden.

Nach dem Niedergang des Steinkohlebergbaus veränderte sich die Situation allerdings dahingehend, dass es nun möglich wurde, ein geschlossenes Kanalisationssystem parallel zum Fluss anzulegen. Ab 1992 wurde ein riesiges Renaturierungsprojekt gestartet, dessen Kosten gegenwärtig auf 4,5 Milliarden Euro geschätzt werden. Für alle Abwässer, die bisher in die Emscher geleitet wurden, sollten jetzt Kläranlagen angelegt werden. Ungeklärte Abwässer sollten nur noch im geschlossenen Parallelsystem fließen, und dann in einer von vier großen Kläranlagen entlang des Emscherlaufs aufgearbeitet werden. Einige Abschnitte am Oberlauf des Flusses sind bereits wieder völlig renaturiert. Der geschlossene Abwasserkanal soll 2017 fertiggestellt werden, und das Gesamtprojekt, einschließlich der Renaturierung von Nebenflüssen, soll bis 2020 zum Abschluss kommen.



© Peter Mautsch, Dortmund

5 Detektion von Schadstoffen

Die Fähigkeit, Schadstoffe aufzuspüren, die im Wasser enthalten sein könnten, ist eine wichtige Grundlage einer jeden nachhaltigen Wasserwirtschaft, des Umweltschutzes und der Gewährleistung einer sicheren Trinkwasserversorgung. Sie erfordert eine große Bandbreite an Hilfsmitteln, von robusten und einfachen bis hin zu modernsten hochentwickelten analytischen Methoden. Die Detektionstechnik muss sich auch fortlaufend anpassen, da neu entwickelte Technologien auch neue Arten von Verunreinigungen erzeugen. Die Chemie sollte an vorderster Front der Innovation dazu beitragen, dass die neuesten und leistungsfähigsten Techniken bereitgestellt werden, welche die schnelle und akkurate Identifizierung neuer Probleme durch Chemikalien ermöglichen

5.1 Der Status Quo

Die Fortschritte bei analytischen Techniken in den vergangenen Jahrzehnten haben es einfacher gemacht, viele verschiedene Substanzen in sehr geringer Konzentration nachzuweisen. Es hat herausragende analytische Entwicklungen und Anwendungen im Umweltbereich gegeben, etwa bei der Massenspektrometrie (-omics-Methoden) und bei den Sensoren. Um aber Wasser-Ressourcen nachhaltig bewirtschaften zu können, muss man verstehen, welche Verunreinigungen einen Risikofaktor darstellen und welche Überwachungsstrategien sinnvoll sind. Die Messung von Schadstoffen, die das Wasser verunreinigen könnten, ist eine Zielvorgabe, die sich rasch verändern kann, da die Zahl der kommerziell genutzten Chemikalien zugenommen hat und der Einsatz von Verbindungen wie etwa Pestiziden sich auf die Entwicklungsländer ausgedehnt hat.

5.2 Die bevorstehenden Herausforderungen

Die unaufhaltsam steigende Anzahl an Chemikalien, die hergestellt und in der industriellen Produktion und/oder in Konsumgütern verwendet werden, ist eine gewaltige Herausforderung für die Detektion von Schadstoffen im Wasser. Aufgrund des schnellen Fortschritts in der Elektronik, Nanotechnologie und anderen Wissenschaftsgebieten, werden neue Produkte oder ihre Umwandlungsprodukte als Ver-

unreinigungen relevant. Obwohl die wichtigsten industriellen Märkte über Gesetze zur Registrierung und Untersuchung neuer Substanzen verfügen, können diese Systeme von der Einführung tausender neuer Substanzen und deren Umwandlungsprodukten überfordert werden, insbesondere da auch noch die Aufarbeitung vieler Alt-Chemikalien ansteht.

Die globale Ausbreitung intensiver Landwirtschaft und Aquakultur, die zunehmende Verwendung von Chemikalien im täglichen Leben (zum Beispiel in Körperpflegeprodukten), sowie das Auftauchen neuer Schadstoffe haben ebenfalls die Nachfrage nach besseren Detektionsmethoden verstärkt.

Das prognostizierte Wachstum der Nachfrage nach unbedenklichem Wasser bringt eine weitere Herausforderung mit sich: es wird zunehmend zum Einsatz von Anlagen zur direkten Wiederverwendung und/oder Entsalzung von nicht trinkbarem Wasser führen. Die Reinheit des Wassers aus solchen Anlagen, das dann die Verbraucher erreicht, wird nicht nur von natürlichen Prozessen abhängen sondern auch von der Detektion und Abtrennung von allen unerwünschten Bestandteilen.

Die Gesetzgebung kann ebenfalls die Ausweitung der Anforderungen an die Detektionsmethoden vortreiben. Die Rahmenrichtlinie Wasser der EU (2000/60/EC und 2013/39/EC) hat zum Beispiel 45 Chemikalien, darunter Schwermetalle, Industrieche-

mikalien, Pestizide und andere, aufgrund ihrer potentiellen Auswirkungen auf Ökosysteme als vorrangige Ziele für die Detektion identifiziert.

Weitere Herausforderungen ergeben sich aus den komplexen Gemischen einer Vielzahl chemischer Substanzen, die in Umwelt- und Wasserproben in sehr geringen Konzentrationen auftreten. Die Auswirkungen von in Gemischen auftretenden toxischen Substanzen auf biologische Systeme sind komplex, da diese unabhängig voneinander oder in additiver Weise wirken können, oder auch miteinander wechselwirken und synergistische oder antagonistische Effekte zeigen können. Deshalb kann die Toxizität eines Gemischs nicht aus einfachen Konzentrationsbestimmungen oder Toxizitätstests für einzelne Bestandteile abgeleitet werden. *In-vivo*-Bioassays können auf umwelt-typische Gemische angewendet werden, aber der hohe Aufwand und Tierschutzfragen stehen dieser Vorgehensweise im Wege. Eine neue Vorgehensweise, welche die Toxizität von neuen Schadstoffen auf zellulärer und molekularer Ebene mit Hochdurchsatzverfahren *in vitro* untersucht, kann das Screening von Umweltproben erheblich beschleunigen. Die neu entstandenen Disziplinen der Ökotoxikogenomik, Proteomik und Metabolomik bieten hier vielversprechende Ansätze für die Zukunft.¹²

Die Detektion umfasst die Überwachung von bekannten Problemen, bei gleichzeitiger Aufmerksamkeit für bisher unbekannte Stoffe von möglicher Relevanz, d.h. es ist sowohl zielgerichtete als auch nicht-zielgerichtete Analytik erforderlich.

Einerseits müssen analytische Methoden sich auf die speziellen Erfordernisse nationaler und internationaler Bestimmungen konzentrieren, wie etwa der Wasser-Rahmenrichtlinie der EU. Andererseits sind auch proaktive Bemühungen erforderlich für die Entwicklung innovativer analytischer Ansätze, um Wasser-Verunreinigungen zu identifizieren und quantifizieren, die bisher übersehen wurden. Beide Ziele erfordern innovative Anreicherungsverfahren und analytische Instrumente, sowie bioanalytische Methoden mit

hoher Genauigkeit, Selektivität, Empfindlichkeit und Präzision.

Die erfolgreiche Detektion und Eliminierung einer zunehmenden Zahl von Schadstoffen bei wachsenden Anforderungen erfordert kooperatives Denken auf der Systemebene. So sollten etwa die Auswirkungen einer neu in die Produktion aufgenommenen Chemikalie auf die Umwelt bereits bei deren Entwicklung verstanden werden. Wer neue Substanzen entwickelt, muss nicht nur deren Analyse berücksichtigen, sondern auch, wie sie mit der Umwelt wechselwirken werden.

5.3 Warum wird Chemie benötigt?

Chemische Forschung und chemisches Fachwissen können mithelfen, die Detektionsmethoden entlang des gesamten analytischen Prozesses zu verbessern und anzupassen, von der Probenahme bis hin zur Datenverwaltung.

Chemiker haben bereits Techniken entwickelt, die empfindliche und selektive Messungen von Stoffen in komplexen Umweltsystemen ermöglichen, oft sogar in Echtzeit. Die Forschung strebt nun an, das Screening zu einer vollständigen Erfassung der relevanten stofflichen Parameter eines Umweltsystems auszubauen.

- Standardisierung der chemischen Analysemethoden sowie der Bioassays oder Screening-Methoden auf molekularer Ebene muss Priorität erhalten, damit die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse verbessert wird. Validierungskriterien für die Identifizierung von Umwandlungsprodukten, für die Analyse von Nanopartikeln und Mikroplastik, sowie für nicht-zielgerichtete Methoden müssen definiert werden.
- Die Entwicklung von Detektionsmethoden sollte von der zunehmenden Vielfalt an Substanzen angetrieben werden, die sowohl aus natürlichen als auch aus anthropogenen Prozessen entstehen. Dabei sollte der Schwerpunkt darauf liegen,

eine für den vorgesehenen Zweck angemessene Wasserqualität („fit for purpose“) sicherstellen zu können. Diese Vorgehensweise erfordert sowohl spezifische Detektionstechniken als auch breitere Umwelt-Screening-Techniken. Die Entscheidung dafür, welche Hilfsmittel benötigt werden, muss auf dem jeweils zu untersuchenden Umweltproblem basieren.

- Im Idealfall sollte die Notwendigkeit, industriell hergestellte Chemikalien im Abwasser nachweisen und abtrennen zu können, bereits in der Produktentwicklung berücksichtigt werden, und zwar in einem ganzheitlichen Ansatz, der den gesamten Lebenszyklus einer Verbindung abdeckt. Für neu entwickelte Verbindungen und molekulare Materialien, wie etwa Pharma-Proteine oder Nanopartikel, müssen Sicherheitsdatenblätter solche Informationen enthalten, die die Detektion und Abtrennung der Verbindung und/oder ihrer Umwandlungsprodukte aus dem Wasser erleichtern.
 - Mehr Forschung wird noch im Bereich der chemischen Gemische benötigt. Analytische Techniken müssen entwickelt werden, die in mehreren Schritten die Trennung und Identifizierung der zahlreichen Bestandteile solcher Gemische ermöglichen. Wir brauchen auch ein besseres Verständnis der Auswirkungen von Chemikaliengemischen auf die Gesundheit von Mensch und Umwelt. Deshalb wird eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Toxikologen und Modellentwicklern eine wichtige Rolle spielen.
 - Bioanalytische Techniken, wie etwa zellbasierte Bioassays, liefern Bewertungsmaßstäbe für die Auswirkungen der Gesamtlast der Chemikalien und ergänzen somit chemische Analysen einzelner Komponenten. Überdies bieten jüngste Entwicklungen in hochauflösender Massenspektrometrie neue Möglichkeiten, bisher unbekannte Mikro-Verunreinigungen und ihre Umwandlungsprodukte zu analysieren. Dennoch gibt es immer noch erheblichen Bedarf für die Entwicklung neuer Strategien zur Validierung und Standardisierung,
- sowie für die Datenauswertung und Interpretation, die eine bessere Vorhersage der Auswirkungen neuer Chemikalien und Materialien auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit ermöglichen.
- GC-MS und LC-MS werden als instrumentelle Methoden seit vielen Jahren in großem Umfang angewandt. Neue Entwicklungen wie etwa verbindungsspezifische Isotopenanalyse durch GC- oder LC-IRMS kann den Informationsgehalt der natürlichen Häufigkeit von Isotopen als Beweis für die Umwandlung von Schadstoffen nutzen, wenn andere Vorgehensweisen versagen (z. B. auf der Ebene ganzer Einzugsgebiete oder in komplexen technischen Systemen¹³). Darüber hinaus können 2D-Methoden (LCxLC) und Ionenmobilitätsspektrometrie-Massenspektrometrie die Selektivität bei der Analyse von strukturell ähnlichen Verbindungen in komplexen Proben verbessern. Gleichzeitig sollten auch Anwendungen, die sich aus neuen Entdeckungen der Materialwissenschaften, Elektronik, computergestützter Chemie und anderen Wissenschaftsgebieten ergeben, intensiver zur Entwicklung einer neuen Generation von analytischen Instrumenten genutzt werden.
 - Wissenschaftler müssen bessere Methoden für Analysen entwickeln, die nicht auf eine bestimmte Zielsubstanz gerichtet sind. Die Frage ist, wie solche nicht-zielgerichteten Analysen zu vergleichen und zu validieren sind, und wie man die Daten für noch unbekannte Schadstoffe evaluieren, speichern und handhaben kann. Gegenwärtig ist es schwierig Verbindungen zu identifizieren, und wir müssen Strategien für den Vergleich zwischen Labors und neue in-silico-Methoden für eine bessere Vorhersage von Massenspektren entwickeln.
 - Um die Analyse von Wasserverunreinigungen zu verbessern, werden bessere Datenbanken und eine besser integrierte Datenverwaltung, einschließlich gemeinschaftlich geteilter analytischer Daten, offen zugänglichen Ressourcen und Computer-Analysen benötigt. Die Vergleichbarkeit der Probenahme ist ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt.

punkt. Diese Empfehlungen staatenübergreifend zu implementieren ist eine große Herausforderung.

- Die Entwicklung von schnelleren, billigeren und einfacher zu benutzenden Detektionsmethoden und -instrumenten, z. B. Echtzeit-Sensor-Netzwerken, die eine umfassende Umweltüberwachung und schnelle Reaktion ermöglichen, insbesondere auch durch Nicht-Spezialisten vor Ort, sollte eine weitere Priorität darstellen.

6 Wasser- und Abwasserbehandlung

Die Natur trägt schon viel dazu bei, Wasser in hinreichender Quantität und Qualität für die Menschheit bereitzustellen, indem sie Meerwasser destilliert und dadurch in Süßwasser verwandelt sowie überdies viele Schadstoffe mittels der Filtration durch Böden und Sedimentschichten entfernt und so das Trinkwasser produziert, das wir aus dem Grundwasser oder aus Quellen entnehmen. Mit genügend Zeit werden die biologischen Abbauprozesse, die im Wasserkreislauf stattfinden, die meisten natürlichen Verunreinigungen in hinreichendem Maße entfernen. Die Überbelastung dieser Systeme durch sehr hohe Bevölkerungsdichten, insbesondere in trockenen Gebieten, sowie die Freisetzung von anthropogenen Chemikalien sind die Probleme, die die größten Herausforderungen für die Zukunft darstellen.

Bis ins 20. Jahrhundert hinein beruhte die Entsorgung von Abwässern im Wesentlichen auf dem Glauben an die natürliche Reinigungskraft der Wasserläufe in Verbindung mit dem Verdünnungseffekt der großen Flüsse und der Ozeane. Erst nachdem die Anreicherung von Krankheitskeimen und industriellen Schadstoffen in Flüssen und die Bioakkumulation von giftigen Schwermetallen wie Quecksilber in der Nahrungskette als Problem erkannt worden waren, wurde die Notwendigkeit einer Abwasserbehandlung vor der Einleitung in die Gewässer weitläufig akzeptiert.¹⁴

6.1 Der Status Quo

Wasseraufbereitungsanlagen dienen dazu, Wasser in Trinkwasserqualität zu produzieren. Kläranlagen dienen dazu, Wasser nach Gebrauch so zu behandeln, dass es in die Umwelt abgegeben werden kann, womit es dann wieder in den natürlichen Wasserkreislauf zurückkehrt. In den Industrieländern hat die Abwasserbehandlung seit den 1970er Jahren mit bemerkenswertem Erfolg die Wasserqualität der Flüsse verbessert. Global gesehen werden allerdings immer noch 80% der Abwässer unbehandelt in die Umwelt entlassen.¹⁵

Die Entsalzung von Brackwasser und Meerwasser nimmt rund um die Welt rapide zu, da täglich neue Anlagen entwickelt und gebaut werden. Entsalzung

ist zwar energieaufwendig, ist aber in manchen Gegenden die einzige verfügbare Wasserquelle, und das Verfahren der Entsalzung durch Umkehrosmose verbraucht oft weniger Energie als der Transport von Trinkwasser über größere Entfernungen.

Im Vergleich zu dieser hochgradig energieaufwendigen Behandlung von Meerwasser, bieten Abwasserströme die Chance, energieverzehrende Kläranlagen in chemische Fabriken und Produktionsstätten sauberen Wassers zu verwandeln, die in Summe sogar Energie liefern können. Zusätzlich sollten sie als Quelle für Stickstoff und Phosphor für die Landwirtschaft dienen.

Auf diese Weise kann die Verschmutzung von Gewässern mit Nährstoffen verringert werden. Beim Phosphor würde sich auch die weltweite Abhängigkeit von einigen wenigen, begrenzten Vorkommen von abbaubaren Phosphor-Mineralien verringern. Abwasser enthält überdies mehr Energie (in Form von organischen Verbindungen und Stickstoff) als nötig ist, um diese Energie mit heutiger Technik zurückzugewinnen. Somit existiert ein noch weitgehend ungenutztes Potential für die Gewinnung von Energie aus der organischen Materie im Abwasser.

6.2 Die bevorstehenden Herausforderungen

Aufgrund zunehmender Nachfrage nach sauberem Wasser müssen bei der Wasser- und Abwasserbehandlung neue Wege beschritten werden, um Verunreinigungen von Mensch und Umwelt fernzuhalten. Neue Materialien müssen entwickelt werden, darunter Membranen, Sorbentien, Katalysatoren und Mikrobenstämme für biotechnologische Prozesse zur Abtrennung bzw. zum Abbau unerwünschter Verbindungen im Wasser. Technologietransfer und Scale-up gehören dabei zu den wichtigsten Erfordernissen. Auf der Anlagen-Ebene muss die Integration der chemischen und biologischen Prozesse mit Konzepten zur Rohstoffrückgewinnung optimiert werden. Diese Anlagen reichen von fortgeschrittenen Wasseraufbereitungssystemen, wie sie für den Umgang mit komplexen Wasserströmen benötigt werden, bis hin zu einfacheren, kostengünstigeren Systemen, die in Entwicklungsländern die Wasserversorgung sicherstellen und die menschliche Gesundheit schützen können.

Die Wasser-Infrastruktur muss flexibler werden, um sich an örtliche Bedürfnisse und die sich rasch wandelnden Umweltbedingungen anpassen zu können. So können zum Beispiel sowohl Zunahmen als auch Abnahmen der Bevölkerungsdichte die etablierte Infrastruktur in Schwierigkeiten bringen. Der globalisierte Handel macht es möglich, dass die Herstellung der in einer Weltregion benötigten Produkte zur Umweltverschmutzung in einer weit entfernten Region führt, so dass im Endeffekt Wasserverschmutzung und andere Umweltprobleme exportiert werden.⁷

Die Herausforderungen rund ums Wasser bringen auch Chancen. Die Abtrennung von neuen Schadstoffen wie etwa endokrinen Disruptoren und zahlreicher anderer Verunreinigungen von genutztem Wasser, bevor sie in die Umwelt gelangen können, ist ein herausragendes Thema geworden. Verschreibungspflichtige Medikamente und illegale Drogen wie Kokain sind in Abwässern nachweisbar. Dies hat dazu geführt, dass detaillierte Untersuchungen

dieser Belastung zu einer wertvollen Quelle für Daten zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge wurden.¹⁶ Fracking hat zusätzliche Erdgasvorräte zugänglich gemacht, aber das stark verunreinigte Produktionswasser bringt zusätzliche Herausforderungen an die Aufbereitung. In manchen Regionen gibt es nicht genügend Wasser, um Fracking und Landwirtschaft gleichzeitig zu betreiben.

Zu den wichtigen Problemen, die auf dem Gebiet der Wasseraufbereitung identifiziert wurden, zählen die Entwicklung von kostengünstigeren und energieeffizienteren Technologien (z. B. neuartige Membranen, Katalysatoren, Sorptionsmittel), Investitionsmittel für den Scale-up von neuen Methoden, die aus der Grundlagenforschung hervorgegangen sind sowie ein umfassendes Verständnis der Wassersysteme. Dazu gehören: der Schutz der Wasserressourcen, ein flexibler und minimaler Einsatz von Chemikalien und die Anpassung der Aufbereitung an die vorge-sehene Art der Nutzung.

Die Herausforderungen zur Überwindung von institutionellen Hindernissen, der Finanzierung und Instandhaltung der Infrastruktur, des Alterns der Infrastruktur sowie der Finanzierung neuer Abwasserbehandlungsprojekte und -technologien im Grenzbereich zwischen öffentlichen Einrichtungen und Industrie müssen ebenfalls angegangen werden.

Einige der sich rasch entwickelnden Länder wie China haben die Chance, beim Bau neuer Städte auch neue Technologien und Vorgehensweisen bei der Etablierung neuer Konzepte zum Wasserhaushalt einzusetzen (siehe Fallstudie auf Seite 22). China hat ein nationales Programm zur Eindämmung der Wasserverschmutzung gestartet, das von 2006 bis 2020 läuft und alle Aspekte des Wasser-Managements umfasst, von der Vermeidung der Verschmutzung beim Erzeuger bis hin zur Wiederherstellung geschädigter Gewässer.

Neuere wissenschaftliche Entwicklungen versprechen eine wirtschaftliche Reduzierung der Nährstoffe im Abwasser und Energieeinsparungen bei Kläranla-

Fallstudie China: Vollständig kontrollierter Wasserkreislauf

Mit seiner rasch voranschreitenden Wirtschaft und Stadtentwicklung hat China die Chance, neue Modelle für städtische Wasserkreisläufe zu entwickeln, die auf Nachhaltigkeit ausgelegt sind.

In ihrer ruhmreichen Zeit als Hauptstadt der Tang-Dynastie (618-907 n. Chr.) und Ausgangspunkt der Seidenstraße hatte die Stadt Xi'an nicht unter Wasserknappheit zu leiden, wie sie heute vorherrscht. Mehr als genug Wasser kam von den nahe gelegenen Quinling-Bergen herabgeflossen und sammelte sich in den acht Flüssen, die in der Nähe der Stadt vorbeiflossen. Durch Klimawandel und rasche Stadtentwicklung, ebenso wie Überbeanspruchung und unangemessenes Management der Wasser-Ressourcen, verschwand die historische Schönheit der „acht Flüsse, welche die Hauptstadt umgeben“ weitgehend und die Verschlechterung des Gewässerzustands wurde zu einem ernststen Problem, das die nachhaltige Entwicklung der Stadt einschränkte.

Das „Acht-Flüsse-Projekt“ ist eine große Investitionsmaßnahme mit dem Ziel, eine nachhaltige Wasserversorgung der Stadt wiederherzustellen. Im Rahmen des 1,58 Milliarden US-Dollar schweren Projekts sollen 28 Seen eingerichtet werden, darunter einige, die von Parks umgeben werden, deren Design die aus historischen Illustrationen bekannten Landschaften der Tang-Dynastie nachahmen. Der integrierte Plan sieht vor, dass alle Arten von Wasser, natürliche Niederschläge, Flüsse und aus den Abwasserströmen zurückgewonnenes Wasser benutzt werden, wobei in dem städtischen Umfeld ein naturähnlicher Wasserkreislauf entsteht, der sowohl eine zuverlässige Wasserversorgung als auch attraktive Landschaften für Freizeitaktivitäten zur Verfügung stellt.

Bis zum Jahr 2012 war die Hälfte der geplanten Seen bereits fertiggestellt. Die übrigen sollen innerhalb von fünf bis zehn Jahren folgen. Das Gewässersystem wird ein wachsendes Ballungsgebiet mit über acht Millionen Einwohnern versorgen.

In einem getrennten Modellprojekt wird ein Universitätscampus in den östlichen Vororten von Xi'an, der 30.000 bis 35.000 Menschen dient, mit seinem eigenen Wasserspeicher ausgestattet. Dieser ist Teil einer Landschaft mit See und einer Kläranlage mit Rückgewinnung von Wasser für Toiletten, Gartenbedarf und den See selbst, während das begrenzt verfügbare Grundwasser ausschließlich als Trinkwasserquelle dient.

Analysen zeigen, dass die Verweilzeit des zurückgewonnenen Wassers im Speichersee den Gehalt des Wassers an anorganischen Salzen sowie seine Toxizität für Organismen auf verschiedenen trophischen Ebenen reduzierte, obwohl der Gehalt an organischen Verbindungen leicht zunahm. Die Mechanismen, die für diese Veränderungen verantwortlich sind, werden derzeit noch untersucht.

Erfahrungen in China zeigen, dass naturähnliche Wasserkreisläufe wie dieser die Kapazität der vorhandenen Wasserversorgung erhöhen und die Wasserqualität verbessern können.



gen, etwa durch das Anammox-Verfahren (Anaerobe Ammoniak-Oxidation)¹⁷ für die Abscheidung von Stickstoff sowie oberflächenmodifizierte Biokohle¹⁸ für die Sorption von Stickstoff und Phosphor aus verschmutztem Wasser. Solche Technologien können helfen, die Wirksamkeit von Kläranlagen erheblich zu verbessern. Die Beispiele zeigen, dass es sinnvoll ist, weitere Forschung und Entwicklung im Hinblick auf neue Vorgehensweisen zu fördern.

Die bereits etablierten Prozesse zur Abwasserbehandlung, die in den Industrieländern in großem Maßstab und mit Erfolg eingesetzt werden, erhalten oft Vorrang, da Veränderungen in diesem Sektor gescheut werden. Diese konservative Grundhaltung kann ein Hindernis für Innovationen und die Einführung neuer technischer und Management-Methoden darstellen, die zur Bewältigung neuer Herausforderungen jedoch benötigt werden.

Fallstudie USA : Trinkwasser-Produktion

Wo natürliche Wasserquellen knapp sind, wie etwa im trockenen Südwesten der USA, kann die Umwandlung von Abwasser und/oder Salzwasser in Trinkwasser nötig werden.

Wir wünschen uns alle, dass unser Trinkwasser aus natürlichen Quellen kommt, da wir annehmen, dass die Filter des natürlichen Wasserkreislaufs eine perfekte Reinigung erreichen. Nur in Zeiten der Not sind Menschen dazu bereit, Salz-, Brack- oder Abwasser aufzureinigen und es dann als Trinkwasser zu akzeptieren.

Diese Not hat einige Gegenden in Texas nun getroffen, nachdem eine schwere Dürreperiode den Grundwasserspiegel bis auf ein problematisches Niveau abgesenkt hat. Als die Stadt Big Spring nach Auswegen suchte, kam indirekte Wiederverwendung – wobei man geklärtes Abwasser durch natürliche Puffersysteme hindurchsickern lässt, um die Grundwasserleiter wieder aufzufüllen – nicht in Betracht, da die Hitze den Großteil des Wassers verdunstet hätte. Deshalb baute das örtliche Wasserwerk die erste Anlage der USA zur direkten Wiederverwendung als Trinkwasser, die im Mai 2013 eröffnet wurde. Sie kann bis zu neun Millionen Liter Abwasser pro Tag so aufreinigen, dass es die Normen für Trinkwasser erfüllt.

Im Normalbetrieb wird das aufgereinigte Wasser allerdings mit unbehandeltem Wasser aus natürlichen Quellen vermischt, und diese Mischung wird dann der üblichen Filter-Prozedur für Trinkwasser unterworfen.

Bald darauf realisierte eine zweite texanische Gemeinde, Wichita Falls, ein ähnliches Projekt. In diesem Fall stand die benötigte Aufbereitungsanlage allerdings schon bereit – sie diente zur Reinigung

von Brackwasser aus einem See. Die Stadt musste lediglich in eine Rohrleitung investieren, um die Kläranlage mit der Trinkwasser-Produktion zu verbinden.

In diesen beiden texanischen Kommunen, die eine Vorreiterrolle übernahmen, sorgte gute Überzeugungsarbeit zusammen mit der für jeden offensichtliche Notlage durch die lange Dürreperiode zu einer breiten Akzeptanz der Wasser-Wiederverwendung. In einer anderen texanischen Stadt wurden allerdings ähnliche Pläne gestoppt, nachdem sich ihnen die öffentliche Meinung entgegengestellt hatte.

Andere US-Bundesstaaten und Länder, die von Wasserknappheit betroffen sind, beobachten diese Entwicklungen mit Interesse. Kalifornien, das seit fünf Jahren unter extremer Dürre leidet, hat indirekte Wiederverwendung bereits seit 50 Jahren genutzt, also zurückgewonnenes Wasser eingesetzt, um die Grundwasserleiter aufzufüllen. Weitere Rückgewinnungspläne werden derzeit für geklärte Abwasserströme diskutiert, die bisher in den Pazifik eingeleitet wurden.

In anderen Ländern gehört die direkte Behandlung von verunreinigtem Wasser, um daraus Trinkwasser zu produzieren, zur routinemäßigen Reaktion im Katastropheneinsatz und bei akuten Dürrekrisen. Je nach Situation können Entsalzungsanlagen auch einen Lösungsweg bieten, obwohl die Energiekosten dieses Prozesses derzeit oft den limitierenden Faktor darstellen.

6.3 Warum wird Chemie benötigt?

ChemikerInnen spielen eine wichtige Rolle bei der Auswahl von geeigneten Aufbereitungsmethoden und beim Verständnis der diesen zugrunde liegenden Prozesse. Zusätzlich können sie auch helfen, indem sie:

- verbesserte Methoden für die energieeffiziente Entsalzung und Wiederverwendung von Wasser entwickeln;
- neue Materialien und Vorgehensweisen für die Energiegewinnung aus Abwasser entwickeln, so dass Kläranlagen energieautark oder sogar netto-Energie-Produzenten werden;
- neue Membranen für die wirksame Abtrennung neuer Schadstoffe, für die Entsalzung von Meerwasser sowie für die Rückgewinnung von Nährstoffen entwickeln;¹⁹
- die Nutzung und Anpassung von natürlichen Reinigungsprozessen für technische Prozesse voranbringen, wie etwa Anammox, oberflächenmodifizierte Biokohle¹⁸ und Aufbereitung auf Eisen-Basis²⁰, Herstellung von Biokraftstoff und elektrochemische Aufarbeitung mit Solarenergie;^{21,22}
- kumulative risiko-basierte Kriterien definieren, die ein schnelles Screening und die Identifizierung von toxischen Verbindungen ermöglichen, welche die Wasserqualität beeinträchtigen (zum Beispiel mit Ökotoxikogenomik).

Bei jeder Aufbereitungs-Technik muss man den potentiellen Nutzen der Rückgewinnung von Ressourcen aus den abgetrennten Materialien (siehe dazu das folgende Kapitel) ebenso wie die Kosten im Auge behalten. Pilot- und Demonstrations-Anlagen sollten für die Erprobung neuer Technologien eingerichtet werden.

7 Rückgewinnung von Ressourcen

Im 21. Jahrhundert sollten Prozesse zur Abwasserbehandlung auch als Chance betrachtet werden, Wasser zur erneuten Nutzung zu gewinnen und die im Wasser enthaltenen Materialien als Quelle für die Produktion von Energie und wertvollen Rohstoffen zu nutzen. Die Auftrennung von „grauem“ Wasser in reines Wasser sowie organische und anorganische Verbindungen ist nicht nur notwendig für den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt, sie sollte auch als Chance für die Rückgewinnung wertvoller Ressourcen aufgefasst werden. In einem nachhaltigen, umweltfreundlichen Wirtschaftssystem sollten im Idealfall alle in einem Abwasserstrom enthaltenen Ressourcen, einschließlich des Wassers, wiederverwendet werden.

Energie sollte ebenfalls als eine Ressource betrachtet werden, die man aus Abwasser zurückgewinnen kann. Dies erfolgt heute bereits durch das Auffangen von Methan bei der Umsetzung von festen Rückständen aus der Abwasserbehandlung. Allerdings könnten andere Methoden zur Energiegewinnung aus Abwasser effizienter sein als die heute genutzten, darunter etwa der anaerobe Abbau (oder neuere Methoden wie anaerobe Membran-Bioreaktoren), bei dem der Energiegehalt durch die Produktion von Methan gezielt nutzbar gemacht wird. Die Entwicklung und Anwendung solcher Methoden könnte Abwasser in wiederverwertbares Wasser umwandeln und den Prozess zusätzlich zu einer Methode der Energiegewinnung erweitern.

Die mengenmäßig relevanteste Ressource, die zurückgewonnen werden kann, ist natürlich Wasser von gewünschter Reinheit. Die Anforderung an den Aufbereitungsprozess hängt von der vorgesehenen Verwendung des Wassers ab, also zum Beispiel: Rückführung in den natürlichen Kreislauf, Bewässerung in der Landwirtschaft für den Anbau von Lebensmitteln oder anderer Pflanzen, Nutzung in industriellen Prozessen oder Erzeugung von Trinkwasser.

Zu den Stoffen, die bereits jetzt aus Abwasser zurückgewonnen werden können, zählen eine Reihe von Metallen (z. B. Gold, Lithium), Nährstoffe (Phosphor, Stickstoff, Kalium), andere Salze und Chemika-

lien sowie vielleicht auch, obwohl das umstritten ist, manche organische Moleküle wie Steroidhormone, Pharmawirkstoffe oder Lipide.

Die mit einer weitergehenden Nutzung der Ressource Abwasser verbundenen Chancen sollten betont werden, um weitere Anreize für die Aufbereitung und Wiederverwertung von Wasser zu schaffen und diese Prozesse für öffentliche und private Investoren attraktiver zu machen.

Die Farben des Wassers²³

Grünes Wasser

ist das natürlich vorkommende Boden- und Regenwasser, welches von Pflanzen aufgenommen und verdunstet wird. Es ist relevant für landwirtschaftliche Produkte.

Blaues Wasser

ist Grund- oder Oberflächenwasser, das zur Herstellung eines Produktes genutzt wird und nicht mehr in ein Gewässer zurückgeführt wird. In der Landwirtschaft ist es das Wasser für die Bewässerung der Pflanzen

Graues Wasser

ist die Wassermenge, die während des Herstellungsprozesses verschmutzt wird (ohne Toilettenabwässer)

Schwarzes Wasser

ist Abwasser, welches Toilettenabwässer enthält.

7.1 Der Status Quo

Die gegenwärtige Situation hinsichtlich des Umgangs mit Klärschlamm ist rund um den Globus sehr unterschiedlich. Auch zwischen kommunalen und industriellen Abwässern bzw. Klärschlämmen gibt es große Unterschiede. In vielen Ländern werden die festen Rückstände als Dünger in der Landwirtschaft ausgebracht, verbrannt oder in Deponien gelagert.

Manche Kläranlagen demonstrieren allerdings bereits die Möglichkeiten der Ressourcen-Rückgewinnung. So erzeugt zum Beispiel der 175 kW Demosofc Brennstoffzellen-Generator einer Kläranlage in Turin genügend Energie, um ein Viertel des Eigenbedarfs der Anlage zu erfüllen. Die Brennstoffzelle nutzt Biogas, das aus dem anaeroben Abbau in der Anlage hervorgeht. Ähnliche Prototypen mit Energie-Rückgewinnung sind bereits in Japan, Österreich und Großbritannien in Betrieb.

Phosphor und Stickstoff werden in einigen innovativen Kläranlagen zurückgewonnen, etwa in Stoke Bardolph und in Minworth in Großbritannien (siehe die Fallstudie Seite 29).

An anderen Orten ist die Rückgewinnung von aktiviertem Kohlenstoff, Gold, Silber, Palladium und Platin aus Klärschlamm demonstriert worden. Eine Kläranlage in Suwa (Japan) hat bei der Verbrennung von Klärschlamm 2 kg Gold pro Tonne Asche gewonnen. Das bedeutet, dass das Edelmetall in dieser Asche 50-fach höher konzentriert vorliegt als in den Erzen in einigen der weltweit ergiebigsten Lagerstätten.²⁴ Dieser Goldgehalt mag unnatürlich hoch sein, da das Einzugsgebiet der Kläranlage Industriestandorte umfasst, die Edelmetalle verwenden. In einer anderen Anlage, die von der Firma Toyota in Nagano betrieben wird, hat ein jährlicher Durchsatz von 70 Tonnen Asche 22 kg Gold erbracht. Forscher in Japan entwickeln derzeit neue Methoden zur Rückgewinnung weiterer wertvoller Materialien aus Abwässern (siehe Fallstudie Seite 30).

7.2 Die bevorstehenden Herausforderungen

In sehr naher Zukunft werden wir manche Rohstoffe aus Abwasser zurückgewinnen müssen, um Versorgungsengpässe und/oder politische Spannungen angesichts der Begrenztheit der natürlichen Vorräte zu vermeiden. Dies trifft insbesondere für Phosphor zu, da der größte Teil der natürlichen Lagerstätten dieses Elements in einer umstrittenen Region (West-Sahara) liegt. Überdies müssen jegliche Bemühungen, die globale Wirtschaft nachhaltiger und als geschlossenen Kreislauf zu gestalten, auf der Rückgewinnung solcher Rohstoffe beruhen, die heute noch in gigantischem Maßstab vergeudet werden.

Die Rückgewinnung seltener Metalle aus Abwässern ist möglich, erfordert aber verbesserte Methoden, damit sie kosteneffizient wird. Die interessantesten Metalle, die zurückgewonnen werden könnten, sind Silber, Kupfer, Gold, Eisen, Palladium, Mangan und Zink. Forscher in Japan untersuchen auch entsprechende Möglichkeiten für seltenere Elemente wie Selen, Tellur und Vanadium.

Bei der Rückgewinnung von Wasser für direkte Wiederverwendung als Trinkwasser wird, ebenso wie bei jeder Substanz, die mit der Nahrungskette in Berührung kommt, eine Herausforderung darin liegen, Vertrauen in die hygienische Reinheit der zurückgewonnenen Materialien aufzubauen. Überdies wird die öffentliche Wahrnehmung und Akzeptanz von entsprechenden Projekten und Technologien von erheblicher Bedeutung sein.

Das strategische Ziel in diesem Bereich sollte sein, den ganzen Aufbereitungsprozess neu zu durchdenken und von der Wahrnehmung der Last der Reinigung von Abwasserströmen zur aktiven Nutzung ihrer wertvollen Inhaltsstoffe überzugehen. Dazu wird die Implementierung und Unterstützung des Konzepts der Rohstoffrückgewinnung auf allen Ebenen benötigt, von der Grundlagenforschung bis hin zur Einbindung in die Praxis.

Um das Konzept der Wasser-Wiederverwendung voranzubringen, müssen die folgenden Schlüsselpunkte berücksichtigt werden:

- Zu den Ressourcen im Abwasser zählen Wasser, Energie, Nährstoffe, Metalle, Salze und andere wertvolle Materialien.
- Rohstoff-Rückgewinnungsanlagen müssen eine energie-positive Betriebsweise anstreben und die Rückgewinnung muss auf System-Niveau implementiert werden, wobei mehrere Ziele und Maßstäbe anvisiert werden müssen.
- Neue chemische Entdeckungen, wie die Entwicklung neuer Materialien, um aus Abwasser zurückgewonnene oder produzierte Stoffe zu extrahieren und zu nutzen, müssen gefördert werden. Neue verfahrenstechnische Wege und Designprinzipien müssen entwickelt werden, um die Rohstoff-Rückgewinnung zu erleichtern.
- Verschiedene technisch-wirtschaftliche Vorgehensweisen, um die besten Methoden und Kostenvorteile zu identifizieren (unter Berücksichtigung von Größe und Art der Anlagen – kommunal oder industriell, rechtlichen, politischen und Infrastruktur-Grenzen), erklären, warum sich bisherige Aktivitäten in den fünf vertretenen Ländern unterscheiden.
- Forschung und Entwicklung im Hinblick auf die Implementierung und die Bereitstellung eines angemessenen institutionellen Rahmens sowie ein Marketing zur Verbesserung der Nutzung der zurückgewonnenen Materialien sind notwendig.

Letztendlich könnte eine effiziente Implementierung der Rohstoff-Rückgewinnung aus Abwasser inklusive einer angemessenen Risikoabschätzung für die Recycling-Produkte ein großer Schritt in Richtung einer Kreislaufwirtschaft sein.

7.3 Warum wird Chemie benötigt?

Obwohl in vielen wichtigen Bereichen bereits erhebliche Fortschritte gemacht wurden, identifizierten die TeilnehmerInnen des CS3 Symposiums spezifische Techniken und Fähigkeiten, welche die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet in Angriff nehmen muss, um weiteren Fortschritt zu erleichtern. Dazu gehören:

- Technologien zur Produktion von Energie bzw. ihrer Erzeugung aus im Wasser enthaltenen Bestandteilen unter Berücksichtigung der Energiespeicherung und der Kompatibilität mit Energieversorgungsnetzen;
- neue chemische Methoden, um die Zusammensetzung der Bestandteile in Ausgangsmaterialien für Rohstoff-Rückgewinnungsanlagen zu charakterisieren und zu überwachen; benötigt werden sowohl Sensoren für die direkte Messung im System als auch für detaillierte Analysen im Labor;
- Gestaltung von Prozessabläufen zur Berücksichtigung der Veränderlichkeit potentieller Rohstoffe/Rohstoffkonzentrationen im Abwasser und deren Einwirkung auf die Prozesse zur Extraktion und Reinigung;
- Methoden für die *a priori* Bewertung der Energieausbeute und der möglichen Nutzung als Rohstoff;
- Technologien, die eine hocheffiziente Rückgewinnung und Wiederverwertung von Nährstoffen (anstatt lediglich ihre Entfernung aus dem Abwasser) erleichtern, unter Berücksichtigung ihrer chemischen Form und Bio-Verfügbarkeit;
- Technologien zur hocheffizienten Rückgewinnung und Wiederverwertung von Metallen unter Berücksichtigung von Spezifizierung, Reinheit und Wert;
- neue chemische Methoden und Technologien, die die Produktion hochwertiger Materialien aus den Rohstoffen ermöglichen;

- technisch-wirtschaftliche neue Materialien und Verfahren zur Extraktion von Energie aus organischen Substanzen im Abwasser, um den Gesamtprozess energie-positiv zu gestalten;
- analytische Methoden zur Charakterisierung von komplexen Stoffgemischen und Technologien, um Produkte und ihr Potential als Rohstoff (z. B. für Bioplastik, Enzyme, Produktion bioaktiver Chemikalien) zu bewerten.

Fallstudie Großbritannien: Vereinfachung des Stickstoff-Kreislaufs

Ein bakterieller Prozess, der erst vor weniger als 20 Jahren entdeckt wurde, kann helfen, Stickstoff-Verbindungen auf effizienterem Wege aus dem Wasser zu entfernen.

Der Weg, den ein Stickstoffatom aus der Luft durchläuft, wenn es durch Düngemittel, Pflanzen, Tiere oder Menschen und Abwasser letztendlich den Kreis schließt und in die Luft zurückgelangt, kann in chemischer Hinsicht unglaublich kompliziert sein – da das Stickstoffatom mehrmals zwischen dem völlig reduzierten Zustand (im Ammoniak) und dem völlig oxidierten Zustand (im Nitrat) pendelt. Der Haber-Bosch-Prozess, der den Stickstoff aus der Luft chemisch nutzbar macht, produziert zum Beispiel Ammoniak, der dann oxidiert wird, um Nitrat-Dünger herzustellen. Am anderen Ende des Weges wird Ammoniak im Abwasser in ähnlicher Weise zu Nitrat oxidiert, das dann zu elementarem Stickstoff reduziert wird, wie er in der Luft vorkommt.

Die überraschende Entdeckung der anaeroben Ammoniak-Oxidation (Anammox) in der Natur Mitte der 1990er Jahre und ihre Weiterentwicklung als industrielles Verfahren zur Abwasserreinigung bieten die Chance, die Komplexität und Kosten der Abscheidung von Ammoniak aus Abwasser und der Umwandlung in molekularen Stickstoff zu verringern. Im ersten Schritt des Anammox-Verfahrens wandeln Bakterien der Gattung *Nitrosomonas* einen Teil des Ammoniaks in Nitrit um. Dann bringen anaerobe Bakterien aus dem natürlichen Anammox-Prozess das Nitrit mit dem verbleibenden Ammoniak zur Reaktion, wobei molekularer Stickstoff (und Wasser) gebildet wird. Der zweite Schritt er-

folgt in großem Maßstab in sauerstoffarmen Teilen der Ozeane. Man schätzt, dass dieser Vorgang für ein Drittel bis zur Hälfte der natürlichen Produktion von molekularem Stickstoff verantwortlich ist.

Nachdem eine Prototyp-Anlage in Delft (Niederlande) eingerichtet worden war, wurden zwei weitere Anammox-Anlagen ebenfalls in den Niederlanden entwickelt. In Großbritannien hat ein großes Klärwerk in Minworth in der Nähe von Birmingham, das einer Bevölkerung von 1,7 Millionen Menschen dient, vor kurzem dieses Verfahren übernommen. Die Anlage wurde überdies dahingehend optimiert, dass neben der Stickstoff-Abscheidung im Anammox-Verfahren auch eine drastische Entfernung des Phosphatgehalts des Abwassers erreicht wird. Sie erreicht eine Kapazität von 50 Tonnen Stickstoff pro Tag, was mehr als 90% des im verarbeiteten Abwasser enthaltenen Stickstoffs darstellt.

Es konnte gezeigt werden, dass der Prozess über den gesamten Lebenszyklus der Anlage kostengünstiger ist als konventionelle Methoden der Ammoniak-Abtrennung. Außerdem benötigt er weniger Fläche, Belüftung und Chemikalien. Die Anlage produziert auch weniger Klärschlamm und Kohlendioxid als konventionelle Methoden, was daran liegt, dass die Anammox-Bakterien sich relativ langsam vermehren. Die Anlage nahm den Vollbetrieb im Jahr 2013 auf.



Fallstudie Japan: Rohstoffquelle Klärschlamm

Was wäre, wenn der Abwasserstrom nicht eine Last wäre, derer man sich entledigen muss, sondern eine Rohstoffquelle, die man nutzen kann? Japan besitzt die fortschrittlichsten Anlagen zur Ausbeutung der festen Rückstände, die nach Klärung von Abwässern und Einäscherung des Klärschlammes verbleiben.

Eine Anlage in Shimane gewinnt bereits Phosphat aus Klärschlamm zurück und kristallisiert dieses als Magnesiumammoniumphosphat (MAP). Mindestens zwei Anlagen isolieren Gold aus eingäscherter Klärschlamm, und beide gewinnen hinreichende Mengen des Edelmetalls, um damit Gewinne zu erzielen. Andererseits wird der größte Teil des Abwassers in Japan (77%) bisher nicht verwertet, und die Inhaltsstoffe werden letztendlich als Abfall entsorgt.

Die verfügbaren physikalisch-chemischen Trennmethode sind nicht sehr gut darauf eingestellt, eine bestimmte, in geringer Konzentration vorliegende Ionensorte oder Verbindung aus einem hochkomplexen und nicht vorhersagbaren Gemisch zu extrahieren. Überdies erfordern sie oft erhebliche Mengen an Energie und/oder zusätzlichen Materialien, was unterm Strich zu einer ungünstigen wirtschaftlichen und ökologischen Bilanz führt.

Deshalb erforschen Wissenschaftler in Japan nun biologische Methoden für die Rückgewinnung wertvoller Elemente, wie etwa den mikrobiellen Metall-Stoffwechsel. Mikroben können Stoffe aus Festkörpern herauslösen, verflüchtigen, adsorbieren oder mineralisieren. Bei diesen Phasenübergängen können chemische Umwandlungen wie Oxidation/Reduktion, Methylierung oder Hydrierung erfolgen.

Ein Beispiel der mikrobiellen Rückgewinnung eines Elements aus Abwasser stellt der Prozess zur Mineralisierung von Selen dar, den Michihiko Ike und Kollegen an der Universität Osaka entwickelt haben. Dieses Element ist in industriellen Abwasserströmen vorhanden, etwa bei der Kupfergewinnung.

In seinen löslichen Formen (Selenate und Selenite) ist es stark giftig und sollte deshalb abgetrennt werden. Es ist außerdem hinreichend selten und wertvoll, um die gezielte Abscheidung aus Abwasser und das anschließende Recycling zu rechtfertigen. Bisher existierende Verfahren zur seiner Rückgewinnung sind allerdings recht ineffizient.

Das Prototyp-Verfahren, das in Osaka entwickelt wurde, benutzt den Bakterienstamm *Pseudomonas stutzeri* NT-1, um die löslichen Selenverbindungen zu elementarem Selen, Se(0), zu reduzieren. Diese gramnegative, aerobe Art war ursprünglich in Biofilmen identifiziert worden, die an Abflüssen mit selenhaltigem Wasser gediehen.¹

Bemerkenswert ist, dass das Bakterium Se(0) als Nanopartikel ausscheidet, die unlöslich und harmlos sind und leicht aus dem flüssigen Medium abgetrennt werden können. Ein Pilotreaktor wurde gebaut, um das Potential dieses Verfahrens zu demonstrieren. Die Forscher untersuchten auch die Option, das Selen über eine methylierte, gasförmige Verbindung zurückzugewinnen, die sich leicht aus der Gasphase abtrennen lässt.²

Ebenso könnte eine bakterielle Reduktion zu einem weniger löslichen Zustand auch auf eine Reihe anderer Metalle angewendet werden, wie etwa: Chrom, Vanadium, Tellur, Palladium, Platin, Uran, und Technetium. Die Anwendung solcher Rückgewinnungsmethoden im größeren Maßstab könnte die kostenintensive Abwasserbehandlung in eine neue, gewinnbringende Rohstoffgewinnung verwandeln.

1) M. Kuroda et al., Journal of Bioscience and Bioengineering 2011, 112, 259-264.DOI: 10.1016/j.jbiosc.2011.05.012

2) T. Kagami et al., Water Research, 2013, 47, 1361-1368

8 Ausblick

Um das übergreifende Ziel einer sauberen, nachhaltigen Wasserversorgung für den Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit zu erreichen, müssen die Probleme der Detektion, Aufarbeitung und Rohstoff-Rückgewinnung auf integrierte Weise angegangen werden, wobei die Quellen der Verschmutzung in Industrie, Landwirtschaft und Haushalten sowie der weitere Verwendungszweck der zurückgewonnenen Rohstoffe berücksichtigt werden müssen.

Die Einzugsgebiete von Flüssen erstrecken sich über Staatsgrenzen hinweg und der Wasserkreislauf umspannt den Globus. Entwaldung in einem Land kann zu einer Dürrekatastrophe in einem anderen führen.

Überdies kann der globalisierte Handel „virtuelles Wasser“ und „virtuelle Umweltverschmutzung“ über große Entfernungen hinweg transportieren, da Produktionsstätten in die Niedriglohn-Länder abwandern und einhergehende Umweltschäden dort verursachen, oft unter weniger strikter behördlicher Regulierung.⁷

Ein Versagen beim Umgang mit Wasser und der Umwelt kann katastrophale Folgen an weit entfernten Orten und zu späterer Zeit nach sich ziehen.

Deshalb benötigt die Sicherstellung der globalen Wasserversorgung eine strategische, langfristige, staatenübergreifende Zusammenarbeit auf einer Ebene wie sie bisher nicht existiert.

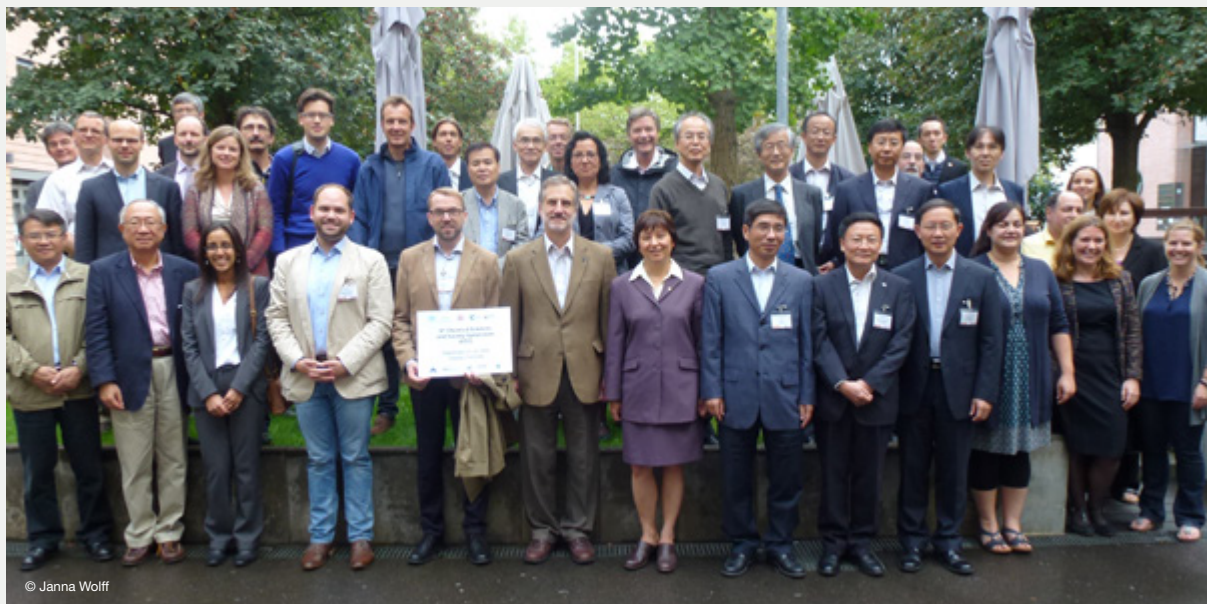
Strategien zur Verbesserung der Versorgungssicherheit müssen von der Grundlagenforschung in allen damit zusammenhängenden Disziplinen ausgehen. Insbesondere die Chemie kann nicht nur technisches Know-How für die Detektion und Abtrennung von Schadstoffen bereitstellen, sondern auch helfen, die komplexen Auswirkungen zu verstehen, die diese wahrscheinlich in der Umwelt verursachen werden und neue Wege zu finden, um diese Schäden zu verringern.

9 Literaturhinweise

- 1 Carbon Visuals, 2014, <http://www.carbonvisuals.com/blog/all-the-accessible-freshwater-in-the-world>
- 2 J. Rockström et al., 2009, *Nature* 461, 472-475.
- 3 NOAA, 2016, <https://www.climate.gov/enso>
- 4 Drewes, J.E., Horstmeyer, N. (2016). Strategien und Potenziale zur Energieoptimierung bei der Wasserwiederverwendung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 298. DOI: 10.1007/s00506-016-0298-3.
- 5 UN-Water, 2013, *Analytical Brief on Water Security and the Global Water Agenda*, www.unwater.org/topics/water-security/en/
- 6 UN-Water, 2014, <http://www.unwater.org/statistics/statistics-detail/en/c/211820/>
- 7 C. J. Vörösmarty et al. *Science* 2015, 349, 478-479.
- 8 Kidd, K.A. et al. 2007, *PNAS* 104(21), 8897-8901.
- 9 M. Eriksen et al., *Marine Pollution Bulletin* 77 (2013) 177–182
- 10 H. K. Imhof et al., 2013, *Current Biology* 23, R867-R868
- 11 R. W. Obbard et al., 2014. *Earth's Future* 2, 315-320.
- 12 A. Fedorenkova, et al., 2010. *Environmental science & technology*, 44, 4328-4333.
- 13 M. Elsner et al., *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 403 (2012), 2471–2491.
- 14 D. Taylor, in: *Still only one Earth: Progress in the 40 years since the first UN conference on the environment*, RSC 2015, p 253-280.
- 15 UN-Water, 2014. A post-2015 Global Goal for water. www.un.org/waterforlifedecade/pdf/27_01_2014_un-water_paper_on_a_post2015_global_goal_for_water.pdf
- 16 C. Ort et al., 2014. *Addiction* 109, 1338-1352.
- 17 Z. Hu et al., 2013. *Appl Environ Microbiol.* 79, 2807-2812.
- 18 Xiaofei et al., 2015. *Chemosphere* 125, 70–85.
- 19 A F Ismail, T. Matsuura, 2016. *Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment*, Energy and Environment. IWA Publishing, ISBN 9781780407951
- 20 Ghauch, A., 2015. *Freiberg Online Geoscience* 38, 1–80.
- 21 Särkkä et al., 2015. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 754, 46-56.
- 22 Brillasa&Martínez-Huitle, 2015. *Applied Catalysis B: Environmental* 166–167, 603–643.
- 23 Was ist der Wasserfussabdruck? <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/wasserfussabdruck>
- 24 W. Cornwall, *Science* 2015, DOI: 10.1126/science.aaa6359

Links waren zum Zeitpunkt der Erstellung (November 2016) aktuell.

10 CS3 Teilnehmer 2015



© Janna Wolff

China

Prof. Dr. Jiuhui Qu (Co-Chair)	Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Prof. Dr. Hu Hong-Ying	Tsinghua University, Beijing
Prof. Dr. Xie Quan	School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology
Prof. Dr. Zhigang Shuai (Liaison)	Tsinghua University, Beijing and Chinese Chemical Society (CCS)
Prof. Dr. Xiaochang Wang	School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology
Prof. Dr. Min Yang	Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Prof. Dr. Gang Yu	School of Environment, Tsinghua University, Beijing

Deutschland

Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Scientific Chair)	University Duisburg-Essen and Centre for Water and Environmental Research / Water Chemistry Society – Division of GDCh
Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes	Technische Universität München (TUM)
PD Dr. Martin Elsner	Helmholtz Zentrum München, Institute of Groundwater Ecology
Prof. Dr. Beate Escher	Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Leipzig and Eberhard Karls University Tübingen
Dr. Michael Gross	Science Writer, Oxford
Prof. Dr. Henner Hollert	RWTH Aachen University

Dr. Wolfgang Wachter	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation), Bonn
Dr. Hans-Georg Weinig (Liaison)	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh, German Chemical Society), Frankfurt am Main
Dr. Arne Wick	Federal Institute of Hydrology BfG, Koblenz
Janna Wolff (Assistance)	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh, German Chemical Society), Frankfurt am Main

Japan

Dr. Hiroaki Tao (Co-Chair)	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Takamatsu
Masahiro Henmi	Toray Industries, Inc.
Prof. Dr. Michihiko Ike	Osaka University
Nobuyuki Kawashima (Liaison)	The Chemical Society of Japan (CSJ), Tokyo
Prof. Dr. Takeshi Komai	Tohoku University, Sendai
Toshiki Nagano, MBA	Japan Science and Technology Agency (JST), Tokyo
Dr. Yasuyuki Shibata	Fellow Center for Environmental Measurement and National Institute for Environmental Studies, Ibaraki
Prof. Dr. Hiroaki Tanaka	Kyoto University

Großbritannien

Prof. Elise Cartmell PhD Cchem FRSC (Co-Chair)	Cranfield University
Dr. Deirdre Black (Liaison)	Royal Society of Chemistry (RSC), Cambridge
Dr. Mindy Dulai (Liaison)	Royal Society of Chemistry (RSC), Cambridge
Dr. Rachel L. Gomes	University of Nottingham
Prof. Katherine Huddersman	De Montfort University, Leicester
Dr. Barbara Kasprzyk-Hordern	University of Bath
Natasha Richardson	Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), Swindon
Dr. Micheal Templeton	Imperial College London

USA

Prof. Dr. Matthew S. Platz (Co-Chair)	The University of Hawaii at Hilo
Prof. Dr. Amy E. Childress	University of Southern California, Los Angeles
Dr. Colby A. Foss, Jr.	National Science Foundation (NSF), Arlington
Dr. Venera A. Jouraeva	Cazenovia College
Christopher M. LaPrade (Liaison)	American Chemical Society (ACS), Washington
Prof. Dr. Bruce E. Logan	Pennsylvania State University
Dr. Brooke K. Mayer	Marquette University, Milwaukee
Prof. Dr. Jerald L. Schnoor	University of Iowa

Herausgeber:

Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh)

Redaktion:

Dr. Hans-Georg Weinig

Gesellschaft Deutscher Chemiker

Varrentrappstraße 40 – 42

60486 Frankfurt am Main

E-Mail: h.weinig@gdch.de

Homepage: www.gdch.de

März 2016 englische Originalversion / deutsche Fassung November 2016

Layout und Satz:

PM-GrafikDesign

63607 Wächtersbach

www.pm-grafikdesign.de



Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
Varrentrappstraße 40 – 42
60486 Frankfurt am Main
www.gdch.de