UNIKATE

2018 | Berichte aus Forschung und Lehre

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

Offen im Denken

51

Herausforderung Wasserforschung

Lokal, regional und global

Michael Eisinger, Torsten C. Schmidt, Bernd Sures	**Regional vernetzt**	8
Eckart Hasselbrink, Eckhard Spohr	**Warum ist Wasser ein ganz besonders edler Tropfen?**	18
Simon Kresmann, Torsten C. Schmidt	**FUTURE WATER**	24
Internationales Autor*innenkollektiv	**How do we want to live tomorrow?**	34
Daniel Hering, Florian Leese, Peter Haase	**Gewässer**	48
Stefan Panglisch, Mathias Ulbricht	**Erfolgreiche Trennungen**	58
Jens Boenigk, Sarah Zydorczyk, Thorsten Mietzel	**Spannende Alleskönner**	70
Torsten C. Schmidt, Bernd Sures, Elke Dopp, Jochen Türk	**Mikroschadstoffe aus Abwasser entfernen**	86
Hans-Joachim Mälzer, Wolf Merkel	**Baden in der Ruhr**	94
André Niemann	**Raus aus der Grube – rein in die Grube**	106
Ulrich Schreiber, Oliver J. Schmitz, Christian Mayer	**Der Ursprung des Lebens**	116

ISSN 1869-3881

I N H A L T

EDITORIAL 6 Michael Eisinger, Torsten C. Schmidt, Bernd Sures

Michael Eisinger, Torsten C. Schmidt, Bernd Sures
Regional vernetzt

8 **Das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung**

In den letzten 15 Jahren hat sich die Wasserforschung an der Universität Duisburg (UDE) zu einem wichtigen und erfolgreichen Schwerpunkt weiterentwickelt. Gebündelt wird diese durch das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU), und zwar nicht nur innerhalb der UDE, sondern auch innerhalb des Ruhrgebiets. Die klassische Grundlagenforschung spielt dabei eine genauso wichtige Rolle wie anwendungsorientierte Fragestellungen, die in Verbundprojekten gemeinsam mit Praxispartnern aus der Region bearbeitet werden.

Eckart Hasselbrink, Eckhard Spohr
Warum ist Wasser ein ganz besonders edler Tropfen?

18 **Erklärungen rund ums H_2O**

Die einmaligen Eigenschaften der Wassermoleküle fassen die Autoren in diesem Überblick zusammen.

Simon Kresmann, Torsten C. Schmidt
FUTURE WATER

24 **Mit Praxispartnern und Gesellschaft wissenschaftlichen Wasser-Nachwuchs ausbilden**

Transdisziplinäre oder gar transformative Ausbildung und Forschung sind die Schlagworte vieler neuer Förderprogramme. Der intensive Einbezug von Praxis und Gesellschaft in Forschung und Ausbildung zeichnet diese Ansätze aus. Ein in seiner disziplinären und thematischen Breite in Deutschlands Wasserforschung einmaliger Ansatz ist das NRW-Fortschrittskolleg FUTURE WATER.

Internationales Autor*innenkollektiv
How do we want to live tomorrow?

34 **Perspectives on water management in urban regions**

Twenty-six young scientists, mainly from Germany and Brazil, participated in the workshop “How do we want to live tomorrow?” and identified four central research topics: a) integrated watershed management in urban regions, b) sustainable sanitation and rain-water management, c) micropollutants and d) information flow and people’s involvement.

Daniel Hering, Florian Leese, Peter Haase
Gewässer

48 **Mehr als Wasser**

Gewässer sind prägende Elemente der Landschaft. Bäche und Flüsse bilden ein dichtes Netzwerk, sie verbinden Landschaftselemente und Siedlungen. Seit jeher nutzt der Mensch die Gewässer auf vielfältige Art und Weise. Diese Nutzungen bleiben nicht ohne Auswirkungen auf den Naturhaushalt und auf die Nutzbarkeit der Gewässer.

Stefan Panglisch, Mathias Ulbricht
Erfolgreiche Trennungen

58 **Innovationen zu Membranverfahren**

Membranverfahren sind ein anerkannt wesentliches Element in einer nachhaltigen Wasserwirtschaft. Seit der Inbetriebnahme der ersten größeren Anlagen zur Wasseraufbereitung mit druckgetriebenen Membranen in den 1960er Jahren entwickelt sich die Membrantechnologie stetig weiter, immer mit den Zielen, Kosten für Investition und Betrieb zu senken und weitere Anwendungsgebiete zu erschließen.

51

Jens Boenigk, Sarah Zydorczyk, Thorsten Mietzel
Spannende Alleskönner 70

Algen und ihre „Anwendungsgebiete“

Die Algen sind keine einheitliche Verwandtschaftsgruppe, sondern umfassen verschiedene Linien der Eukaryoten. Ihnen gemeinsam ist der Besitz von Plastiden, den Zellorganellen, in denen die Photosynthese abläuft. Plastiden finden sich in verschiedenen Linien der Eukaryoten, die allerdings nicht näher miteinander verwandt sind.

Torsten C. Schmidt, Bernd Sures, Elke Dopp, Jochen Türk
Mikroschadstoffe aus Abwasser entfernen 86

Wie messe ich den Erfolg?

Moderne Kläranlagen reinigen Abwasser effizient von leicht abbaubaren organischen Stoffen und Nährstoffen. Sie sind aber nicht für die Eliminierung von Mikroschadstoffen konzipiert, so dass viele dieser Stoffe im Abwasser kaum abgebaut werden und somit über die Vorflut in Oberflächengewässer gelangen. Dieser Artikel geht unter anderem der Frage nach, wie überhaupt Auswirkungen von Gemischen unzähliger Verbindungen im niedrigen Konzentrationsbereich auf Organismen messbar sind.

Hans-Joachim Mälzer, Wolf Merkel
Baden in der Ruhr 94

Vom Forschungsprojekt zum Badespaß

Die Bemühungen der vergangenen Jahrzehnte im vorsorgenden Gewässerschutz haben zwar zu erheblichen Erfolgen in Form einer deutlichen Verbesserung der Ruhrwasserqualität geführt, was den Gesundheitsschutz der mit Trinkwasser aus der Ruhr versorgten Einwohner*innen und die Freizeitnutzung der Ruhr für verschiedene Wassersportarten verbessert hat. Dennoch war die Ruhr aber nicht als Badegewässer ausgewiesen und im Stadtgebiet Essen mit einem Badeverbot belegt. Dies hat sich geändert.

André Niemann
Raus aus der Grube – rein in die Grube 106

Ein untertägiges Pumpspeicherwerk als Bergbaunachfolge im Ruhrrevier

Mit dem Auslaufen des Steinkohlenbergbaus im Jahre 2018 hinterlässt der Bergbau eine umfangreiche Infrastruktur. Schachttiefen von bis zu 1.200 Metern, zahlreiche Ausbauten in der Tiefe und eine großräumige Wasserhaltung eröffnen Perspektiven für Folgenutzungen. Mit untertägigen Pumpspeicherwerken könnte an den heutigen Bergbaustandorten ein Beitrag zur Energiespeicherproblematik verfolgt werden. Ein aktuell laufendes Verbundvorhaben widmet sich ergebnisoffen der Ermittlung dabei zu berücksichtigender Aspekte am Beispiel des Bergwerkes Prosper-Haniel, der letzten verbliebenen Zeche im Ruhrrevier. Es geht 2018 außer Betrieb und bietet damit Perspektiven für eine Folgenutzung am Ende von mehr als 200 Jahren Bergbautradition im Ruhrrevier.

Ulrich Schreiber, Oliver J. Schmitz, Christian Mayer
Der Ursprung des Lebens 116

„Die“ Herausforderung der Wissenschaft

Kein Mensch kann die unendlich erscheinende Zeitspanne ermessen, die das biologische Leben auf unserem Planeten umfasst. Dennoch ist es möglich, fast von Beginn an die Auswirkungen des letzten gemeinsamen Vorfahrens aller Lebewesen zu verstehen. Allein es fehlt die Kenntnis seines Ursprungs.

ABONNEMENT 128

HINWEISE, IMPRESSUM 129

EDITORIAL

Verehrte Leser*innen,

ohne es aktiv wahrzunehmen, nutzen Sie alle tagtäglich die Errungenschaften, zu denen die Wasserforschung insbesondere im vergangenen Jahrhundert intensiv beigetragen hat: Seien es fließendes Wasser aus dem Wasserhahn und der Toilettenspülung oder Naherholungsgebiete sowie Bade-, Sport- und Angelgewässer. Welche Netzwerke, Technik oder Managementkonzepte hinter diesen alltäglichen Dingen unseres Lebens stecken, ist uns häufig nicht wirklich bewusst. Dabei konkurrieren oft verschiedene Nutzungsformen der Ressource Wasser miteinander und wirken sich immer auch auf die Umwelt und auch auf uns Menschen aus. Die zahlreichen Probleme und Herausforderungen, die die Wasserwirtschaft aktuell und in Zukunft zu bewältigen hat, sind immens. Global betrachtet spielen vor allem mangelnde Wasserverfügbarkeit, hygienische Aspekte sowie der Klimawandel eine herausgehobene Rolle. In Deutschland geht es vor allem um Nachhaltigkeit und die Sicherstellung sicherer Ressourcen für die nächsten Generationen. Hier entwickelte Lösungen haben aber auch global eine Vorbildfunktion; nicht umsonst haben deutsche Unternehmen im Wasserwirtschaftssektor einen hohen Weltmarktanteil. Die Wasserforschung unterstützt Wirtschaft und Gesellschaft bei diesen Aufgaben und liefert zukünftige Lösungsansätze. In der aktuellen Ausgabe der UNIKATE möchten wir Ihnen daher einen Einblick geben in die Wasserforschung an der Universität Duisburg-Essen (UDE) und in der Region.

In der Wasserwirtschaft und Wasserforschung haben nur wenige Standorte in Deutschland und weltweit so viel zu bieten wie das Ruhrgebiet. Viele Wasserverbände sowie -unternehmen und Forschungseinrichtungen sind hier lokalisiert. In keiner Region in Deutschland ist die Beschäftigungsdichte in der Wasserwirtschaft größer. Zudem arbeitet man im Ruhrgebiet an einem der größten Infrastrukturprojekte überhaupt, dem Generationenprojekt Emscherumbau. Zahlreiche Forschungsaktivitäten werden dabei am Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU) der UDE gebündelt und vorangetrieben. Die starke regionale Vernetzung des ZWU bietet eine hervorragende Basis um an allem zu forschen, was das einzigartige Molekül H_2O und seine Nutzung ausmacht.

Ein wichtiger Eckpfeiler für gute Forschung ist die Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs. Für Bachelor- und Master-Studierende gibt es kaum eine bessere Adresse als die UDE mit mehreren auf verschiedene Wasser-Aspekte spezialisierten Studiengängen. Auch Promovierende werden hier in mehreren internationalen Programmen und dem regional verankerten Fortschrittskolleg FUTURE WATER zu breit ausgebildeten Fachkräften für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft.

Urbane Agglomerationen wie das Ruhrgebiet oder auch die weltweit zunehmende Zahl von Megacities stellen das Management von Gewässern und Wasserressourcen vor große Herausforderungen. Das renommierte deutsche Know-how im Wassersektor kann vielfach die Situation in anderen Ländern verbessern helfen. Das Ergebnis eines gemeinsamen Workshops deutscher und brasilianischer Nachwuchswissenschaftler *innen, durchgeführt an der UDE als Kooperation mit der Leopoldina, der brasilianischen Akademie der Wissenschaften und dem ZWU, finden Sie als Beispiel in diesem Heft.

Wasser verbindet aber nicht nur in Bezug auf internationale Kooperationen. Flüsse und Bäche verbinden verschiedene Landschaftselemente, Siedlungen und Städte miteinander. Die menschliche Nutzung dieser

v. l. n. r.: Bernd Sures, Torsten C. Schmidt, Michael Eisinger
Fotos: Vladimir Unkovic

Gewässer jedoch hinterlässt ihre Spuren und wirkt sich direkt auf die Natur aus, die diese Gewässer auch als Lebensraum für zahlreiche Arten bereitstellt. So muss Abwasser, bevor es in ein Gewässer eingeleitet wird, aufwendig gereinigt werden. Die konventionellen physikalischen und biologischen Verfahren reichen heutzutage aber oft nicht aus, um auch die zahlreichen neueren Stoffe wie Medikamentenrückstände in ihren sehr geringen Konzentrationen zu entfernen. Daher braucht es neue Verfahrensansätze wie die Membrantechnik, die in verschiedenen Kontexten erfolgreich eingesetzt werden kann. Sehr großes Potenzial bietet auch die Nutzbarmachung von Algen unter anderem auch für die weitergehende Abwasserreinigung. Im Vergleich gut etabliert ist bereits die Nutzung von Ozonung und Aktivkohle, die Bewertung des Einsatzes auf die Gewässerqualität ist aber noch weitgehend offen. Solch neuere Verfahren sind oft noch nicht im großen Maßstab umgesetzt, die Belastung mit Mikroschadstoffen ist aber bereits allgegenwärtig. Daher gehen Wasserforscher *innen auch der Frage nach, welche Wirkung ein Cocktail aus zahlreichen im Wasser gelösten Stoffen auf verschiedene Organismen haben kann und ob zusätzlicher Reinigungsaufwand bei der Behandlung von Abwasser diese Wirkung tatsächlich reduziert.

Wasser ist auch ein Energieträger, und so ging die wirtschaftliche Entwicklung im Zuge der Industrialisierung mit der Wasserkraftnutzung einher. Heute resultieren daraus zahlreiche ökologische Probleme in unseren Fließgewässern, welche mit neuen Konzepten bewertet und gelöst werden können.

Das Ruhrgebiet ist von der Kohle- und Stahlindustrie geprägt worden. Ein Großteil der industriellen Standorte hat sich mittlerweile gewandelt. Und die Bergbaufolgelandschaft konnte so aktiv gestaltet werden. In 2018 endet der Steinkohlebergbau im Ruhrgebiet und das letzte Bergwerk Prosper-Haniel wird schließen. Ein Meilenstein in der Geschichte der Region. Die UDE prüft gemeinsam mit Partnern der Region die Folgenutzungsoptionen dieser Infrastruktur. So wird geprüft, ob nicht der Zugang zur Tiefe mittels eines Pumpspeicherwerkes als Energiespeicher zur Unterstützung des Ausbaus der erneuerbaren Energien genutzt werden kann.

Und noch ein weiterer Meilenstein im Ruhrgebiet: Baden im Baldeneysee ist seit Mai 2017 wieder erlaubt – wenn die hygienischen Bedingungen stimmen. Nachdem in den letzten vier Jahrzehnten trotz einer deutlichen Verbesserung der Ruhrwasserqualität der See nicht als Badegewässer ausgewiesen war, haben Forscher *innen innovative Ansätze zur Gefährdungsbeurteilung, Technologien zur Risikominderung, zu Monitoring- und Frühwarnansätzen sowie zur Risikokommunikation für die Bevölkerung entwickelt.

Obwohl die genauen Vorgänge zur Entstehung des Lebens in seinem Ursprung noch nicht hundertprozentig nachgewiesen werden konnten, steht eines sicher fest: Wasser ist eine essentielle Ressource, deren Verfügbarkeit Grundlage für menschliches Leben, Wohlstand und nicht zuletzt Frieden ist.

Und nun wünschen wir Ihnen eine anregende Lektüre!

Dr. Michael Eisinger
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt
Prof. Dr. Bernd Sures

Michael Eisinger. Foto: Vladimir Unković

In den letzten 15 Jahren hat sich die Wasserforschung an der Universität Duisburg-Essen (UDE) zu einem wichtigen und erfolgreichen Schwerpunkt weiterentwickelt. Gebündelt wird diese durch das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU), und zwar nicht nur innerhalb der UDE, sondern auch innerhalb des Ruhrgebiets. Die klassische Grundlagenforschung spielt dabei eine genauso wichtige Rolle wie anwendungsorientierte Fragestellungen, die in Verbundprojekten gemeinsam mit Praxispartnern aus der Region bearbeitet werden.

Regional vernetzt

Das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung

Von Michael Eisinger, Torsten C. Schmidt & Bernd Sures

In den letzten 15 Jahren hat sich die Wasserforschung an der Universität Duisburg-Essen (UDE) zu einem erfolgreichen und sichtbaren Schwerpunkt weiterentwickelt. Gebündelt wird die Forschung durch das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU), und zwar nicht nur fakultätsübergreifend innerhalb der UDE, sondern auch universitätsübergreifend innerhalb des Ruhrgebietes. Die klassische Grundlagenforschung spielt dabei eine genauso wichtige Rolle wie anwendungsorientierte Fragestellungen, die in Verbundprojekten gemeinsam mit Praxispartnern aus der Region bearbeitet werden. Somit schlägt das ZWU auch eine Brücke in die Wirtschaft und gehört mittlerweile zu den führenden Wasserforschungszentren Deutschlands.

Um zu verstehen, was den „Wasserstandort“ UDE so besonders macht, muss man sowohl einen Blick auf die großen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit werfen, als sich auch mit der jüngeren Geschichte der Entwicklung der Wasserwirtschaft in der Region befassen.

Urbanes Wasser – DER Fokus für die Zukunft

Die Ressource Wasser ist die Grundlage jedweden Lebens auf der Erde. Hieraus ergibt sich die unbedingte Notwendigkeit eines nachhaltigen Umgangs mit diesem Medium sowie die Verpflichtung einer wasserorientierten, interdisziplinären Forschung zur dauerhaften Sicherstellung ausreichender Wasserressourcen adäquater Qualität und zur Implementierung notwendiger Wasserinfrastrukturen. Derzeit werden rund

660 Millionen Menschen nicht mit sauberem Trinkwasser versorgt, während etwa 2,4 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Sanitäreinrichtungen beziehungsweise geregelter Abwasserentsorgung haben. Die daraus resultierenden Probleme sind vielfältig und reichen von Trinkwasserknappheit bis hin zum Tod durch wasserbürtige Schadstoffe und Erreger. Nach einer Studie von McKinsey wird im Jahr 2030 die globale Nachfrage nach Wasser das Angebot um 40 Prozent überschreiten. Tatsächlich gelten wasserbedingte Probleme sogar als eines der globalen Risiken unserer Zeit. So gehören laut Global Risk Report 2017 Wetterextreme, mangelnder Klimaschutz und unzureichende Anpassung an den Klimawandel, Biodiversitätsverluste und Ökosystemzusammenbrüche sowie Wasserkrisen zu den Bedrohungen mit den potentiell größten negativen Auswirkungen bei gleichzeitig hoher Eintrittswahrscheinlichkeit. Zudem kommt dem urbanen Raum aufgrund der fortschreitenden Urbanisierung eine besondere Bedeutung zu. Daher wird neben der Sicherstellung von und dem Zugang zu einwandfreiem Trinkwasser in vielen Teilen der Erde die Gestaltung eines intelligenten und ressourcenschonenden Wasserkreislaufes in urbanen Räumen zukünftig von maßgeblicher Bedeutung sein.

In rasant wachsenden Ballungsräumen und Megacities stoßen dabei unterschiedliche Nutzungsinteressen unmittelbar aufeinander. Dies erfordert technisch hoch entwickelte und aufeinander abgestimmte Lösungen, um die konkurrierenden Anforderungen an Wasser und Gewässer als essentielles Lebensmittel, als Abwasser, als Energieträger, als Lebensraum sowie als Gestaltungselement für Freizeitnutzung und zur Klimaverbesserung nutzen zu können, ohne dauerhaft negativ in den natürlichen Wasserkreislauf eingreifen zu müssen. Nutzungsinteressen und Konflikte werden auf lange Zeit maßgeblich treibende Kräfte einer wasserbezogenen Forschung zur Deckung des Innovationsbedarfs sein. Der im Vergleich zu früheren Zeiten massiv beschleunigte Entwicklungsprozess hin zu urbanen Agglomerationen lässt in vielen Teilen der Welt kaum noch eine solide und grundlegende Planung der Wasserinfrastrukturen zu, so dass die Entwicklung von jeweils angepassten und zugleich flexiblen Lösungen und Governance-Strukturen als Sprunginnovation begriffen werden muss.

Aus all diesen Gründen misst die International Water Association (IWA) seit einigen Jahren dem Themenfeld „Urbanes Wasser“ eine herausragende Bedeutung bei. Auch die IWA ist überzeugt, dass die zentralen Probleme der sicheren Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung neue konzeptionelle und technische Lösungen erfordern, um mit den rasanten Entwicklungen der Urbanisierung vor allem in den asiatischen, afrikanischen und lateinamerikanischen Ländern Schritt zu halten.

Den Herausforderungen gegenüber steht ein wirtschaftliches Potenzial mit weltweit erheblicher Bedeutung. McKinsey schätzt die jährlichen Ausgaben im traditionellen Wassersektor auf fast 500 Milliarden Dollar für 2005 und prognostizierte einen Anstieg auf fast 800 Milliarden Dollar bis 2016. Schon heute gelten dabei die deutschen Anlagenbauer in der Wassertechnologie weltweit als zweitgrößte Exporteure (nach den USA).

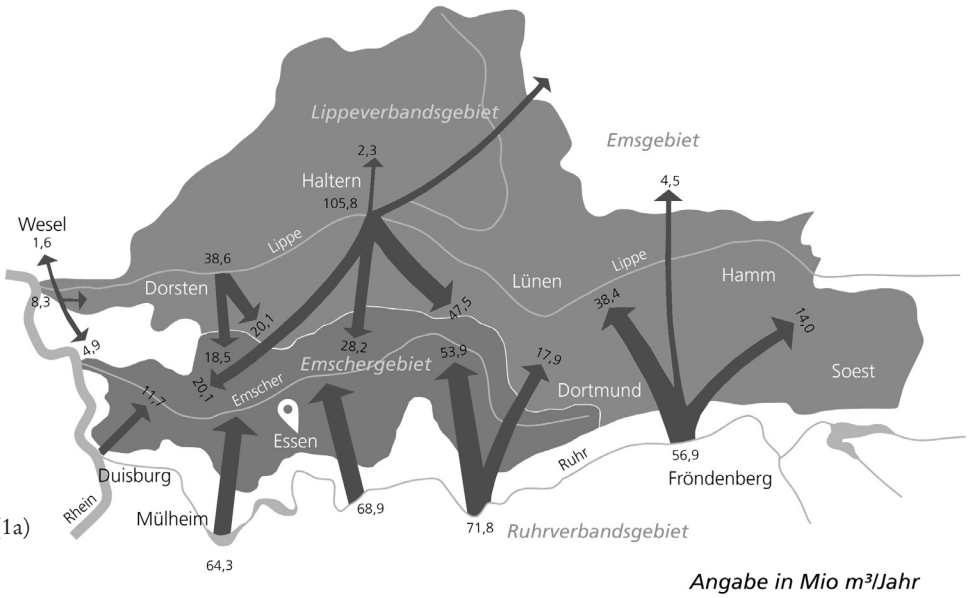
Das Ruhrgebiet als Wasserkompetenzstandort

Über 250 Jahre stetiger Wandel mit Innovation

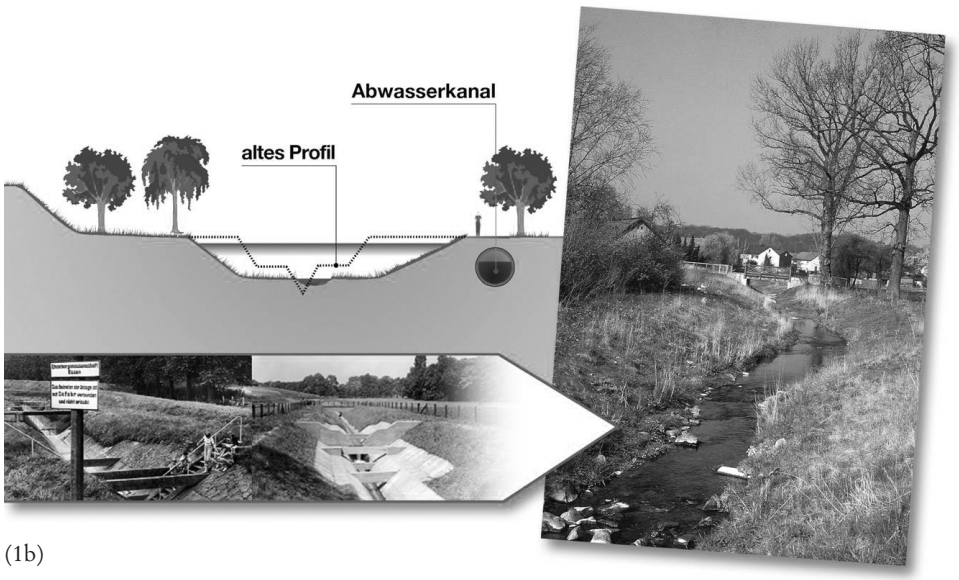
Nur wenige urbane Räume weltweit haben sich in den letzten 250 Jahren wiederholt so grundlegend gewandelt wie das Ruhrgebiet. Entsprechend lassen sich aus der Entwicklung des Ruhrgebietes die aus den verschiedenen Nutzungen resultierenden Anpassungen der Wasserinfrastruktur inklusive der entsprechenden Oberflächengewässer eindrucksvoll nachvollziehen. Im Zuge der Industrialisierung mit lang andauernden ausgeprägten Wachstumssituationen rund um den Bergbau und die Montanindustrie war es dauerhaft erforderlich, die Wasserinfrastruktur massiv umzubauen und den neuen Erfordernissen anzupassen. Der Wasserbedarf der Industrieagglomeration im Emschergebiet erreicht ein Vielfaches des natürlichen Wasserdargebots. Daher wird Trinkwasser aus dem Lippeeinzugsgebiet (Stever) und aus der Ruhr importiert, während die Emscher und ihre Nebenläufe zur Sicherstellung der Gesundheit der Bevölkerung als oberirdische Abwassersammelsysteme ausgebaut wurden (vgl. Abb.1a).

Zusätzlich entstand ein dichtes Netz an Schifffahrtskanälen und Häfen in der Region, so dass sich eine funktionierende Wasserwirtschaft im Sinne der verschiedenen Nutzungen des Wassers im Ruhrgebiet etablieren konnte. Entsprechend den vorhandenen Oberflächengewässern und Grundwasservorkommen entwickelte sich eine Zusammenarbeit über Stadtgrenzen hinweg, die es erlaubte, die gesamte Region wasserwirtschaftlich nahezu im Konsens zu bewirtschaften. Mit dem absehbaren Ende des subventionierten Steinkohlebergbaus im Ruhrgebiet sowie dem damit verbundenen Strukturwandel befindet sich die Metropole Ruhr heute auf dem Weg zu einer modernen Dienstleistungsregion.

Dieser grundlegende Wandel von einer Region des Bergbaus und der Schwerindustrie hin zu einer urbanen Kulturlandschaft bringt wieder umfangreiche Umnutzungen von Flächen und entsprechende Anpassungen im Wassersektor mit sich. Während diesbezüglich in früheren Zeiten die Trink- und Abwasserwirtschaft im Vordergrund des Handelns stand, gewinnen in jüngster Zeit auch die mit Gewässern verbundenen Möglichkeiten der Umfeldverbesserung und Klimamelioration



(1a)



(1b)

(1a,b) Wassermengen und Verteilungswege für die Wasserversorgung des Ballungsraums Ruhrgebiet (oben) sowie Trennung der Abwasser- und Reinwasserführung beim Umbau des Emschersystems (unten). Quelle: modifiziert nach Vorlagen von der EGLV (Emschergenossenschaft und Lippeverband)

an Bedeutung. Eine der größten Zukunftsinvestitionen in der Metropole Ruhr ist der aktuell laufende Umbau des Emschersystems, der Wasser- und Abwasserfragen wieder mit Freizeitgestaltung der Bevölkerung (Emscher Landschaftspark) und Inwertsetzung von Grundstücken verbindet. Hier arbeitet die Emschergenossenschaft in einem Programm für circa 4,5 Milliarden Euro über 30 Jahre an der Umgestaltung des offenen Abwassersystems zu einem neuen Gewässersystem im Ballungsraum, das ökologische, stadtklimatische und Naherholungs-Funktionen erfüllt (vgl. Abb. 1b). Der bedeutendste Baustein ist dabei das „Neue Emschertal“ entlang des Emscher-Hauptlaufes als der zentralen „Grünen Mitte“ der neuen Metropole Ruhr. Im 2006 vorgestellten Masterplan „Emscher-Zukunft“ sind Hochwasserschutz und eine dezentrale Regenwasserbewirtschaftung von besonderer Bedeutung. So hatte sich die Region verpflichtet, bis 2015 15 Prozent des Siedlungsbestandes vom Kanalnetz abzukoppeln. Aber auch die durch den Ruhrverband organisierte Wasserführung der Ruhr, die über eine Vielzahl von Talsperren und Ruhrstauseen reguliert wird, zeigt das im Ruhrgebiet vorhandene Know-how im Bereich nachhaltiger Nutzbarmachung von Gewässern in Ballungsräumen. Die aktuellen Fragen energieoptimierter Abwasserentsorgungssysteme und Kreislaufbetrachtung für Spurenstoffe und Industriechemikalien werden in dem hoch verdichteten Ballungsraum besonders intensiv angegangen. Diesbezüglich hat die hohe Gewässerbelastung an der unteren Ruhr

frühzeitig zur Entwicklung neuartiger Verfahrenskombinationen zur Trinkwasseraufbereitung geführt, wie das weltweit bekannte Mülheimer Verfahren zeigt.

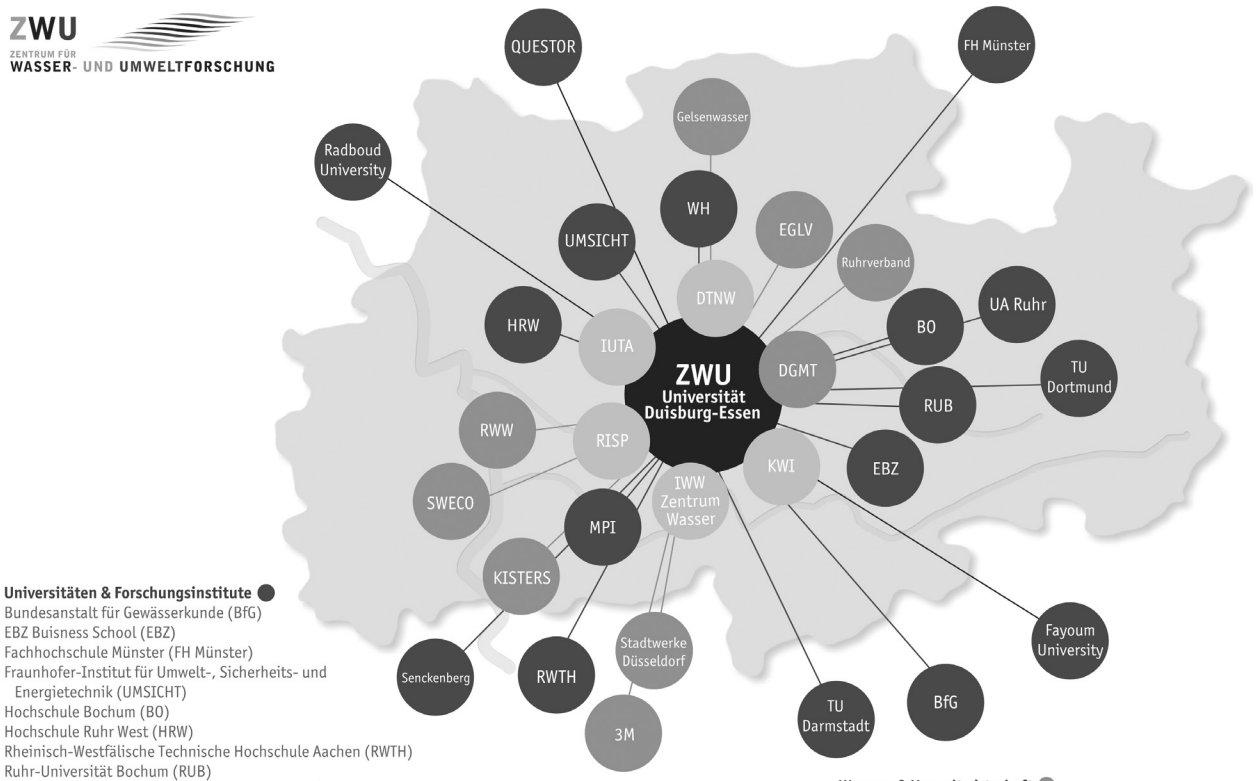
Die hier beschriebenen Prozesse des Auf- und Umbaus von Wasserinfrastrukturen im Ruhrgebiet können stellvertretend für die generell mit Wachstums- und Transformationsprozessen einhergehenden Anpassungen im Wassersektor in den Ballungsräumen der Entwicklungs- und Schwellenländer sowie den Megacities gesehen werden. Die Anpassung, Erweiterung und Übertragung des vorhandenen Wissens hilft, die Nutzung von Wasserressourcen in den boomenden Regionen der Welt zu strukturieren und bietet gleichzeitig Perspektiven für eine integrierte, nachhaltige Wasserwirtschaft, die die teilweise konkurrierenden Wassernutzungen intelligent kombiniert.

Wasserkompetenz als Wirtschaftsfaktor

Das Ruhrgebiet verfügt wie weltweit keine andere Region über Kenntnisse und mögliche Lösungswege wasserbezogener Probleme in allen Phasen einer wirtschaftlich und demographisch veranlassten Entwicklung. Entsprechend der vielfältigen Aus- und Umbauten von Gewässern und Wassersystemen (inkl. Trink- und Abwassernutzung) liegt in der Metropole Ruhr eine in Europa wohl einmalige Dichte von „Wasserkompetenz“ vor. Dies spiegelt sich in den hohen Beschäftigungszahlen in diesem Sektor wider, die im deutschlandweiten Vergleich aufgrund der Vielzahl der Akteure mit Abstand die höchsten sind. So sind zum Beispiel von den 343 Mitgliedern der German Water Partnership rund ein Drittel in einem Radius von 200 Kilometern um Essen angesiedelt. Dazu gehören die sondergesetzlichen Wasserverbände, die großen Trinkwasserversorger, Netzbetreiber und zahlreiche weitere in der Wasserwirtschaft tätige Einrichtungen. Daneben sind in der Region zahlreiche KMUs als Produktentwickler oder Dienstleister im Wassersektor aktiv.

Wasserkompetenz in der Forschung

Eine zentrale Rolle in der Wasserforschung übernehmen die drei Univer-



(2) ZWU-Partner.
Quelle: ZWU

sitäten der Universitätsallianz Ruhr (UA Ruhr), die Universität Duisburg-Essen mit ihren An-Instituten, die Ruhr-Universität Bochum und die Technische Universität Dortmund. Auch mehrere Fachhochschulen, kleinere Wasserforschungsinstitute sowie das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Oberhausen tragen zur einmaligen Forschungsstärke der Metropole Ruhr im Wasserfach bei.

Dazu kommt ein hohes Forschungsinteresse bei den Wasserverbänden und Trinkwasserversorgern, was sich in einer starken Beteiligung an Verbundprojekten widerspiegelt, die mit der Unterstützung, in Einzelfällen sogar auf Initiative der Verbände, konstituiert wurden. So waren beispielsweise die Emschergenossenschaft und der Lippeverband zentral an dem BMBF-KLIMZUG-Verbundprojekt „Dynamische Anpassung regionaler Planungs- und Entwicklungsprozesse an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region (Ruhrgebiet, DYNAKLIM)“ beteiligt, der Ruhrverband und RWW an dem Verbundprojekt „Sichere Ruhr: Badegewässer und Trinkwasser für das Ruhrgebiet“, das im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf (RiSKWa)“ innerhalb des BMBF-Förderschwerpunkts „Nachhaltiges Wassermanagement“ gefördert wurde (Koordination durch das IWW Zentrum Wasser). Gleiches gilt für das Engagement der Industrie- und Praxispartner in den Projekten innerhalb des Klimaschutzplans NRW und den EU-Forschungsprogrammen.

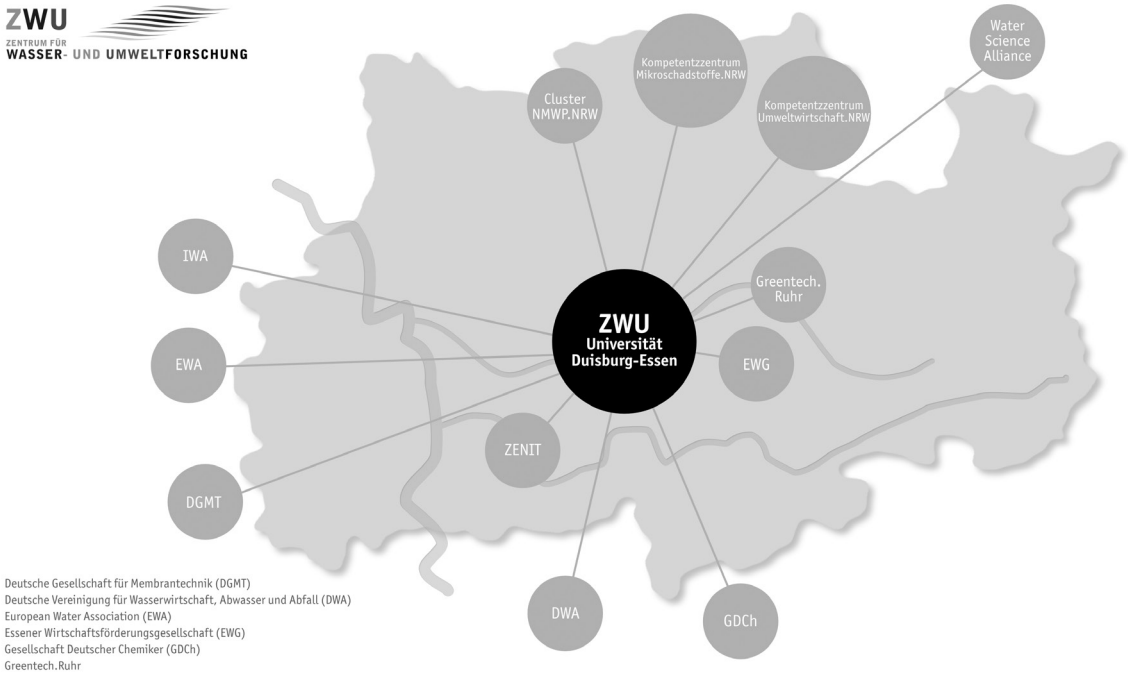
Vernetzung seit 15 Jahren: das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung als regionale Plattform für inter- und transdisziplinäre Forschung

An der Universität Duisburg-Essen wird die Wasserforschung im Zentrum für Wasser- und Umweltforschung fakultätsübergreifend gebündelt. Das ZWU vernetzt als zentrale und personell ausgestattete Einrichtung derzeit 150 Mitglieder aus 22 Arbeitsgruppen und 6 Fakultäten der UDE. Ziel des ZWU ist es, moderne Umweltforschung voranzutreiben, die die globalen gesellschaftlichen Veränderungen (Bevölkerungszuwachs, Urbanisierung und Mega-Cities, Global Change und Klimawandel, Luftqualität, Wasserverfügbarkeit, Mobilität, nachhaltige Energieversorgung etc.) mit der Umwelt koppelt und die Auswirkung auf den Menschen untersucht. Schwerpunkt im ZWU ist die Wasserforschung mit einer sehr breit gefächerten Expertise in den Bereichen Gewässerökologie, Trinkwasseraufbereitung und -verteilung (Kontamination, Bewertung, Sanierung), Umwelttoxikologie und -chemie, Wasser- und Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie, Wasserbau sowie Water Governance mit ökonomischen und rechtlichen Kompetenzen. Das Alleinstellungsmerkmal des ZWU gegenüber anderen Wasserforschungszentren in NRW, aber auch bundesweit, ist die in großen Verbundvorhaben gelebte Interdisziplinarität mit Partnern aus Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts-, Gesellschafts- und Sozialwissenschaften, die die Entwicklung innovativer Systemkomplettlösungen erlaubt.

Auch die beiden im Wasserbereich tätigen An-Institute der Universität, das IWW Zentrum Wasser und das Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), sind im ZWU vertreten und wirken mit anwendungsorientierten Forschungsprojekten als Brücke in die Praxis der Wasserversorgung und -aufbereitung. Gemeinsam mit dem RISP (Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung e.V.) tragen sie erheblich zur großen Dichte wasserrelevanten Know-hows in der Region bei. Neben der universitätsinternen Bündelung der Wasserforschung konnte das ZWU in den letzten Jahren auch die Wasserexpertise der beiden Partneruniversitäten in der UA Ruhr integrieren. Dazu kommen Fachleute von den beiden öffentlichen Fachhochschulen Hochschule Ruhr West und Westfälische Hochschule sowie der privaten Fachhochschule EBZ Business School.

Das ZWU fungiert jedoch nicht nur als Netzwerk für die wasserbezogenen Forschungseinrichtungen der Region, sondern forciert auch die Integration wirtschaftlicher und kommunaler Vertreter sowie der Fachbehörden des Landes NRW, wie die zahlreichen gemeinsamen Forschungsvorhaben und die Einbindung in die Lehre zeigen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle die 2012 erfolgte Verortung der Deutschen Gesellschaft für Membrantechnik (DGMT) am ZWU und die damit verbundene Einbindung von etwa 100 Unternehmen (inkl. KMU) und weiteren Forschungseinrichtungen in das Netzwerk. Abbildung (2) gibt einen Überblick aller am ZWU beteiligten Partner sowohl aus dem akademischen Bereich (Universitäten und Forschungseinrichtungen, An-Institute) als auch aus der Wasser- und Umweltwirtschaft.

Der Mehrwert der regionalen Vernetzung der in der Wasserforschung relevanten Akteure liegt auf der Hand: Sie verhindert eine Fragmentierung des Wissens auf die an den einzelnen Standorten verteilten Bereiche und erlaubt eine holistische Bearbeitung relevanter Themen unter Einbezug starker außeruniversitärer Partner. Diese haben über die ZWU-Plattform Zugang zu aktueller Grundlagenforschung, können aber auch eigene Themen in gemeinsame Forschungsprojekte einfließen lassen. Darüber hinaus garantiert die Einbindung von außeruniversitären Vertretern in die Lehre einen hohen Praxisbezug und erlaubt im Gegenzug den direkten Kontakt der Wirtschaft zu herausragenden Absolvent*innen der verschiedenen wasserbezogenen Studiengänge. Die Rekrutierung von zukünftigen Mitarbeiter*innen stellt



(3) ZWU-Netzwerk.
Quelle: ZWU

in Zeiten des prognostizierten Fachkräftemangels einen nicht zu unterschätzenden Gewinn für die Partner dar. Die naturwissenschaftliche und technische Breite in der Ausbildung und damit der zur Verfügung stehende potentielle Nachwuchspool ist dabei in Deutschland einmalig: Die Universität Duisburg-Essen bietet insgesamt drei internationale und interdisziplinäre Wasser-Masterstudiengänge (Water Science, Transnational ecosystem-based Water Management, Management and Technology of Water and Wastewater), einen Masterstudiengang mit ausgeprägter Wasserkomponente (Environmental Toxicology) sowie drei Masterstudiengänge mit einer möglichen Vertiefung im Wasserbereich (Mechanical Engineering, Bauingenieurwesen – Infrastruktur und Umwelt, Maschinenbau – Energie- und Verfahrenstechnik) an.

Das ZWU ist in zahlreiche regionale, nationale und internationale Netzwerke eingebunden (siehe Abb. 3). Auf regionaler Ebene ermöglicht dies eine noch effektivere Abstimmung von Forschungsaktivitäten, eine Bündelung und Ergänzung von Kompetenzen im Wassersektor und damit eine Erhöhung sowohl der nationalen und internationalen Sichtbarkeit der Wasserforschung als auch der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Dazu zählen das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, das Kompetenzzentrum Umweltwirtschaft.NRW, das Landescluster NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW, GreentechRuhr und das Zentrum für Innovation und Technik in Nordrhein-Westfalen (ZENIT). Innerhalb der Stadt Essen hat sich in den vergangenen Jahren die intensive Zusammenarbeit mit der Essener Wirtschaftsförderungsgesellschaft bewährt.

Auf nationaler Ebene seien die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) und die Deutsche Gesellschaft für Membrantechnik (DGMT; am ZWU) genannt. Seit 2013 ist das ZWU-Mitglied der Water Science Alliance, in deren Fokus die Synergiebildung zwischen den Kompetenzträgern und die Förderung junger Wissenschaftler*innen stehen. Darüber hinaus ist das ZWU in mehrere internationale Netzwerke eingebunden wie zum Beispiel in das „QUESTOR Centre“ an der Queens University in Belfast, einem Industry/University Cooperative Research Centre. Über das IWW ist ein Zugang zum europäischen Netzwerk „Aqua Research Collaboration“ (ARC) gegeben.

Sowohl die universitätsübergreifende Kooperation in der Wasserforschung innerhalb der UA Ruhr als auch die Einbindung von weiteren Forschungseinrichtungen und Praxispartnern der Region hat im ZWU bereits Tradition. Bei einer Reihe aktueller oder zurückliegender Forschungsaktivitäten mit Verbundcharakter sind jeweils Wissenschaftler*innen mehrerer UA Ruhr-Universitäten und Wasserverbände beziehungsweise Unternehmen beteiligt. So koordinierte das ZWU unter anderem von 2011 bis 2014 das BMBF-Landmanagementprojekt „Nachhaltige Kulturlandschaft in der Metropole Ruhr“ (KuLaRuhr), an dem insgesamt fünf

Universitäten, die Landwirtschaftskammer NRW, der Regionalverband Ruhr, Emschergenossenschaft/Lippeverband, die Stadt Bottrop sowie die Rechtsanwaltskanzlei Heinemann und Partner beteiligt waren. Besonders hervorheben möchten wir das seit 2014 vom Ministerium für Kultur und Wissenschaft geförderte und vom ZWU koordinierte NRW-Fortschrittskolleg FUTURE WATER, ein strukturiertes Promotionsprogramm, das spezifische Fragestellungen zur Nutzung des Wassers im urbanen Raum thematisiert und von einem wissenschaftlichen Betreuerteam der UDE, Ruhr-Universität Bochum, Hochschule Ruhr-West, EBZ Business School, Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. und des Kulturwissenschaftlichen Instituts Essen begleitet wird (siehe Artikel von Simon Kresmann und Torsten C. Schmidt in diesem Heft). Zahlreiche Partner aus der Praxis garantieren den Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft und Öffentlichkeit. Zurzeit beläuft sich das jährliche Forschungsvolumen am ZWU auf rund zehn Millionen Euro.

Mittlerweile haben sich diese Kooperationen soweit etabliert, dass hierauf aufbauend das ZWU als Anlaufstelle für die Initiierung und Koordination großer inter- und transdisziplinärer Forschungsverbünde zwischen den regionalen Forschungseinrichtungen und der Wasserwirtschaft genutzt wird. Darüber hinaus bündelt das ZWU die Entwicklung von fachübergreifenden Masterprogrammen (siehe weiter vorne in diesem Artikel) und koordiniert eine gemeinsame Öffentlichkeitsarbeit sowie das Einwerben fachübergreifender Stipendienprogramme.

Vision: Wasserkompetenzzentrum mit eigenem Forschungsgebäude

Das ZWU mit seiner Geschäftsstelle an der UDE sieht sich auch zukünftig als Kristallisationspunkt für anspruchsvolle interdisziplinäre Forschung. Basierend auf den bisherigen Erfolgen ist das ZWU entsprechend bestrebt, sich als überregional und international sichtbares Zentrum in der Wasserforschung zu etablieren. Hierzu existieren weitergehende Planungen, die auch den Bau eines Forschungsgebäudes beinhalten. Inhaltliches Ziel in den nächsten Jahren ist die Weiterentwicklung und Umsetzung eines Forschungsprogramms, das kontinuierlich an neue Herausforderungen der nationalen und internationalen Wasserforschung und -wirtschaft angepasst wird.

Summary

The ZWU was founded in 2003 with the aim of advancing modern environmental research, which links global social changes and challenges such as population growth, urbanisation and megacities, climate change, water availability and sustainable energy supply with environmental concerns and integrates their effects on human life. This kind of research is primarily interdisciplinary and ranges from natural and engineering sciences to medical and social sciences and economics. The main focus of the ZWU activities is on water research, with a broad spectrum of expertise in the fields of water ecology, drinking water treatment and supply (contamination, evaluation, and purification), environmental toxicology and chemistry, urban water management, hydrology, hydraulic engineering, and water governance, including competencies in water economy and law. The "core" of the ZWU at the University of Duisburg-Essen (UDE) currently comprises 22 research groups from the Faculties of Biology, Chemistry, Engineering and Medicine, with approximately 150 researchers. Besides bringing together water research at the University of Duisburg-Essen, the ZWU managed to integrate the water expertise of the two partner universities of the University Alliance Ruhr. This cross-university cooperation has proven its value in a series of running and completed joint research activities, and many joint publications. Examples include the ZWU-coordinated PhD training program "Fortschrittskolleg FUTURE WATER" (funded by the Ministry of Culture and Science of the State of North Rhine-Westphalia) and the collaborative research project "Sustainable Cultural Landscape in the Metropolitan Ruhr Region" (funded by the German Federal Ministry for Education and Research).
The ZWU is supported in its work by an entire network of strong regional partners. Among these are the IWW Water Centre and the Institute of Energy and Environmental Technology e.V. (IUTA), research institutes associated with UDE which function as a bridge to industrial partners in the field of water supply and water treatment. Together with the Rhine Ruhr Institute for Social Research and Political Consultancy (RISP), they significantly contribute to the high density of water-related know-how in the region. The ZWU, however, is not only the hub of a regional network of water-related research facilities, it also integrates commercial (many SMEs from consulting agencies to water technology companies, water suppliers, and water boards) and municipal representatives as well as state authorities (North Rhine-Westphalia) into common research initiatives and integrates these partners into teaching and research.

Die Autoren

Michael Eisinger studierte von 1988 bis 1994 Biologie an der Karl-Ruprechts-Universität Heidelberg, absolvierte ein Erasmus-Auslandssemester an der Universidad de Granada (Spanien) und studierte von 1994 bis 1995 Meeresbiologie an der Northeastern University, Boston, USA.

Er promovierte an der Universität Duisburg-Essen bei Prof. H. Schuhmacher über ökologische und ökonomische Aspekte einer Korallenriffrehabilitationsmethode mit zahlreichen Aufenthalten in Ägypten und Jordanien (Abschluss 2005). In dieser Zeit arbeitete Michael Eisinger auch an mehreren nationalen und internationalen Projekten der Arbeitsgruppe mit, darunter das EU-Projekt „NOMATEC“ (Novel Marine Technologies) mit regelmäßigen Forschungsaufenthalten auf Korsika.
Von 2003 bis 2007 arbeitete er regelmäßig im Jemen als freier Mitarbeiter für das britische Consulting-Unternehmen MacAlister Elliott & Partners Ltd. und war sowohl als Ausbilder für Projektangestellte von UNDP- und Weltbankprojekten, als auch als Wissenschaftler und als Gutachter im Rahmen von Umweltverträglichkeitsstudien tätig. Beispiele für seine Trainer-Aktivitäten sind Kurse zur Etablierung und zum Management von Naturschutzgebieten sowie Kurse zu marinen Bestandserhebungs- und Monitoring-Methoden. 2006 kehrte er an die Universität Duisburg-Essen zurück und war bis 2007 Koordinator des Programmbereiches „Wasser“ am Zentrum für Mikroskalige Umweltsysteme (ZMU). Zu seinen Aufgaben zählten die Konzeption, Planung und Betreuung von wissenschaftlichen Projekten sowie die Anbahnung von nationalen und internationalen Hochschulkooperationen.
Seit 2007 ist Michael Eisinger Geschäftsführer des Zentrums für Wasser- und Umweltforschung (ZWU) an der UDE.

Bernd Sures studierte von 1988 bis 1993 in Bochum Biologie und Chemie. Von 1993 bis 1996 promovierte er an der Universität Karlsruhe über das Thema der Schwermetallanreicherung in Fischen und ihren Parasiten. Als wissenschaftlicher Assistent hat er im Jahr 2002 im Fach Zoologie seine Habilitation im Überschneidungsbereich zwischen Parasitologie und Ökotoxikologie durchgeführt, um dann weiterhin in Karlsruhe als Hochschuldozent zu arbeiten. Seit 2006 ist er Professor für Zoologie und Hydrobiologie und leitet die Abteilung Aquatische Ökologie an der Universität Duisburg-Essen. Seine Forschungsschwerpunkte liegen weiterhin im Bereich parasitologischer und ökotoxikologischer Projekte in aquatischen Systemen. Aktuelle Verbundforschungsprojekte mit regionalen Wasserverbänden konzentrieren sich auf in-vivo Untersuchungen zur Wirksamkeit von Pulveraktivkohleanwendungen und Ozonierungsverfahren auf Kläranlagen.

Torsten C. Schmidt hat seit 2006 den Lehrstuhl für Instrumentelle Analytische Chemie an der Universität Duisburg-Essen (UDE) inne. Er studierte Chemie an der Universität Marburg und promovierte 1997 in Analytischer Chemie. Nach PostDoc- und Assistentenzeit an der EAWAG/ETH Zürich und der Universität Tübingen habilitierte er 2006 in Hydrogeochemie und Umweltanalytik. Torsten C. Schmidt ist neben seiner Professur wissenschaftlicher Direktor für Wasserchemie am IWW Zentrum Wasser in Mülheim/Ruhr, Vorsitzender des Zentrums für Wasser- und Umweltforschung an der UDE und seit dem Januar 2013 Vorsitzender der Wasserchemischen Gesellschaft – Fachgruppe in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh). Seine Forschungsinteressen umfassen Substanzspezifische Isotopenanalytik, Trenntechniken, Extraktions- und Anreicherungsverfahren, Wasserchemie und technologie mit Schwerpunkten auf Sorption und Oxidationsverfahren. Seit 2014 ist Schmidt Sprecher des vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Fortschrittskollegs FUTURE WATER. Für seine wissenschaftlichen Arbeiten im Grenzbereich der analytischen und Wasserchemie wurde er 2013 mit dem Fresenius-Preis der GDCh ausgezeichnet.

Bernd Sures. Foto: Vladimir Unkovic

Die einmaligen Eigenschaften der Wassermoleküle fassen die Autoren in diesem Überblick zusammen.

Warum ist Wasser ein ganz besonders edler Tropfen?

Erklärungen rund ums H_2O

Von Eckart Hasselbrink & Eckhard Spohr

Man sucht gemeinhin nach seltenen und wertvollen Materialen! Aber selbst auf dem Mars suchen Wissenschaftler*innen nach Wasser. Wasser gehört in eine andere Kategorie. Ohne Wasser können wir uns die Existenz von Leben nicht vorstellen. Warum kann aber gerade ein kleines, unscheinbares Molekül wie das Wassermolekül, H_2O, Eigenschaften haben, die es nach allgemeiner Auffassung zu einer universellen Voraussetzung für jedwedes Leben machen? Schließlich gibt es viele kleine Moleküle.

Wasser besteht aus drei Atomen: einem Sauerstoffatom in der Mitte, das links und rechts je ein Wasserstoffatom bindet. Die Atome sind aber nicht linear, sondern stark gewinkelt angeordnet (Abb. 1). Das ist alles noch nichts Besonderes. Was sind aber die außergewöhnlichen Eigenschaften des Wassermoleküls, die Wasser zu einem ganz speziellen Stoff machen?

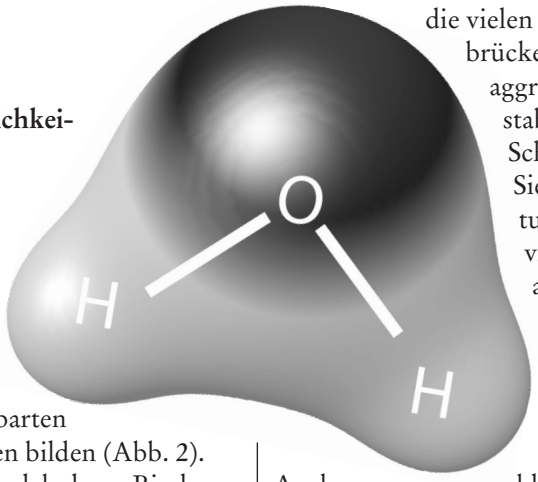
Dipol

Die beiden Wasserstoffatome sind leicht positiv geladen, das Sauerstoffatom negativ. Da das Wassermolekül gewinkelt ist, wird es dadurch selbst polar, hat eine positive und eine negativ geladene Seite. Dadurch kann es sehr leicht ionische Verbindungen (z.B. Kochsalz) auflösen und damit für chemische Reaktionen in Lösung verfügbar machen. Ionen, also geladene Atome, wechselwirken stark mit anderen Ionen, da sie sich abstoßen beziehungsweise anziehen. Die kleinen Wassermoleküle können sich in vielfältiger Weise um diese gelöste Substanzen arrangieren, wobei dann jeweils das Ende zu dem Ion zeigt, das die entgegengesetzte Ladung trägt. Dies nennt man eine Hydratschale. Die Polarität und die Beweglichkeit der Wassermoleküle sorgen auch dafür, dass im Mittel die anziehenden beziehungsweise abstoßenden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Ionen

Eckart Hasselbrink. Foto: Vladimir Unkovic

abgeschirmt werden. Ähnliches gilt auch für polare Moleküle wie zum Beispiel Zucker. Dies sorgt einerseits für Stabilität und andererseits für Beweglichkeit in räumlichen Strukturen, wie sie in lebenden Organismen, zum Beispiel in der Zelle, vorkommen.

(1) Ein Wassermolekül besteht aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen, die beiden Bindungen bilden einen Winkel von 104.5°. Die Schattierung deutet an, dass das Sauerstoffende einen Überschuss an negativer Ladung aufweist, wohingegen auf der anderen Seite bei den Wasserstoffatomen die positive Ladung überwiegt.



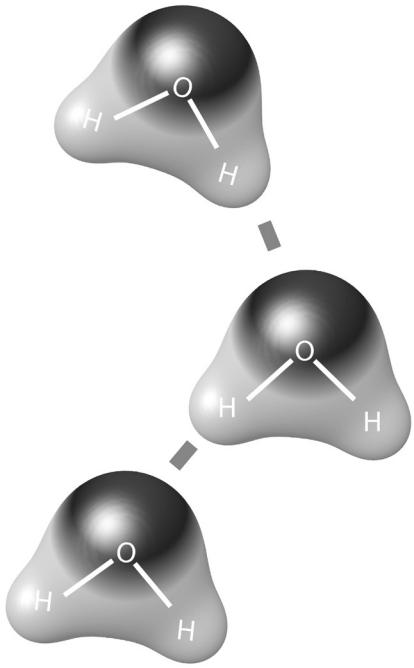
Bindungsmöglichkeiten

Darüber hinaus kann Wasser aufgrund seiner polaren Struktur sogenannte Wasserstoffbrücken zu benachbarten Wassermolekülen bilden (Abb. 2). Dies sind intermolekulare „Bindungen“, die zu größeren Aggregaten führen. Diese Bindungen sind zwar schwächer als reguläre chemische Bindungen, aber sie machen den entscheidenden Unterschied. Jedes Wassermolekül kann mit seinen zwei Wasserstoffatomen zwei Bindungen zu benachbarten Wassermolekülen ausbilden. Außerdem können zwei weitere Moleküle mit einem ihrer Wasserstoffatome jeweils eine Bindung zu diesem Wassermolekül ausbilden. Damit hat das Molekül dann effektiv vier Wasserstoffatome gebunden. Die vier Wasserstoffatome sitzen dann im Eis in den vier Ecken eines Tetraeders mit dem Sauerstoffatom im Zentrum. Das ist eine optimale geometrische Struktur, um ausgedehnte dreidimensional räumliche Netzwerke entstehen zu lassen. Dieser Eigenschaft kommt zupass, dass der Winkel zwischen den beiden Bindungen vom Sauerstoff zu je einem Wasserstoffatom im freien Molekül schon gerade fast dem Winkel von Zentrum zu zwei Ecken eines Tetraeders entspricht (Abb. 3). Diese vier Wasserstoffatome können mit rasender Geschwindigkeit Bäumchen-wechsel-dich spielen. Dadurch entsteht in flüssigem Wasser ein dynamisches Gefüge, das stabil und flexibel zugleich ist. Kein anderes kleines Molekül weist diese Eigenschaft auf, dynamische Bindungen zu vier Nachbarn aufrechterhalten zu können.

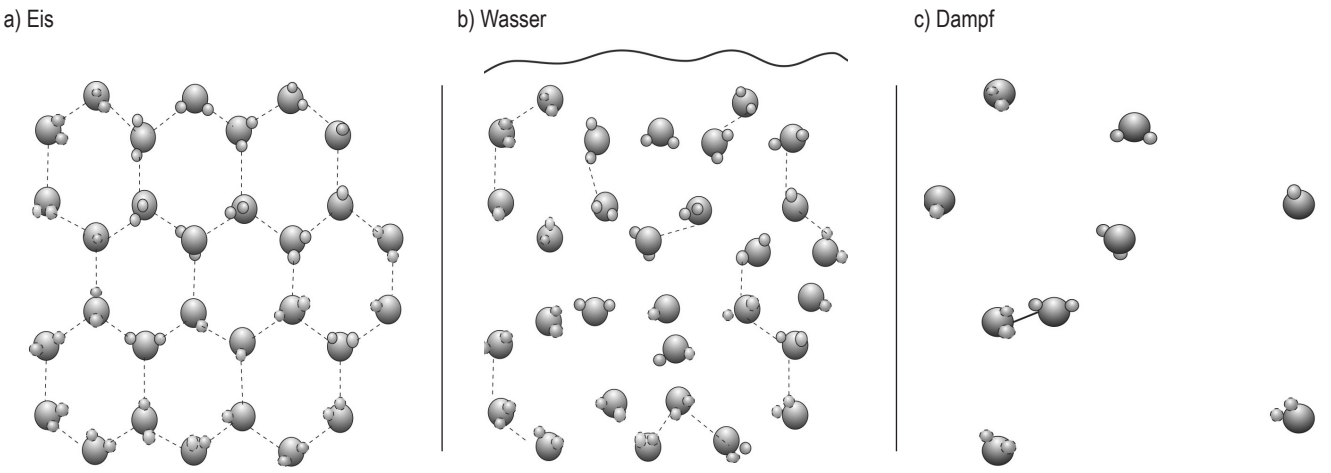
Zusammen mit der relativ hohen Polarität des Moleküls machen die vielen Wasserstoffbrücken Wasseraggregate so stabil, dass die Schmelz- und Siedetemperatur des Wassers viel höher ist, als man es auf der Basis der Molekülgröße erwarten würde. Andere kleine Moleküle, die keine Wasserstoffbrücken bilden können, sind bei den Temperaturen und Drücken, wie sie auf der Erdoberfläche herrschen, schon lange vollständig verdampft. Außerdem ist der Temperaturbereich, in dem Wasser flüssig ist, mit 100°C größer als bei den meisten anderen Flüssigkeiten. Da (bio)chemische Reaktionen in der Regel wegen der höheren Beweglichkeit der Moleküle in Lösung, also in flüssiger Phase, schneller ablaufen als im festen Zustand, macht der große Temperaturbereich die Prozesse des Lebens weniger anfällig für astronomisch bedingte Schwankungen der Oberflächentemperatur des Planeten (Jahreszeiten, Eiszeiten).

In dem dynamischen Netzwerk von verbrückten Wassermolekülen haben zu jedem Zeitpunkt ein paar Moleküle einen Wasserstoffatomkern, also ein Proton, zu viel oder zu wenig. Dieses sind dann H_3O^+- beziehungsweise OH^--Ionen. Ihre Konzentration kennzeichnet das „Autoprotolysegleichgewicht“ und ist in Säure-Base-Gleichgewichten leicht veränderbar. Die H_3O^+-und OH^--Ionen können auch leicht bei Oxidations-Reduktionsreaktionen, bei denen Elektronen übertragen werden, mitwirken. Diese beiden grundlegenden Reaktionstypen sind in vielfältiger Weise an die komplexen biochemischen Prozesse gekoppelt und wirken daran durch Austausch von Elektronen und Protonen mit.

Die erzeugten H_3O^+- und OH^--Ionen ermöglichen aber auch den Transport von Protonen im flüssigen Wasser und durch Membranen. Dafür muss nur wie in einer Eimerkette ein Proton zum benachbarten Wassermolekül weitergereicht werden, worauf dieses ein Proton auf der anderen Seite an sein Nachbarmolekül weitergibt (Grotthuss-Prozess). Die Protonen selbst müssen dabei (fast) gar keinen Weg zurücklegen. Auf der anderen Seite verhindert die Hydrathülle um die



(2) Zwischen einzelnen Wassermolekülen werden Wasserstoffbrücken gebildet, sodass ein Netzwerk entsteht.



(3) Eis weist eine dreidimensionale Netzstruktur von Wassermolekülen auf. Wird es flüssig, werden diese Vernetzungen teilweise aufgebrochen. Im Wasserdampf sind nur noch wenige Wassermoleküle in Paaren oder größeren Clustern gebunden.
Quelle: © Dinko Chakarov, Göteborg

Ionen, dass diese durch kleine Poren in Membranen einfach hindurch treten können.

Das dreidimensionale Wasserstoffnetzwerk führt im Eis dazu, dass jedes Wassermolekül mit vier anderen Wassermolekülen verbunden ist. Dadurch sind die Moleküle im Eis relativ weit voneinander entfernt. Die meisten anderen Festkörper haben eine höhere Packungsdichte mit bis zu zwölf Nachbarn. Während beim Schmelzen der meisten Festkörper diese hohe Zahl von Nachbarn aufgrund thermischer Bewegung im Mittel kleiner wird, ist es beim Eis genau umgekehrt. Dadurch hat Eis eine niedrigere Dichte als flüssiges Wasser; Eisberge schwimmen obenauf. Eine direkte Konsequenz ist, dass Gewässer zuerst nur oberflächlich zufrieren und im flüssigen Wasser darunter Leben weiterhin möglich bleibt.

Noch mehr außergewöhnliche Eigenschaften

Wasser hat noch viele andere außergewöhnliche Eigenschaften. Es hat ein sehr reiches Phasendiagramm, das heißt je nach Temperatur- und Druckbedingungen hat es sehr verschiedene Materialeigenschaften. Es gibt viele Sorten von Eis, die bei unterschiedlichen Drücken existieren: Eis ist also nicht gleich Eis; Eis kann unter Druck verflüssigt werden: in Gletschern gestaltet es Landschaften; Wasser (und Eis ohne Luftblasen) sind transparent für sichtbares Licht und ermöglichen so photochemische Prozesse, die sämtliche biochemischen Vorgänge mit Energie versorgen; Wasserdampf ist (aufgrund der Menge) das wichtigste Treibhausgas: die starke Absorption von Licht im Infraroten trägt dazu bei, dass die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche nicht -18 °C, sondern +15 °C beträgt. Mit der anthropogenen Zunahme des CO_2 in der Erdatmosphäre steigt die Temperatur der Ozeane und dann auch der Wassergehalt in der Atmosphäre, so dass sich eine positive Rückkopplung ergibt.

Fazit

Die Eigenschaften eines kleinen Moleküls wie H_2O sind also unverzichtbar für biologische Prozesse, wie wir sie verstehen. Es gibt kein anderes Molekül, das diese Eigenschaften aufweist. Es ist also sinnvoll, zuerst nach Wasser als *conditio sine qua non* zu suchen, bevor man sich an die unvergleichlich schwierigere Aufgabe wagt, lebendige Organismen oder ihre Spuren direkt nachzuweisen.

Summary

Water is such a special molecule that its abundance is generally regarded as prerequisite for the existence of any form of biological life. This special role in the chemical universe can be traced back to its charge polarisation in combination with the ability to readily form a flexible network with four neighbouring water molecules. This unique combination of properties is not provided by any other small molecule and gives rise to peculiarities that are seen as essential for life.

Die Autoren

Eckart Hasselbrink studierte von 1975 bis 1981 Physik an der Universität Göttingen. Er war von 1981 bis 1985 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Plank-Institut für Strömungsforschung. In Göttingen promovierte er 1985 mit dem Thema „Orientierungseffekte und Feinstrukturübergänge in differentiellen Streuquerschnitten“. Von 1986 bis 1987 arbeitete er mit R.N. Zare an der Stanford Uni-

versity. Mit einem Reimar-Lüst-Stipendium kehrte er 1987 an das MPI für Strömungsforschung zurück. Ab 1988 leitete er bis 1997 eine Arbeitsgruppe am Fritz-Haber-Institut in Berlin in der Abteilung von Prof. Gerhard Ertl. Er habilitierte sich 1993 an der Freien Universität Berlin mit einer Arbeit „Zur Dynamik der Photochemie adsorbierter Moleküle“. 1997 ging er als Lektor für Physik an die Odense Universitet. Seit 1998 ist er Professor für Physikalische Chemie in Essen. Von 2003 bis 2008 wirkte er als Prorektor für Forschung der gerade fusionierten Universität Duisburg-Essen.
Eckart Hasselbrink wurde für seine Forschungsarbeiten 1992 mit dem Karl-Scheel-Preis der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin und 1994 mit dem Dozentenstipendium des Fonds der Chemischen Industrie ausgezeichnet.

Eckhard Spohr studierte Chemie an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz und der University of California in Irvine. Er diplomierte 1983 und promovierte 1986 an der Universität Mainz. Dann war er bis 1988 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Es folgte ein Feodor Lynen Fellowship der Alexander von Humboldt Stiftung am Department of Chemistry der University of California in Irvine. Von 1991 bis 2000 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung für Theoretische Chemie an der Universität Ulm, wo er sich 1995 habilitierte. Es folgte eine zweijährige Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieforschung am Forschungszentrum Jülich, bevor Eckhard Spohr von 2002 bis 2007 dort seine eigene Arbeitsgruppe zum Thema „Grundlagen der Physikalischen Chemie“ leitete. Seit 2007 bekleidet er den Lehrstuhl für Theoretische Chemie an der Universität Duisburg-Essen. 1988 bekam Spohr die Otto Hahn-Medaille der Max Planck Gesellschaft verliehen und erhielt 1998 den Merckle Forschungspreis der Universität Ulm. Er ist national und international in vielen Gremien wie DFG und DAAD, der Israel Science Foundation oder auch der American Chemical Society als Gutachter gefragt.

Eckhard Spohr. Foto: Vladimir Unkovic

Simon Kresmann. Foto: Vladimir Unkovic

Transdisziplinäre oder gar transformative Ausbildung und Forschung sind die Schlagworte vieler neuer Förderprogramme. Der intensive Einbezug von Praxis und Gesellschaft in Forschung und Ausbildung zeichnet diese Ansätze aus. Ein in seiner disziplinären und thematischen Breite in Deutschlands Wasserforschung einmaliger Ansatz ist das NRW-Fortschrittskolleg FUTURE WATER.

FUTURE WATER

Mit Praxispartnern und Gesellschaft wissenschaftlichen Wasser-Nachwuchs ausbilden

Von Simon Kresmann & Torsten C. Schmidt

Strukturierte Doktorand*innenprogramme sind bei deutschen Wissenschaftler*innen nicht unumstritten. Und doch macht eine solche Ausbildung in bestimmten Kontexten, trotz diverser zusätzlicher Anforderungen, die neben der eigentlichen Promotionsarbeit erfüllt werden müssen, Sinn. Strukturierte Programme sind in der Regel interdisziplinär angelegt. Auf die Ausbildungsstätten junger Forschender kommen jüngst aber noch weitere Anforderungen zu. Transdisziplinäre oder gar transformative Ausbildung und Forschung sind die Schlagworte vieler neuerer Förderprogramme. Der intensive Einbezug von Praxis und Gesellschaft in Forschung und Ausbildung zeichnet diese Ansätze aus. Ein in seiner disziplinären und thematischen Breite in Deutschlands Wasserforschung einmaliger Ansatz ist das NRW-Fortschrittskolleg FUTURE WATER.

Absolvent*innen erzählen

„Der Austausch unter den Kollegiatinnen und Kollegiaten und der starke partizipative Charakter zeichnen FUTURE WATER aus. Man ist gezwungen, die Grenzen der eigenen Fachdisziplin zu erkennen und sich auf andere Fachrichtungen einzulassen. Das ist bereits sprachlich eine Herausforderung, die aber für die spätere Karriere sehr hilfreich ist. Zusätzlich profitiert man enorm vom Kontakt zu den Praktikern. Mein Mentor, Herr Schöpel von RWW, war in meinem Fall Berater und Türöffner zu anderen wichtigen Kontakten und hat mir auch überhaupt erst die für mein Projekt nötigen Probenahmen im Wasserwerk ermöglicht. Von den Ergebnissen profitieren dann beide Seiten gleichermaßen. Das Vernetzungspotenzial durch FUTURE WATER ist enorm, nicht zuletzt durch die Reisemittel. Dadurch ist es möglich, an zahlreichen Konferenzen teilzunehmen und interessante Leute kennenzulernen. Nur so kam ich beispielsweise mit Kollegen aus Südafrika in Kontakt und kann aus dieser Kooperation mehrere gemeinsame Publikationen vorweisen. Zudem bin ich dank der Möglichkeiten, die FUTURE WATER bietet, „affiliate" am renommierten Water Institute der University of North Carolina mit Anknüpfung an die WHO sowie im Editorial Board des International Journal of Hygiene and Environmental Health. Ich stehe

(1) Die ersten FUTURE WATER Absolvent*innen: Mats Leifels und Sonja Heldt.
Quelle: © Preuß/ZWU

auch als Alumni jederzeit bereit, FUTURE WATER zu unterstützen. Ich verdanke dem Programm sehr viel und gebe, wenn ich kann, gerne etwas zurück." sagt Mats Leifels (Abb. 1), seit Juli 2017 nicht nur erster Absolvent aus FUTURE WATER, sondern sogar des gesamten Förderprogramms des Landes. In seiner Promotion untersuchte er am Lehrstuhl für Hygiene, Sozial- und Umweltmedizin an der Ruhr-Universität Bochum neue Methoden zur Detektion der Infektiosität von Viren in verschiedenen Wassermatrices [1]. Nach dem Abschluss und einem erfolgreichen Antrag ist er nun als Postdoc in Kanada, um seine Forschung fortzusetzen.

„*Die Motivation im Kolleg ist sehr hoch und es macht viel Spaß trotz der vielen Anforderungen. Mit meinem Praxismentor, Herrn Teichgräber von Emschergenossenschaft/Lippeverband, hatte ich auch großes Glück. Er hat mir bereits sehr früh ein dreimonatiges Praktikum im Verband ermöglicht, durch das ich Einblick in die verschiedenen Bereiche und ihre Arbeit gewann und langfristige Kontakte knüpfen konnte. Das war für meine späteren Untersuchungen entscheidend, so zum Beispiel für eine Umfeld- und Medienanalyse zum Umbau der Emschermündung. Dadurch haben meine Ergebnisse für die Emschergenossenschaft eine hohe Relevanz. Die Betreuung durch einen bei den Ingenieurwissenschaften angesiedelten Biologen, einen Philosophen und den Praxismentor ist herausfordernd, aber auch sehr spannend und eben auch interdisziplinär. Dadurch bleibe ich offen für andere Blickwinkel. Ich schätze zudem sehr die Möglichkeit, sich für die spätere Karriere zu orientieren. Für mich stand dadurch bald fest, dass ich gerne etwas zwischen wissenschaftlicher und praktischer Tätigkeit anstrebe. Ein mehrmonatiger Forschungsaufenthalt in London, meiner zweiten Fallstudie, und die Ausbildung zur Fachmediatorin für Großgruppen und Planungsprozesse in öffentlichen Raum wären ohne FUTURE WATER sicher nicht realisierbar gewesen.*" berichtet Sonja Heldt (Abb. 1), die ihre Promotion im Fachgebiet Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen und Ende 2017 beendete. Ihre Forschung beschäftigt sich mit partizipativem Flussgebietsmanagement und der gesellschaftlichen Akzeptanz der EU-Wasserrahmenrichtlinie [2]. Seit Dezember 2017 arbeitet sie sie im Bereich Flussgebietsmanagement bei Emschergenossenschaft/Lippeverband. Diese beiden Beispiele verdeutlichen sehr gut den Ansatz von FUTURE WATER.

Gefordert: Inter- und Transdisziplinarität

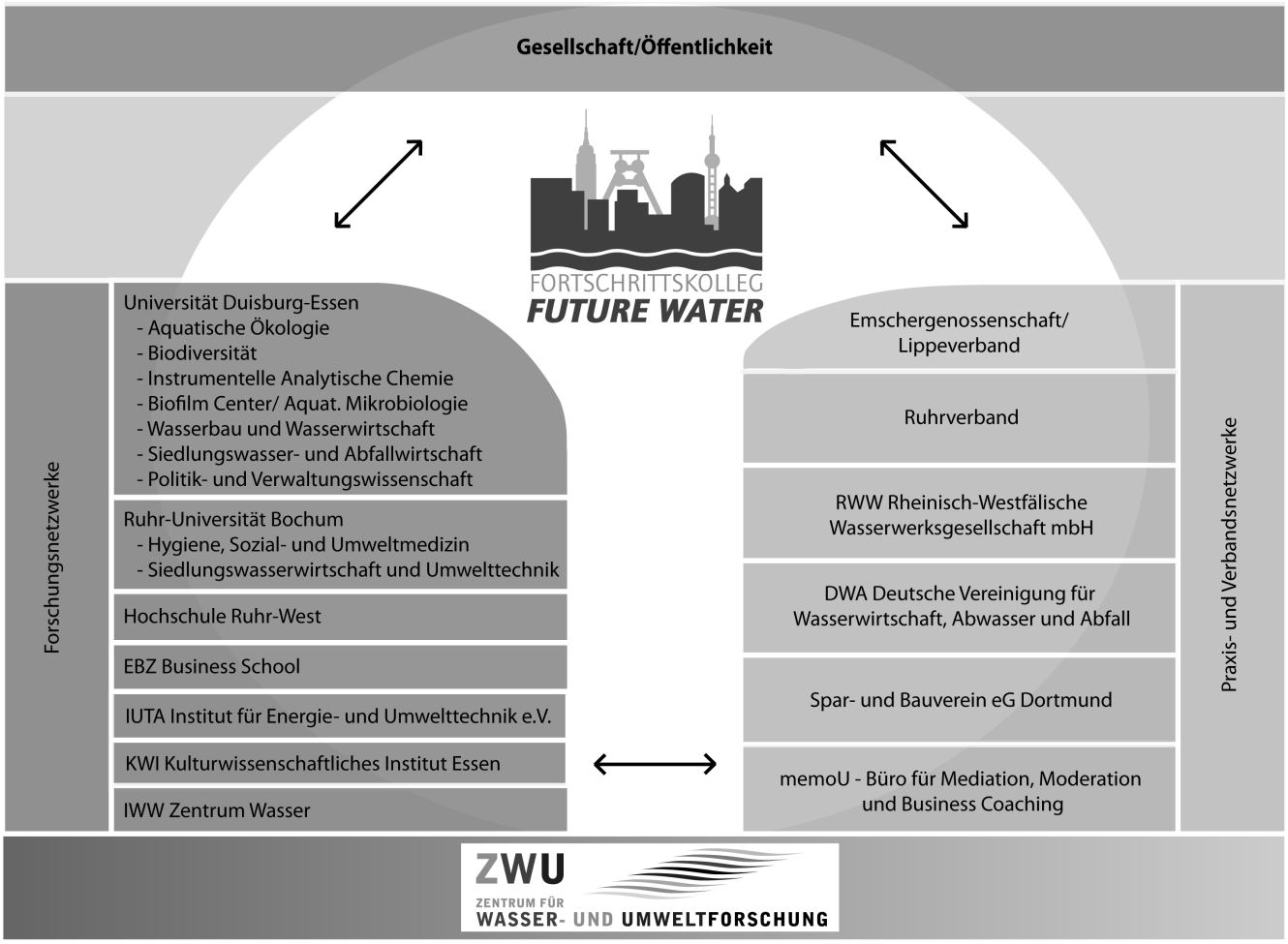
Das Land Nordrhein-Westfalen fördert FUTURE WATER als eines von zwölf Fortschrittskollegs mit rund 2,7 Millionen Euro für zunächst viereinhalb Jahre. Grundvoraussetzung für eine Förderung ist ein inter- und transdisziplinäres Forschungsumfeld und eine gemeinsam bearbeitete Forschungsfrage. Interdisziplinarität entspricht dabei den üblichen Anforderungen an Graduiertenkollegs der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) oder ähnlicher Formate. Die Forderung nach Transdisziplinarität dagegen ist ein relativ neues Element, das wissenschaftstheoretisch sehr unterschiedlich definiert werden kann. Das Land hat die nachfolgende, weitverbreitete Definition

gewählt: *„Transdisziplinarität im hier verstandenen Sinne bedeutet dabei, neben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gezielt nicht wissenschaftliche gesellschaftliche Akteurinnen und Akteure aus Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik als Träger praktischen Wissens in den Forschungsprozess des jeweiligen Projektes einzubeziehen. Gerade bei Forschungsfragestellungen, die von hoher wissenschaftlicher Unsicherheit einerseits und hoher praktischer wie politischer Relevanz andererseits geprägt sind, wie dies bei Forschung für nachhaltige Entwicklung typisch ist, bietet das Zusammenführen wissenschaftlicher und praktischer Erkenntnisprozesse gute Chancen, zu Lösungen mit hohem Umsetzungs- und Verbreitungspotenzial zu kommen.“* [3]

Wasserforschung hat fast immer eine hohe praktische und gesellschaftliche Relevanz und spielt auch für eine nachhaltige Entwicklung eine entscheidende Rolle. Es überrascht daher nicht, dass das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU) an der Universität Duisburg-Essen (s. den ersten Artikel in diesem UNIKATE-Heft) mit seinem umfassenden Netzwerk aus Forschung, Wirtschaft und Verwaltung mit dem Förderantrag für das Fortschrittskolleg FUTURE WATER erfolgreich war. Seit Oktober 2014 forschen zwölf Doktorand*innen an diversen Fragen einer nachhaltigen Nutzung der Ressource Wasser. Neben dem DFG-Graduiertenkolleg Urban Water Interfaces in Berlin mit deutlich engerem Fokus, ist FUTURE WATER das einzige strukturierte Promotionsprogramm der Wasserforschung in Deutschland und scheut auch nicht den internationalen Vergleich.

Breit aufgestellt und gut betreut

Das Konsortium besteht aus je zwei Arbeitsgruppen aus drei Fakultäten der Universität Duisburg-Essen (Chemie, Biologie, Ingenieurwissenschaften), je einer Arbeitsgruppe aus zwei Fakultäten der Ruhr-Universität Bochum (Medizin, Ingenieurwissenschaft) und jeweils einer Arbeitsgruppe von der Hochschule Ruhr-West (Ökonomie), der EBZ Business School (Ökonomie), des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA; Umwelthygiene) und des Kulturwissenschaftlichen Instituts Essen (KWI; Gesellschafts-



(2) Beteiligte Institutionen: ZWU als Basis für die tragenden Säulen in FUTURE WATER, Forschung und Praxis, im Austausch mit der Gesellschaft.
Quelle: © ZWU

wissenschaften). Bedingt durch die Emeritierung des Kollegen aus der Medizin in Bochum und der thematisch nicht mehr passenden Neubesetzung, kam Mitte 2017 eine Arbeitsgruppe aus den Gesellschaftswissenschaften der Universität Duisburg-Essen hinzu (Abb. 2). In jeder dieser Arbeitsgruppen wird eine Promotionsstelle direkt aus dem Fortschrittskolleg finanziert. Interessierte Promovierende aus dem ZWU-Netzwerk beteiligen sich als assoziierte Kollegiat*innen ohne direkte Finanzierung am FUTURE WATER-Programm. Eine inter- und transdisziplinäre Betreuung wird gewährleistet durch mindestens zwei professorale Betreuer*innen aus unterschiedlichen Disziplinen und eine*n Mentor*in aus der Praxis.

Praxis und Zivilgesellschaft mit im Boot

Das Kolleg kann beim Einbezug der Praxis auf das ZWU-Netzwerk zurückgreifen. Als Mentor*innen sind daher je nach Projekt Kolleg*innen der bereits im ZWU vertretenen großen sondergesetzlichen Wasserverbände Emschergenossenschaft/Lippeverband und Ruhrverband ebenso aktiv wie Vertreter der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft und weiterer Partner (Abb. 2). Auch über die einzelne Mentor*innenschaft hinaus sind beispielsweise bei vielen Veranstaltungen des Kollegs Praxispartner aktiv eingebunden. Für die meisten Projekte hat das transdisziplinäre Element zahlreiche Vorteile. Die Mentor*innen und weiteren Praxisakteur*innen stellen die Praxisrelevanz sicher, überprüfen die Praktikabilität der Forschung, beraten zudem bei Fragen der Karriereplanung und begleiten die Promovierenden mit dem Blick von außerhalb der Wissenschaft. Durch die Mentor*innen können viele „Irrwege“, die gerade bei empirischer Forschung sehr häufig auftreten und viel Zeit kosten, von vorneherein vermieden

(3) Die FUTURE WATER Promovierenden präsentieren ihre Ergebnisse bei der Projektmesse der ersten Fortschrittswerkstatt Wasser im Januar 2016. Quelle: © ZWU/ Strackbein

werden. Ein Beispiel ist die richtige Auswahl von Probenahmestandorten in zu untersuchenden Gewässern. Oft ist die Mentorenschaft einer*s Kolleg*in des Betriebes die Grundvoraussetzung, um überhaupt bestimmte Orte wie eine Kläranlage zu betreten und erst recht um dort Modifizierungen vorzunehmen.

Ein weiterer Baustein der Transdisziplinarität ist ein verpflichtendes Praktikum oder ein Forschungsaufenthalt bei einem Praxispartner. Wie dieser Aufenthalt gestaltet wird, liegt in den Händen der Promovierenden und ihrer Betreuer*innen und wird je nach Projekt abgestimmt. Darüber hinaus beleuchten zahlreiche Exkursionen sowohl in der Region, als auch bei Veranstaltungen im Ausland diverse Wasser-Aspekte mit hohem Praxisbezug. So erhalten die Kollegiat*innen in FUTURE WATER einen umfassenden Einblick in die Wasserwirtschaft und verwandte Felder, der in Deutschland, aber auch international einmalig ist. Der Qualitätssicherung der einzelnen Promotionen sowie der Karriereplanung dienen von den Promovierenden halbjährlich erstellte Entwicklungspläne, die mit dem Betreuer*innenteam besprochen und im Lenkungskreis gesichtet werden.

Neben der Praxis sind an vielen Stellen auch Akteure der organisierten Zivilgesellschaft an den FUTURE WATER-Aktivitäten beteiligt. Die Naturschutzverbände NABU und BUND bilden hierbei die wichtigste Gruppe. Im Unterschied zu den Praxispartnern bringen Kolleg*innen aus der Zivilgesellschaft sich in der Regel ehrenamtlich mit einem beschränkten Zeitbudget ein. Dennoch ist die Kooperation für alle Beteiligten nicht minder fruchtbar und bereichernd. Für die Kollegiat*innen bietet sich hierdurch eine hervorragende Möglichkeit über den Tellerrand zu blicken. Auch der Einbezug einer breiten Öffentlichkeit ist ein Bestandteil der transdisziplinären Ausrichtung. Dies gelingt am besten im Rahmen von öffentlichen Veranstaltungen wie zum Beispiel einem Tag der offenen Tür auf einer Kläranlage, den die Kollegiat*innen mitgestaltet haben. Solche „Outreach“-Aktivitäten gehören zu den Aufgaben, die neben der Forschung von den Promovierenden eingefordert werden.

Programm ohne Überforderung

Veranstaltungen, an denen das gesamte Konsortium teilnimmt, sind essentiell für die Zusammenarbeit. Insbesondere auf der Betreuer*innenebene käme es sonst kaum zu einem direkten Austausch zu den Inhalten des Kollegs. Zudem stellen die unterschiedlichen Kulturen verschiedener Disziplinen und Einrichtungen nicht zuletzt die Koordination eines so breit aufgestellten Kollegs vor so manche Herausforderung. Im Sinne der Kollegiat*innen, die nach wie vor ihre Promotionsarbeit

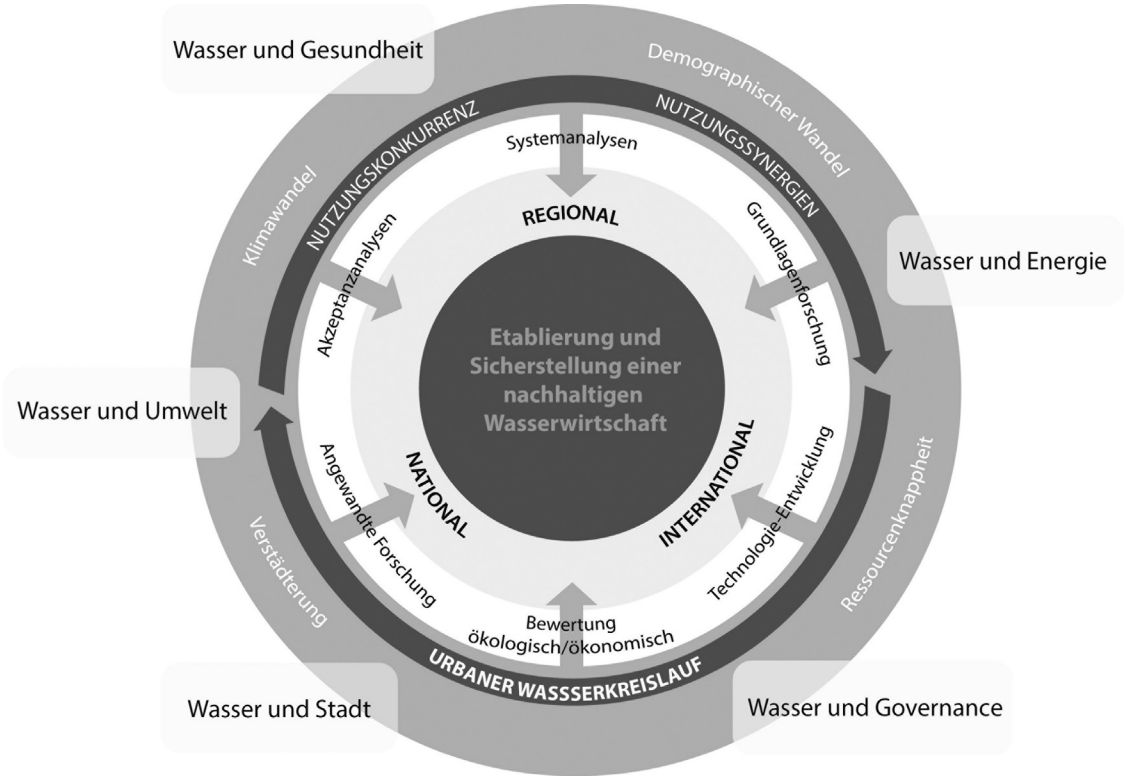
in einer Arbeitsgruppe und einer Fakultät mit ihren jeweiligen Kulturen und Verpflichtungen absolvieren müssen, war es dennoch wichtig, die Zahl der übergreifenden Veranstaltungen auf ein akzeptables Maß zu begrenzen.

Zu nennen wäre hier insbesondere das vierzehntäglich stattfindende Kolloquium, in dem einerseits die Promovierenden selbst zu Inhalten und zum Stand ihrer Projekte referieren, andererseits aber auch hochkarätige Expert*innen zu spezifischen Themen eingeladen werden. Sommerschulen, die vom ZWU im internationalen Kontext organisiert werden, aber auch eigens für das Kolleg durchgeführte Sommer- oder Winterschulen gehören genauso zum Programmangebot wie Ringvorlesungen und Seminare. Ein besonderer Fokus liegt zudem auf dem Bereich der überfachlichen Schlüsselqualifikationen oder „Soft Skills“. Um Angebote zu schaffen, die die Kollegiat*innen auch gerne wahrnehmen, werden diese Workshops auf die Wünsche der Promovierenden abgestimmt. Wer sollte es besser wissen als sie selbst, welches Training sie brauchen? Deshalb gibt es eigens organisierte Workshops zur grafischen Gestaltung (Visual Facilitating) ebenso wie zu Kommunikation, Moderation oder auch zu freiem Sprechen, zum jeweils für die Promovierenden passenden Zeitpunkt.

Zum Ausbildungsprogramm zählt auch die ganztägige öffentliche Fortschrittswerkstatt Wasser, während der die Kollegiat*innen mit innovativen Ideen die Ergebnisse ihrer Arbeit an Messeständen präsentieren und sich dadurch auch Feedback aus unterschiedlichen Richtungen holen können (Abb. 3). Feedback aus anderen Disziplinen bekommen sie auch durch den Austausch miteinander, der besonders intensiv während des verpflichtenden Student Research Council einmal im Jahr stattfindet: Einige Tage raus aus dem Forschungsalltag und nur unter den zwölf Gleichgesinnten, zum Beispiel in einem Selbstversorgerhaus im Schwarzwald können sehr produktiv sein. Die Fähigkeit zu entwickeln, disziplinübergreifend zu kommunizieren und zusammenzuarbeiten, ist eines der wichtigsten Ausbildungsziele des Kollegs. Befragt nach den gemeinsamen Zielen haben die Promovierenden der ersten FUTURE WATER-Kohorte die „Erarbeitung von Lösungsstrategien und Handlungsempfehlungen für einen nachhaltigen Umgang mit Wasser“ als übergeordnetes Ziel für sich erarbeitet und definiert. Fünf ergänzende Ziele kommen noch hinzu:

- Erwerb von Schlüsselkompetenzen
- Ausbau von inter- & transdisziplinärer Kommunikationsfähigkeit
- Netzwerkbildung und Nutzung des gemeinsamen Wissenspools
- Perspektivenerweiterung
- Transdisziplinäre Pionierarbeit

(4) FUTURE WATER-Kollegiat*innen bei der YWP Conference 14 in Taipeh, Taiwan.
Quelle: © ZWU



(5) Behandelte Themengebiete in FUTURE WATER.
Quelle: © ZWU

Die Gruppe macht den Unterschied

Für das Erreichen dieser gemeinsamen Ziele und für die vielen Dinge, die die Kollegiat*innen in der Regel neben ihrer eigentlichen Promotion gemeinsam auf den Weg bringen, gehören viel gegenseitiges Vertrauen und eine hohe Motivation. Trotz sehr unterschiedlicher Themenfelder, Disziplinen und Betreuungsverhältnisse hilft es ungemein, eine Gruppe im Rücken zu wissen, die sich in einer ähnlichen Situation befindet und immer ein offenes Ohr hat. Bis ein solches Vertrauen und Verständnis für die anderen Fachrichtungen oder auch Lebensumstände entsteht, vergeht Zeit und es braucht Gelegenheiten. Eine sehr frühe gemeinsame Reise zu einer internationalen Konferenz erwies sich als Schlüssel für die Gruppendynamik in FUTURE WATER. Nach nur zwei Monaten im Kolleg und etwas Überzeugungsarbeit der Koordination auf Betreuer*innenseite fuhren alle Kollegiat*innen Ende 2014 ohne eigene Beiträge gemeinsam zur Young Water Professionals Conference der International Water Association (IWA) in Taipeh, Taiwan (Abb. 4). In der Rückschau war diese Reise besonders wertvoll. Innerhalb weniger Tage waren die „Deutschen“ und FUTURE WATER bei fast allen der 500 Konferenzteilnehmer*innen aus aller Welt bekannt. Die Gruppe wuchs zusammen, die Motivation stieg enorm und ein internationales Netzwerk entstand, das später zu handfesten Kooperationen und Ergebnissen führte.

Die Reise war allerdings nur möglich, da das Kolleg sich vor allem in einem Punkt von anderen Formaten unterscheidet: Ein gut ausgestattetes Reise- und Fortbildungsbudget, das nur den Promovierenden zur Verfügung steht. Nach den Erfahrungen aus drei Jahren FUTURE WATER und trotz der vielfach kritischen Stimmen zu Beginn des Kollegs, kann man in der Retrospektive nur sagen, dass gerade dieses Budget wirklich einen großen Unterschied gemacht hat. Durch die Möglichkeit, an zahlreichen nationalen wie internationalen Konferenzen teilzunehmen, sind die Kollegiat*innen bereits zum Abschluss ihrer Promotion so stark vernetzt, wie man es sonst von Forschenden am Ende einer Postdoc-Phase erwarten würde. Zudem können ergänzende Fortbildungsangebote genutzt werden, die die Haushalte der Arbeitsgruppen oder auch andere Drittmittel nicht ermöglichen. So haben beispielsweise die beiden Promovierenden, die sich im weitesten Sinne mit „Beteiligung“ beschäftigen, jeweils eine Mediatorenausbildung abgeschlossen. Neben zusätzlicher Ausbildung und Vernetzung ist ein weiteres wichtiges Kriterium in diesem Zusammenhang der Trainingseffekt. Je öfter die Kollegiat*innen zu Konferenzen fahren, Vorträge halten oder Poster präsentieren, desto besser gelingt ihnen das natürlich. Gleiches gilt für das Netzwerken mit anderen Forschenden, Praxispartnern und weiteren

Akteuren. Solche Gelegenheiten haben Promovierende außerhalb des Kollegs in der Regel nicht so häufig. Ein absolutes Plus und Alleinstellungsmerkmal des Programms.

Die Themen

Die erste FUTURE WATER-Kohorte (2014–2017/18) hatte einen großen Vorteil: den gemeinsamen Start. Dadurch gelang es trotz der sehr unterschiedlichen Fragestellungen in den einzelnen Promotionen eine Kohärenz auf übergeordneter Ebene herzustellen. Die Breite des Konsortiums spiegelt sich in der Breite der Promotionsprojekte, die letztlich aber alle in den Gesamtkontext „Etablierung und Sicherstellung einer nachhaltigen Wasserwirtschaft“ und die Themengebiete von FUTURE WATER passen (Abb. 5).

Die einzelnen Kollegiat*innen der ersten Kohorte (2014–2017/18) mit den zugehörigen Promotionsprojekten sind nachfolgend aufgeführt:

- Helena Bielak (assoziiert), IWW Zentrum Wasser: Aktivität von endokrin wirksamen Substanzen in Abwässern vor und nach der oxidativen Abwasserbehandlung
- Paulina Budryte (assoziiert), Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft: Öffentlichkeitsbeteiligung bei Fließgewässerrenaturierungsprojekten
- Johannes Euler, Kulturwissenschaftliches Institut Essen: Wasser als Gemeinsames: Potenziale und Hemmnisse von Commoning für die Lösung von Konflikten bei der Wasserbewirtschaftung
- Claudia Freimuth, Hochschule Ruhr West, Wirtschaftsinstitut: Analyse der technischen Regelsetzung am Beispiel der deutschen Abwasserentsorgung
- Sonja Heldt, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft: Grundlegende Akzeptanzprobleme bei der Umsetzung von Maßnahmen im Bereich der Wasserinfrastruktur
- Fabian Itzel, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA): Evaluierung von innovativen Abwasseraufbereitungsverfahren mittels instrumenteller und wirkungsbezogener Analytik
- Stefanie Jeschka, EBZ Business School: Nachhaltigkeitsbezogene Bewertung der Auswirkungen wasserwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Quartiersentwicklung
- Oliver Knoop, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Chemie, Instrumentelle Analytische Chemie: Bildung und Wirkung von Transformationsprodukten beim Einsatz erweiterter Oxidationsprozesse in der Abwasserreinigung
- Pascal Kosse, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik: Energiebilanz und Treibhausgasemissionen urbaner Abwasserreinigungssysteme
- Mats Leifels, Ruhr-Universität Bochum, Abteilung für Hygiene, Sozial- und Umweltmedizin: Detektion infektiöser enteraler humanpathogener Viren in Oberflächengewässern durch Biosensoren
- Martin Mackowiak, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Chemie, Biofilm Centre-Aquatische Mikrobiologie: Viren in Biofilmen
- Julia Nuy, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Biologie, Biodiversität: Monitoring von aquatischen Ökosystemen mit „Next Generation Sequencing“-Methoden
- Gerhard Schertzinger, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Biologie, Aquatische Ökologie: Niederschlagsbedingte Immission und Wirkung von Schadstoffen aus Misch- und Trennsystemen in Oberflächengewässern
- Daniel Teschlade, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft: Entwicklung eines Durchgängigkeitskonzeptes am Beispiel des Ruhr-Einzugsgebietes

Den Vorteil des gemeinsamen Starts werden die nachfolgenden Kollegiat*innen nicht mehr haben, da die ersten Promovierenden ihre Ausbildung zu unterschiedlichen Zeitpunkten abschließen werden. Dadurch werden auch die Startpunkte für die nächste Generation unterschiedlich ausfallen. Aufgrund dieser Tatsache, hat sich das Konsortium bereits früh darauf verständigt, für die zweite Kohorte eine stärkere inhaltliche Kohärenz herzustellen. Welches Thema dabei im Fokus stehen soll, wurde auf einem intensiven zweitägigen Workshop des gesamten Konsortiums ausgearbeitet. Nach einigen Debatten und einer Reflexion der eigenen Stärken wurde festgelegt, dass alle neuen Promotionsvorhaben zum übergeordneten Thema „Regenwasserbewirtschaftung und diffuse Stoffeinträge“ ihren Beitrag leisten sollen.

Ergebnisse und Ausblick

Nach drei Jahren befindet sich FUTURE WATER auf der Zielgeraden der ersten Förderphase und durchläuft eine Evaluation. Die Frage ist, welche der zu Beginn formulierten erwarteten Ergebnisse tatsächlich erreicht werden konnten. Insgesamt sieht es dabei gut aus. Das inter- und transdisziplinäre Betreuungskonzept samt Entwicklungsplänen und Praxis- beziehungsweise Forschungsaufenthalten hat sehr gut funktioniert. Auch das Gros der angekündigten Lehrinhalte konnte tatsächlich angeboten werden. Selbst die bezifferten 18 Publikationen sind kein Hindernis, denn auf der Liste stehen bereits mehr als 20 (Stand September 2017). Bei den Abschlüssen ist das Kolleg auch nur knapp hinterher. Es sollten vier Promotionen eingereicht und vier weitere in der Abschlussphase sein. Bislang ist ein Kollegiat bereits promoviert, eine andere Arbeit ist eingereicht und mindestens fünf weitere sind in der Abschlussphase. Bei den harten Fakten sieht es also sehr gut aus.

Auf der prozeduralen Ebene kann man das Fortschrittskolleg als vollen Erfolg werten. Die vielen Aktivitäten im Austausch mit

Praxis und Gesellschaft sowie die Kooperation der Kollegiat*innen untereinander sind hier besonders hervorzuheben. Als besondere Leistung der Promovierenden und des Kollegs kann man die Einwerbung einer eigenen FUTURE WATER-Session auf einer großen internationalen Konferenz, des ASLO Aquatic Sciences Meeting auf Hawaii Anfang 2017, werten. Die zahlreichen Austausch- und Vernetzungsaktivitäten wie zum Beispiel mit dem DFG-Graduiertenkolleg Urban Water Interfaces aus Berlin, den IWA Young Water Professionals Österreich oder auch einer südafrikanischen Gruppe, mit der gemeinsam publiziert wurde, sind ebenfalls positiv hervorzuheben. Ob die nächste FUTURE WATER-Kohorte ebenfalls so erfolgreich sein wird, bleibt abzuwarten. Man kann aber eigentlich davon ausgehen, zumal auch in der Koordination des Kollegs in der ersten Phase viel gelernt wurde.

Das Fortschrittskolleg FUTURE WATER wird gefördert vom Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MKW NRW) in einer ersten Phase von 2014 bis 2018. Im Falle einer erfolgreichen Evaluation und einer positiven Bewertung des Fortsetzungsantrags folgt eine weitere dreieinhalb jährige Förderung des weiterentwickelten Formats als „NRW Forschungskolleg“, so dass die Gesamt-Laufzeit acht Jahre betragen wird und Mitte 2022 ausläuft.

Summary

Inter- and transdisciplinary doctoral training together with practice and society is a challenge, but also an opportunity. Within the FUTURE WATER program, 12 Ph.D. students gain experience with this rather new format unique to German water research. A broad range of disciplines and institutions as well as partners from water boards and companies enable the Ph.D. students to think beyond the confines of their own particular disciplines and gain many valuable insights into the water sector. The supervision teams, each consisting of at least two scientific advisors and a mentor from the practical side, as well as the group of highly motivated Ph.D. students, work closely together. The results after three years of FUTURE WATER demonstrate that this format creates many possibilities for research questions demanding inter- and transdisciplinary collaboration and complements well other ways of obtaining a Ph.D. The training program is suited to the needs of the Ph.D. students and with a notable travel budget they are able to create an invaluable network, often also resulting in tangible results like publications.

Die Autoren

Simon Kresmann studierte bis 2009 an der Universität Duisburg-Essen das Lehramt für Gymnasien und Gesamtschulen in den Fächern Biologie und Kunst. Bereits als Student war er in zahlreichen Gremien der UDE aktiv, insbesondere im Fachschafstrat und Fakultätsrat Biologie. Daneben arbeitete er bereits seit 2005 als studentische Hilfskraft in unterschiedlichen Organisationseinheiten und Funktionen, seit 2007 im Zentrum für Wasser- und Umweltforschung. Nach dem ersten Staatsexamen ging er mit einem Comenius-Stipendium der EU nach Ungarn und war dort als Lehrer tätig. 2011 kehrte er an die UDE zurück und arbeitete in verschiedenen Forschungsprojekten des ZWU als Koordinator. Ein Fokus lag bis 2014 auf dem Transformationsprogramm des DAAD in Ägypten und der MENA-Region und inhaltlich lag der Schwerpunkt auf Wassertechnologien und Nachwuchsförderung. Zudem begann er an der UDE in der Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie auch seine Promotion im Bereich der Ökotoxikologie. Zu seinen Interessen gehört die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses ebenso wie die Beschäftigung mit den Auswirkungen menschlicher Eingriffe auf die Lebensgemeinschaften aquatischer Lebensräume. Er war von 2014 bis 2017 Koordinator des Fortschrittskollegs FUTURE WATER und übernahm anschließend das Ressort Nachwuchsförderung am Science Support Centre der UDE.

Torsten C. Schmidt hat seit 2006 den Lehrstuhl für Instrumentelle Analytische Chemie an der Universität Duisburg-Essen (UDE) inne. Er studierte Chemie an der Universität Marburg und promovierte 1997 in Analytischer Chemie. Nach PostDoc- und Assistentenzeit an der EAWAG/ETH Zürich und der Universität Tübingen habilitierte er 2006 in Hydrogeochemie und Umweltanalytik. Torsten Schmidt ist neben seiner Professur wissenschaftlicher Direktor für Wasserchemie am IWW Zentrum Wasser in Mülheim/Ruhr, Vorsitzender des Zentrums für Wasser- und Umweltforschung an der UDE und seit Januar 2013 Vorsitzender der Wasserchemischen Gesellschaft – Fachgruppe in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh). Seine Forschungsinteressen umfassen Substanzspezifische Isotopenanalytik, Trenntechniken, Extraktions- und Anreicherungsverfahren, Wasserchemie und -technologie mit Schwerpunkten auf Sorption und Oxidationsverfahren. Für seine wissenschaftlichen Arbeiten im Grenzbereich der analytischen und Wasserchemie wurde er 2013 mit dem Fresenius-Preis der GDCh ausgezeichnet. Seit 2014 ist Schmidt Sprecher des Fortschrittskollegs FUTURE WATER.

Literatur

1) Leifels, M., Hamza, I.A., Krieger, M., Wilhelm, M., Mackowiak, M., Jurzik, L. (2016). From Lab to Lake - Evaluation of Current Molecular Methods for the Detection of Infectious Enteric Viruses in Complex Water Matrices in an Urban Area. PLoS ONE. 2016, Bd. 11, 11: e0167105. doi:10.1371/journal.pone.0167105

2) Heldt, S.; Budryte, P.; Ingensiep, H.W.; Teichgräber, B.; Schneider, U.; Denecke, M. (2016) Social Pitfalls for River Restoration – How Public Participation Uncovers Problems with Public Acceptance. Environmental Earth Sciences, 75:1053. doi:10.1007/s12665-016-5787-y

3) Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung NRW. 2013. Forschungsstrategie Fortschritt NRW. [Online] 11. 2013. [Zitat vom: 30. 08. 2017.] https://www.mkw.nrw/ministerium/rueckblick-2013/fortschritt-nrw/

Torsten C. Schmidt. Foto: Vladimir Unkovic

View of Recife. Foto: Juliana Costa

Twenty-six young scientists, mainly from Germany and Brazil, participated in the workshop "How do we want to live tomorrow?" and identified four central research topics: a) integrated watershed management in urban regions, b) sustainable sanitation and rainwater management, c) micropollutants and d) information flow and people's involvement.

How do we want to live tomorrow?

Perspectives on water management in urban regions

Von Viktoria Berger, Fernando Mainardi Fan, Friederike Gabel, Paulo Henrique Galvão, Maria Gies, Daniel Grabner, Simone Langhans, Priscilla Macedo-Moura, Anderson Abel de Souza Machado, Rodrigo Lilla Manzione, Elena Matta, Ana Andreu Mendez, Marcio Augusto Ernesto de Moraes, Ana Carolina Daniel Morihama, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva, Natalia Periotto, Gwendolin Porst, Caroline Rigotto, Benedikt Roters, Stephan Schulz, Talita Fernanda das Graças Silva, Matheus Martins de Sousa, Alexandra Suhogusoff, Ingo Daniel Wahnfried, Christine Wolf

Foreword

The sustainable use of water resources in urban regions is essential in order to ensure a livable environment for future generations. Stakeholders from politics, science, industry and society deal with these challenges of water management all over the world. In this context, a central question is "How do we want to live tomorrow?" The German National Academy of Sciences Leopoldina, the Brazilian Academy of Sciences (ABC) and the Centre for Water and Environmental Research at the University of Duisburg-Essen (ZWU) organized the workshop "Perspectives on Water Management in Urban Regions" from 4th to 7th October 2016 in Essen, Germany, in order to discuss which research topics and questions are relevant for the future water management in urban regions. This workshop continued the series "Water in Urban Regions", initiated by the Leopoldina and the ABC in 2014 in São Carlos, Brazil (Anthonj et al., 2014).

The organizing institutions invited young scientists to the workshop, since they are the ones who will shape the future of research in urban water management. Twenty-six young scientists, mainly from Germany and Brazil, participated in the workshop and identified four central research topics: a) integrated watershed management in urban regions, b) sustainable sanitation

and rainwater management, c) micropollutants and d) information flow and people's involvement. Considering the motto of the workshop "How do we want to live tomorrow?", the young scientists formulated research questions within these four topics, which – from their perspective – are relevant for the future of urban water management. They are convinced that extensive research in the identified areas generates important know-how for the stakeholders involved. The young scientists' aim is a contribution to the development of more viable, sustainable and humane cities in the future.

The present science policy report reflects exclusively the views of the young scientists participating in the workshop. A list of authors is available in the appendix.

We, as the organizing science institutions, would like to thank particularly Professor José Tundisi (member of ABC, São Carlos), Professor Peter Fritz (member of Leopoldina, Leipzig) and Professor Klement Tockner (member of Leopoldina, Berlin) as well as Professor Bernd Sures, Professor André Niemann and Professor Daniel Hering (all ZWU) for coordinating and supporting the event.

We would also like to thank the German Federal Environmental Foundation (DBU) for its generous financial support of the bilateral workshop.

Professor Jörg Hacker, President Leopoldina
Professor Luiz Davidovich, President ABC
Professor Torsten Claus Schmidt, Chairman of ZWU

Executive summary

More than half of the human population currently lives in urban areas and according to the United Nations, cities will be the living space of an additional 2.5 billion people by the year 2050 (UN, 2015b). The proportion and speed of this urban growth increase the pressure on water resources, and is often seen negatively. However, this challenge can also be a chance to substantially improve the quality of life in urban areas, if we consider how we want to live tomorrow and actively shape our future. As a group of interdisciplinary young scientists authoring the current science policy report, we agreed that we want to live in cities where sustainable, integrated watershed management guarantees public health and environmental safety. This requires sanitation and rainwater management, solutions for dealing with contaminants, such as micropollutants, as well as information flows and public involvement in water management.

Integrated watershed management as part of urban planning takes into account interdisciplinary relationships and connects different sectors, for example city administration, health providers and water managers. It also ensures access to sustainable, adaptable, effective and resilient rain and wastewater management, which includes the specific needs of vulnerable groups. Such a rain and wastewater management considers water reuse as a possibility to increase the available water supply. A growing number and increasing concentration of micropollutants in the aquatic environment are a health risk. It is important to understand their fate and effects and to develop appropriate management strategies. In such decision-making processes, all aspects of water management should be included and local stakeholders involved. Moreover, comprehensive and optimized information flows improve the understanding of water-related problems and must be used to help communities to set priorities, take action and assume responsibilities. Education, capacity building and community engagement are particularly important for creating ownership, identification with water resources and environmental consciousness.

Further research is needed in these areas to better understand challenges and chances of water management in growing urban areas and to develop scientifically based solutions. This scientific knowledge will build the basis for policy-making and implementation of actions in urban water management. In this way, we believe a better and more desirable urban environment can be achieved for future generations.

Integrated watershed management for urban areas

Urban areas cannot be seen as closed systems. As cities are part of the catchment-scale water cycle, they compete with other land uses, such as agriculture or mining, for their shared water resources. This conflict of use includes aspects of water quantity as well as quality. Consequently, urban water management issues should be faced as a whole. Smart management schemes should consider urban areas as an integrated part of watershed management, which has the potential to increase cities' resilience to intensified natural disturbances caused by climate change, such as floods and droughts (Birkmann et al., 2016).

Present-day water planning schemes in urban areas often do not link the impact and demand of different sectors, such as agriculture, industry or public services. Additionally, they often neglect challenges resulting from population growth and the linked increase in the demand for water, housing, energy and transportation (Bahri, 2012). In contrast, integrated watershed management includes all sectors in water-related management decisions. It is adaptable to the specific local and regional needs, because water demand and water-related problems are defined by local and regional conditions, such as climate, water availability, and ecological and socio-economical water quality and quantity needs. Integrated watershed management comprises internal components as well as external factors. Internal factors are man-made

structures such as legislations, institutional frameworks, sectors and stakeholders, and different scientific disciplines, while external factors are human requirements (consumptive and non-consumptive uses and contamination) and natural physiographic characteristics. Two external factors – groundwater and ecosystem services – are highlighted here and exemplify the need for an integrated watershed management.

Long-term responses from impacts on groundwater

Many cities are located in dry regions (e.g. Middle East, North Africa, Central Asia, Southwest USA, and Northeastern Brazil), where surface water resources are not reliable in their temporal availability. Moreover, many cities show heavily polluted surface water bodies (e.g. Dakar, Mumbai, and São Paulo). Consequently, more and more cities rely on groundwater to meet the freshwater demand. Groundwater is usually considered a safe resource as (i) it is protected by an unsaturated zone from direct contamination, and (ii) it is less affected by droughts due to average residence times of several years. However, cities' groundwater reserves are increasingly deteriorated by various anthropogenic actions, mostly related to unplanned urban expansion and economic growth. Generally, we can distinguish between two types of man-made impact. The first one is overuse, i.e. excessive groundwater withdrawal, which results in groundwater levels dropping, land subsidence, and saltwater intrusion or upconing, especially in coastal areas. Overuse usually happens in cities that share their underground water bodies (aquifers) with irrigated agricultural land – a conflict of use that recently became very prominent in California (Skelton, 2015). Moreover, cities experience a decrease in the natural recharge of their groundwater resources due to a high degree of ground sealing. The second negative anthropogenic impact is pollution, which results (i) from rainwater collecting contaminants at the ground surface, (ii) percolation through contaminant materials, such as solid waste disposals and (iii) leaking, or simply not existing, sewage systems (Foster and Tyso, 2015). The sustainable availability of safe freshwater also depends on interactions with surface water bodies. Surface waters can pollute groundwater and vice-versa. Some rivers keep their natural flow exclusively through the recharge from aquifers, and therefore the reduction of overexploitation and pollution is essential for the maintenance of the natural ecosystem of these rivers. In order to solve the problems related to the quality and quantity of cities' groundwater reserves, legal frameworks for long-term scales are needed. Furthermore, water allocation concepts must integrate all sectors of water use in order to preserve safe freshwater resources for the future.

(1) Phoenix Lake in Dortmund, Germany. The lake is an example of urban integrated watershed management, where the area, a former industrial plant, was revitalized featuring a lake for flood retention, recreational and commercial areas, as well as housing.
Source: Rupert Oberhäuser/Emschergenossenschaft

Future Research Questions:
1. How can sufficient freshwater supply from groundwater reserves be guaranteed, while managing this resource in a sustainable manner?
2. To what extent can we improve the recovery of groundwater reserves with technologies like managed aquifer recharge (MAR) using, for example, treated wastewater?
3. How can we couple the understanding of surface and sub-surface processes to develop better mechanisms to avoid contamination of groundwater from surface water and vice-versa?

Ecosystem services

Ecosystem services are the direct or indirect benefits people derive from ecosystems, which result in security, basic material for a good life, health, good social relations, and freedom of choice and action (MEA, 2005). Some of these ecosystem services are, however, increasingly threatened by unsustainable use and environmental degradation: a fact that is especially true for ecosystem services related to freshwater environments. This has been acknowledged by multiple directives that ask for the protection of ecosystem services, e.g. Aichi Biodiversity Targets (Convention on Biological Diversity, 2010), UN Sustainable Development Goals (UN, 2015a). Furthermore, the economic dimension of ecosystem services is of increasing interest and relevance (Hansjürgens et al., 2016). Hence, there is a clear need for ecosystem services to be integrated into local and regional planning (Martinez-Harms et al., 2015) to ensure their protection, with the long-term goal of safeguarding human well-being and also biodiversity.

Multi-functional management measures create areas that provide multiple ecosystem services to the local population. Restoring buffer strips along channelized river sections within urban areas, for example, provides new, enlarged "riparian" spaces that can be used for recreational purposes, such as walking, swimming or barbecuing. They also ensure better protection from flooding and create new habitats for aquatic and terrestrial organisms. Further, establishing more of such multi-purpose areas, with the potential to increase a system's resilience, could be a way forward to avoid critical tipping points. These tipping points are known to occur due to complex feedback mechanisms or interactions between two or more forces that lead to large, rapid and potentially irreversible changes with significant backlashes for human well-being (Leadley et al., 2010).

Future Research Questions:
1. Can ecosystem services (e.g. groundwater recharge, mass stabilization and erosion control, maintenance of water cycles, regulation of local and regional climate, etc.) that are lost due to the degradation of riparian vegetation be compensated upstream or downstream in a river catchment?
2. Can multi-purpose management measures help to reduce trade-offs between biodiversity conservation and the delivery of ecosystem services (e.g. water for sanitation) in urban areas? Can they help avoid tipping points?

Decision support systems and models

From the global perspective, urban areas experience an ongoing rapid growth and structural changes which increase the pressure on water resources. In order to preserve these resources for the future and to foster cities' resilience, urban water management schemes must be integrated into the watershed context and should be adaptable to specific local needs and challenges. To support such a flexible water management, tools, such as decision support systems (DSS), should be adaptable to specific situations and challenges as well. Hence, one general management tool does not work for all urban areas. Instead, bottom-up development schemes for specific DSS are needed.

Today, many decision support tools incorporate computer models, which shape decision-making processes. They are used to understand and visualize complex systems, calculate water budgets, and simulate scenarios. Models are always based on data, which has to be generated by monitoring (e.g. measuring water flows, surveys among stakeholders). As models are simplified representations of real world processes, they always include a certain degree of uncertainty. These uncertainties result from insufficient data, but also from a lack of appropriate model concepts. Especially in complex environments such as urban areas, present-day models are not able to encompass all relevant links between water-related processes, including the different sectors and disciplines. There is a need to bridge gaps between different model types (e.g. natural processes versus socio-economic responses) and to find smart solutions to link them. Additionally, in order to make these new and more complex management processes successful, it is vital to make them transparent and to increase people's awareness and support for water-related issues (see chapter Information Flow and People's Involvement).

Future Research Questions:
1. What new model concepts are there that link all relevant water-related processes?
2. How can different water demands be measured and considered in defining water withdrawal limits and how can easily applicable models for this task be developed?
3. Which basic components of a DSS are common to all situations and which components are specific to the local question and therefore need to be flexible?

Sustainable sanitation and rainwater management

Sustainable sanitation systems are vital to human health and to the quality of aquatic ecosystems. They are characterized by being economically viable, socially acceptable, and technically and institutionally appropriate systems for the collection, transport and treatment of human excreta. They should ideally also protect the environment and natural resources. In many parts of the world, urban growth is often unplanned and uncontrolled, which results in gaps of the provision of sanitary facilities and threatens sanitary safety. Moreover, in urban areas, space for implementing sustainable sanitation systems is usually limited. Additionally, extreme rain events, which are predicted to occur more frequently in some regions owing to climate change, can cause overflows and contamination of aquatic ecosystems, while during droughts increasing concentrations of contaminants may occur (Wu et al., 2016). The augmented discharge of known and emergent contaminants can furthermore result in yet unknown effects on human health and aquatic ecosystems (see chapter on Micropollutants). From our perspective, the following research

areas and questions are relevant for the future development of sustainable sanitation and rainwater management in urban regions:

Access to sanitary system

Uncontrolled, fast-growing (peripheral/periurban) areas of cities often lack sanitary infrastructure, posing a specific threat to the urban water cycle and to human health. In these areas, water bodies become means for wastewater disposal and thus a hygienic risk (Fletcher et al., 2013). Inefficient or poorly managed decentralized technologies like septic tanks or pit latrines cause diffuse pollution (Bahri, 2012). Hence, the connection of households to the urban sewer systems is usually perceived as a prerequisite for the prevention of sanitary and environmental problems. However, maintenance of the sanitary system from collection to transport, treatment, reuse and disposal has to be guaranteed. If the connection of emerging peripheral areas to the system can be realized by means of planning and construction, this would be a solution. In areas where connection to the sanitary infrastructure is challenging or even not possible, decentral solutions may be the answer. In this case, new approaches must be developed in order to collect and treat all liquid emissions. Moreover, suitable and sustainable sanitary solutions that are demand-driven, adapted to local requirements and elaborated with the participation of all stakeholders, taking into account the specific needs of vulnerable groups, have to be identified and implemented (Lüthi et al., 2012). In this context, engineering innovations, such as phytotechnologies (Zalewski and Wagner-Lotkowska, 2004), should always go along with capacity building (e.g. ISOE, 2016) and it is of crucial importance that the local population accompanies and influences the development and adaptation of technologies (see also chapter on Information Flow and People's Involvement).

(2) Cesspit used for wastewater disposal in a poor community situated at the southern region of Parelheiros District (Municipality of São Paulo). It is not unusual to find cesspits dug up to the water table, bringing pollution to groundwater that will be exploited by nearby dug wells.
Source: Alexandra Suhogusoff

Future Research Questions:
1. How can we ensure universal access to sanitation, using urban planning and capacity building?
2. How can we enhance sanitation systems that are adequate and equitable, embedding them into a holistic strategy, which includes water, sanitation and hygiene issues (WASH)?
3. How can legal frameworks and economic incentives be developed in context of good governance to improve urban sanitary infrastructure and use?

Wastewater management

In urban areas, wastewater treatment has traditionally relied on centralized treatment systems. However, Wastewater Treatment Plants (WWTPs) and sewer systems may become quickly overloaded and inefficient owing to fast urbanization. Additionally, the potential of wastewater to be a resource, from which heat, fertilizers, metals and other substances can be extracted and reused, has often been neglected. Furthermore, in periurban areas that are less densely occupied, connection to the centralized system may be an expensive alternative. Thus, the optimal solution may be based on semi-decentralized systems, which are a combination of a central WWTP and additional small, decentralized units. This may also create opportunities for recycling wastewater in the context of 'zero emission' and 'zero waste' urban environments (e.g. zero emission regional planning, described in Varga & Kuehr, 2007 or eco-cities portrayed in Joss et al., 2011). In these cases, monitoring and control are relevant issues. Regardless of the selected wastewater treatment system (centralized, decentralized or semi-decentralized), professional expertise and practi-

cal skill as well as monitoring of all activities are essential for its success. Optimizing cost-effectiveness, building even more sustainable systems (e.g. long-lasting new materials) and improving WWTP's efficiency (including pathogen elimination) are also important issues related to sanitation in urban areas. Financial sustainability and economic aspects, such as the potential for new jobs and creating business opportunities, should not be neglected.

Future Research Questions:
1. Are there alternative strategies for optimizing effectiveness of wastewater treatment in urban and periurban areas (centralized/semi-decentralized/decentralized)?
2. Are there new long-lasting, corrosion-resistant materials for adaptable sewer systems?

Rainwater management

Diffuse pollution, resulting from contaminated runoff water, is still a problem facing developed and developing countries. Research challenges are how to deal with (i) increasing pollutant loads (especially suspended solids and related contaminants) in runoff that reaches aquatic ecosystems and (ii) new emerging contaminants (Fletcher et al., 2013). Aiming at decreasing runoff quantity and improving runoff water quality, several techniques such as rain gardens and constructed wetlands have already been applied around the world under different frameworks. Since the effectiveness varies from site to site and depends on the covered urban area, it is necessary to spread and adapt them to achieve significant results. Further research is also necessary to improve techniques aiming to prevent pollution emission and thus to reduce runoff pollution before it reaches water bodies (e.g. reducing phosphorus in detergents and sulphur concentration in fuels). In general, techniques are not yet well established owing, for example, to a lack of standardized protocols for monitoring and variability in catchment characteristics. Furthermore, these techniques rely mostly on bioretention and infiltration and must be improved for implementation in areas with special characteristics, such as high slopes and high water tables. More research is needed to improve the efficiency of these solutions and to investigate better ways to combine and locate them.

Future Research Question:
1. How can we reduce runoff quantity and improve runoff water quality discharged into aquatic environments in order to prevent sanitary and environmental problems?

Water reuse

Water reuse is an environmental-friendly and a low-cost opportunity to increase the available supply of water (Nasiri et al., 2013), for example using greywater (wastewater without fecal contamination) for watering gardens, toilet flushing, or washing clothes. In this context, implementing water reuse in cities can generate sustainable water supply solutions, improve water supply resilience and help reaching the 'zero emission' goal, i.e. a system within which all discharges are recycled and no pollutants are discharged. Therefore, it is necessary to include options for water reuse in urban planning, apply innovative policies for building adapted infrastructure and develop specific regulatory provisions, including economic incentive schemes (Wilcox et al., 2016). Acceptance of these systems and participation of stakeholders, especially of the local population, are crucial (see also chapter on Information Flow and People's Involvement). Different treatments are necessary according to the reuse source and also for the different uses that this resource will have. Such reuse sources can be greywater or blackwater, the latter meaning wastewater containing human waste. Therefore, new and efficient treatment technologies must be developed in order to fit the needs of the stakeholders (Tortajada, 2006). Furthermore, laws regarding quality parameters have to be established and enforced for each specific use (direct potable uses, indirect potable uses, non-potable uses such as irrigation of urban agriculture and industrial uses) and controlled properly, in order to protect public health and avoid environmental impacts (UNEP/GEC, 2005). It is necessary to develop adapted, low-cost and effective infrastructure systems to distribute the reused water. In most cases, buildings have to be retrofitted. Besides infrastructure, educating planners and practitioners (capacity building) is of crucial importance in order to ensure the proper functioning of the systems (UNEP/GEC, 2005).

Future Research Questions:
1. How can we make sure water reuse is included in urban planning (new infrastructure, retrofitting)?
2. How can we elaborate legal frameworks (quality parameters) and what are the incentives for water reuse, taking into account human health security and public acceptance?
3. How can we improve the economic and technical efficiency of wastewater treatment, considering the suitability for water reuse and resources recovery?

All these propositions for the implementation of sustainable sanitation in urban areas rely on adequate surveillance and good governance within urban regions. In this context, and as pointed out in the last section of this paper, Information Flow and People's Involvement, the participation of stakeholders, especially the local people affected, is one cornerstone for designing and implementing successful sanitation strategies, thus increasing acceptance and ownership. Building local capacities is another part of these processes and creates (economic) perspectives. Finally, to ensure the positive impact of improved sanitation measures on human health in urban areas, communication between the health and water sectors needs to be improved, e.g. to prevent outbreaks of waterborne diseases. These issues have to be tackled with urgency in order to accompany the fast growth of urban areas.

Micropollutants

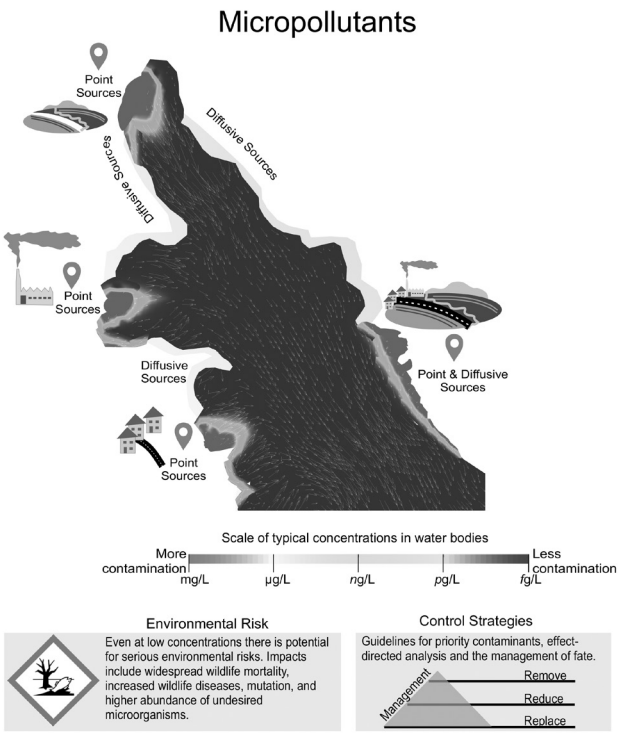
Micropollutants are substances which cause deleterious effects on organisms' health or water uses at trace concentrations (Luo et al. 2014). Some examples of problematic micropollutants are pharmaceuticals, metals, pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH; class of substances that originate mostly from combustion of organic matter and that are cancerogenic or might be endocrine disruptors) (European Parliament, 2008). Micropollutants have relevant impacts on freshwater systems and many urban water bodies. These contaminants enter the water bodies by various human activities and they are often not removed by conventional wastewater treatment (Luo et al. 2014). Pharmaceuticals may remain active after passing through the human body and wastewater treatment plants, with consequences for various aquatic organisms. For example, estrogenically active compounds can impact the reproduction of aquatic wildlife (Schug et al., 2016), or the excessive use of antibiotics by the human population and in farming contributes to the development of multiresistant bacteria strains (e.g. Furtula et al., 2010, Hölzel et al., 2010).

Guidelines for water management are available for some individual pollutants (see below, section Management Tools and Solutions). Nevertheless, a much larger number of contaminants is released into the environment compared to what is legally regulated. Such pollutants occur mostly as complex mixtures that have synergistic, additive and antagonistic effects on human health and on the environment. Recent reports suggest that mixtures of pharmaceuticals show greater effects compared to the individual compounds, especially after chronic exposure (Petrie et al., 2015). Additionally, organic compounds undergo chemical and biological degradation, which generates a diversity of metabolites that are often unknown and may be toxic as well (Machado et al., 2017). Given the current scientific knowledge, it remains a relevant challenge to identify the individual compounds as well as to predict the impacts of contaminant mixtures on urban waters. Therefore, it is crucial to conduct future research on the above mentioned issues, focusing on the major challenges, management tools and solutions.

Improving risk assessment for micropollutants

Individual contaminants have traditionally been the basis of environmental quality standards and regulations (European Parliament, 2008; EPA, 2017). Therefore, continuous efforts to prioritize single contaminants and dangerous mixtures may form a basis for a scientifically sound, contaminant-directed management. In this context, priority micropollutants could be classified by their chemical properties (e.g. metals, polychlorinated biphenyls-PCBs), their function (usage; e.g. agrochemicals, pharmaceuticals) or public awareness (persistent organic pollutants-POPs, traditional, emerging). Such classification is useful for assessing their fate, controlling their release, and communicating problems, respectively. Notwithstanding the importance of contaminant prioritization, it is unlikely that all individual contaminants and their potential mixtures would be addressed within a time-frame suitable to management actions. The American Chemical Society reports >117 million organic and inorganic chemical compounds that have been manipulated by humans (CAS Registry, 2016). Additionally, the CAS Registry updates daily ~15,000 new compounds, with 1–2 % of them entering the market and, eventually, the environment (CAS Registry, 2016). Therefore, innovative approaches for identification and mitigation of the effects of environmental contaminants are required. In this context, a promising alternative for improving the risk assessment of micropollutants is the effect-directed analysis (EDA) (Brack, 2003). This method is receiving increased attention because it focuses on the potential biological effects of substance mixtures to identify the chemical compounds driving the toxicity (Burgess et al., 2013). Such an EDA approach often provides a cost-effective identification of problematic contaminants in complex mixtures and might support more efficient risk assessments of contaminant mixtures.

Future Research Question:
1. How can we improve prioritization of individual micropollutants and their mixtures?
2. How can effect-directed analyses or other new technologies be enhanced to address the toxicology and impact of micropollutants?



(3) Fate and Effects of micropollutants in a hypothetical urban water body, performed by hydrodynamic modelling. The flow field, represented by white arrows, and the emissions from punctual or diffusive sources (i.e. agriculture, industry, domestic waste, roads) are shown. The lower boxes highlight potential effects of micropollutants as well as control and management strategies.
Source: own presentation

Fate and effects

Given the large number of different micropollutants and their various potential effects on the biota, it is important to better understand their environmental behavior and interaction with organisms in order to control their deleterious consequences. The fate of contaminants is determined by the combination of many anthropogenic and natural (biotic and abiotic) variables and processes that influence the contaminant environmental behavior (source, transport, transformations, and environmental concentrations) (Machado et al., 2016). In turn, the effects of contaminants depend on the level of contamination, organism biology, organism physiology and environmental conditions (Monserrat et al., 2007). Forecasting and managing fate and effects of contaminants might be a challenging task, given the high complexity of the processes and the large number of unknown variables. Thus, there is a need for further research on the environmental behavior and potential effects of relevant environmental contaminants, their mixtures and metabolites in aquatic ecosystems.

Regarding the tools to better understand and manage fate and effects of environmental traditional and emerging micropollutants, it is crucial to invest in the collection of laboratory data on chemical properties and toxicity (EPA, 2017). Similarly, the acquisition of field data on contaminant concentrations accompanied by information on environmental health might be essential to elucidate the underlying mechanisms and the resulting impacts of micropollutants. In this sense, approaches such as biomonitors, bioindicators, biomarkers, toxicity tests and/or techniques such as effect-directed analysis (Brack, 2003) are promising tools that might help to characterize the nature and severity of effects (Monserrat et al., 2007). Likewise, the use of state-of-the-art multidisciplinary models might constitute useful tools in the field and laboratory analyses. In fact, different scenarios that consider various variables and processes (e.g. climate conditions, anthropogenic inputs) can be conveniently investigated using combinations of hydrodynamics, water quality and transport models (e.g. Matta et al., 2016), as reported in Figure 3. Coupled hydrodynamic and water quality models have been successfully used in management measures on contaminated sediments in Dutch rivers (Alonso, 2010). Similarly, the coupling of chemical-biological models has been of great use when implementing site-specific environmental quality criteria for trace metals (Paquin et al., 2003).

Last but not least, we suggest increasing efforts in order to understand and enhance the water quality biological degradation within wastewater treatment systems (and in natural environments) through an enhanced microbial activity. Concentration increases through membrane filtration might enable microorganisms to use even micropollutants as food source.

Future Research Questions:
1. What are the fate and the effects of micropollutants (substances and mixtures) on both human and environmental health?
2. How can multidisciplinary modelling help to investigate fate and effects of micropollutants?
3. Can biological degradation be a possible solution for the degradation of micropollutants?

Management tools and solutions

There are promising management tools and solutions related to the challenging tasks of controlling micropollutants in urban waters (surface and groundwater). Firstly, the increasing awareness of the general public, environmental authorities and stakeholders has resulted in a number of international guidelines on the

prioritization and assessment of contaminant toxic effects (European Parliament, 2008; EPA, 2017). For instance, Brazilian resolutions such as the Ordinance of the Ministry of Health (2.914/2011) determine the limits for some priority contaminants in drinking water. In terms of environmental contamination, the Brazilian resolutions 357 (CONAMA, 2005) and 396 (CONAMA, 2008) classify respectively surface water bodies and groundwater, and determine that the mixture of contaminants should not cause toxicity to wildlife, opening a legal framework for an effect-directed analysis. In a similar way, the European Commission has reported the need to establish acceptable contaminant threshold values on water sediment and biota for a more successful implementation of the Water Framework Directive (European Parliament, 2000). Guidelines for the scientifically sound establishment of the fate of priority contaminant mixtures in Europe are also available (European Commission, 2012). While there are some guidelines available, the establishment and implementation of appropriate science-based environmental quality standards remain an important topic requiring further research and policy action.

Environmental management is particularly dependent on scientific evidence and expertise; in fact, without it there would be no basis for environmental regulation. The so-called precautionary principle has emerged as an approach for environmental protection (European Parliament, 2008), providing the philosophical authority to take decisions in the face of uncertainty. Substantial evidence (WHO, 2004) supports the conclusion that contemporary environmental health risks result from complex interactions among genetic, nutritional, environmental and socioeconomic factors. The precautionary principle can be used to encourage research, innovation and transdisciplinary problem-solving dealing with complex risks (WHO, 2004).

Some of the management attempts to reduce the release of micropollutants in the environment are tackling of problematic substances or mixtures and replacing them by less toxic alternatives, or the development of strategies to reduce their release in the environment. An alternative strategy is the removal of micropollutants either directly from the input source (e.g. enforcement of enhanced treatment of hospital wastewater to remove pharmaceuticals) or in the process of municipal wastewater treatment. Several conventional methods can be applied to achieve this aim (e.g. activated charcoal treatment) (Luo et al., 2014). So far, these methods are expensive and might not be applicable in all situations. First applications of such alternative techniques already gave promising results (Ali et al., 2012). Nevertheless, cheaper and more efficient methods to remove micropollutants have to be developed; research into such processes is urgently needed.

Future Research Questions:
1. How can we better implement guidelines for environmental quality standards?
2. How can we reduce or replace the use of micropollutants?
3. Which are the effective technologies to remove micropollutants based on the input sources?

Information flow and people's involvement

Currently, communication in water science and water planning is mostly done in a top-down approach. Information about water and water management is distributed via politicians, decision-makers, scientists and managers to the people directly affected by their decisions and actions. These people frequently cannot express their water-related ideas, wishes and worries, nor can they influence the decisions that affect them. By following this one-way-approach, useful information gets lost and can no longer be fed into urban (water) planning, resulting in additional costs for the society (EAA, 2014). However, this information must be used not only to optimize urban water planning in terms of cost-efficiency, but rather to establish environmental goods as a cultural value, to guarantee acceptance for water-related measures by relevant stakeholders and creating a solid base of information on which urban water science of excellence can be developed.

Cities where the community is empowered and has a basic knowledge related to water issues will have more eyes watching out for problems, more brains developing solutions and more people talking to each other to solve the issue. With the right knowledge and support, citizens may generate data and local solutions at low or no cost for regulators and companies. Money and time are saved by good communication flows, community empowerment, iterative process improvements, and adequate use of pricing and funding instruments. The challenge is how to implement multi-directional communication structures, which enable participation of the population in an efficient, systematic, sustainable, and transparent way. In addition, scientific basis, data availability, truthfulness and unification are paramount for an information flow, enabling stakeholders to actively manage water resources and offering transparent results to the public. From our perspective, the following research areas and questions are relevant for stakeholder engagement and information flow in urban water management:

Information flows

Information flows must be used in water-related issues to foster participatory processes. The first challenge is to identify the existing information flows, how they work and where they do not. Thus, it is possible to identify bottlenecks and lack of communication channels, taking into account the goals that need to be achieved, the scale of the issue that is being addressed, and the level of participation of all relevant stakeholders (the general public, scientists, school teachers, water supply companies, governmental agencies, lawmakers, etc.) interested in the water related issues (ICWE, 1992). The main objective is multi-directional communication, i.e. between all stakeholders, adapting the information to the cultural background of the focus group. For example, publicity events related to water issues do not just raise the awareness for potentially toxic substances and how to prevent their release to the environment, but also may induce reflection, possibly changing the behavior of the citizens. Such a status quo analysis is particularly important to set up a water information policy. It also helps to understand the interdisciplinarity of any problem-solving approach.

Communication and the creation of platforms for exchange about water resources focused on specific stakeholders can help by involving key actors in the process. Moreover, the adoption of existing or new lobby structures can be used to reach stakeholders at higher political levels. Getting all relevant stakeholders involved in the generating and use of information will improve ownership and understanding of water-related issues. This is the basis for participatory decision-making processes where stakeholders' interests – from politicians to water managers to affected people – are included.

Future Research Questions:
1. What are the information flows related to water issues, and how do they work?
2. How do we transform one-directional information flow into a participatory, engaging process?

Digitalization

Digitalization is a key factor for generating participation and engagement. It is already transforming our societies, particularly by changing the direction and extent of information flows. The water sector will no longer be an exception, as the potential benefits are attractive (GWP, 2016). Digital technologies are useful because they allow people to access large amounts of information, give feedback, or even generate new

(4) In a community school situated in Parelheiros District (Municipality of São Paulo), graduate students from University of São Paulo present instructions related to dug wells sanitation, cesspits ideal location, and cleaning steps for disinfection of wells, water storage tanks and drinking water.
Source: Alexandra Suhogusoff

information. Furthermore, new mechanisms of including stakeholder's perspectives and suggestions into water management have to be identified and tested. For example, a citizen might report grey water illegally flowing into a creek via a smartphone application and this report would then appear on an interactive online map. Engagement, participation and awareness of the people with regard to causes related to water resources can be fostered through the development of user-friendly technologies. They also allow for monitoring by members of the public. A recent study (Le Coz et al., 2016) showed how social media can be used to promote the collection of photos and videos to better assess river flows and to improve flood mapping after severe events. Such initiatives show how qualitative and quantitative data can be collected by the public and used in hydrology. Traditional media such as radio and TV should also not be forgotten, as they usually reach people of all ages and in isolated places.

Finally, two threats related to digital technologies have to be considered: (i) Big data companies already collect water-related data and perform commercial research on how to foster digitalization and integrate user-information (e.g. water consumption behavior). This implies a high potential for collaboration in communication processes, but also entails the risk of engaging big data companies acting for their own profits. Scientific research focusing on steering and generating information flows is necessary, so that this information is not restricted, selected or changed due to particular

interests. (ii) Digital technologies create a mass of irrelevant or even misleading data by which bottom-up communication and participation are especially affected. Therefore, guidelines and rules as well as control mechanisms need to be implemented.

Future Research Questions:
1. How can scientists working on water-related information flows balance the risks and benefits of collaborating with big data companies?
2. What user-friendly technologies can be used for the exchange of water information among specific target groups (e.g. school children, elderly, disabled people etc.)?

Self-sustained development of information flows

Information policy might change in the long run due to self-sustained development: Human relations are very effective for spreading messages, and for increasing sensibility for topics. Tools for managing communication and participatory decision-making have to be developed, taking into account an interdisciplinary approach. The participation of children and students must be further developed, because they function as multipliers. Educators must promote, test and stimulate new approaches in this area. Furthermore, citizen science can be a way to actively engage people in water-related scientific research. Activities embracing students, families and societies as a whole, such as living labs (Niitamo et al., 2006), must be incentivized to create awareness and ownership. The people's participation in information flows creates actors who are capable of receiving and producing data, increasing critical discernment. This kind of self-sustained development makes parts of the top-down communication system obsolete by a direct uptake of citizens' opinions and needs. Thus, water information policy needs to be flexible and transparent and has to adapt over time with regard to new needs and objectives. One format for such exchange could be a concept presently developed in Germany called "Reallabore" or "Real World Laboratories" (Bernet et al., 2016).

(5) Connect Stakeholders.
Source: own presentation

Future Research Questions:
1. How should water information processes adapt to self-sustained development?
2. How can human relations be used to spread water-related information?

Pricing and water information policy

Pricing is a less obvious and purely top-down instrument of communication. However, it is among the most powerful ones, and will always motivate bottom-up information flows. In this sense, important linkages are: (i) The level of prices, incorporating resource costs and external costs of pollution (OECD, 2009b), must raise the awareness of the "true value" of water. The "true value" informs people about the scarcity of the resource and its limited capacity to absorb pollution. (ii) The price structure can set appropriate incentives to reduce water consumption, reuse water, unseal surfaces for improved rainwater management or prohibit water pollution. For example, the latter can be achieved by a pollution-related basis of assessment, which is particularly interesting for large industrial polluters. Setting incentives must take the customers' behavior into account in order to develop comprehensive long-term strategies (e.g. investment in water-efficient technologies or in-house wastewater treatment will trigger water tariff reduction for those customers). Acceptance can be strengthened when the price structure copes with different and sometimes conflicting objectives (AWWA, 2012), such as social tariffs for vulnerable communities. The need for tariff balances can be perceived in participatory processes. Such processes also allow understanding the need for monitoring activities. (iii) Funds from pricing must guarantee the operability of water services and cover private costs, if possible (OECD, 2009b). They can also be used to fund new information flows, e.g. to educate the population about the rational use of water. There is potential for social net benefit because these information flows might significantly lower the costs for providing water services (see above, section Information Flows). Funds can also be

used to implement market-based instruments (OECD, 2013), e.g. schemes for trading abstraction rights or pollution rights, as these instruments generate valuable information flows between market participants.

Future Research Question:
1. How can pricing be embedded into water information policy?

References

– Ali, I., Asim, M., Khan, T.A. (2012): Low Cost Adsorbents for the Removal of Organic Pollutants from Wastewater, Journal of Environmental Management 113: 170–183.
– Alonso, J.J.J. (2010): Heavy Metal Pollution and Sediment Transport in the Rhinemeuse Estuary, Using a 2D Model Delft3D Water quality and Calamities, Case study, Biesbosch.
– Anthonj, C., Beskow, S., Dornelles, F., Terumi Fushita, A., Alves Galharte, C., Galvão, P., Gatti Junior, P., Gücker, B., Hildebrandt, A., Karthe, D., Knillmann, S., Kotsila, P., Krauze, K., Kledson Leal Silva, A., Lehmann, P., Moura, P., Andricioli Periotto, N., Rodrigues Filho, J.L., Lopes dos Santos, D.R., Selge, F., Silva, T., Soares, R.M., Strohbach, M., Suhogusoff, A., Wahnfried, I., Zandonà, E., Zasada, I. (2014): Water in Urban Regions: Building Future Knowledge to Integrate Land Use, Ecosystem Services and Human Health, German National Academy of Sciences Leopoldina, Brazilian Academy of Sciences, German Young Academy (Publishers). Halle/Saale, Rio de Janeiro, Berlin.
– AWWA – American Water Works Association (2012): Principles of Water Rates, Fees, and Charge, AWWA Manual M1, 6th Edition, Denver.
– Bahri, A. (2012): Integrated Urban Water Management, TEC Background Papers, 16, Global Water Partnership Technical Committee, www.gwp.org, retrieved: 8th February 2017.
– Bernet, Ph., Haaser, A., Kühl, L., Schaal, T. (2016): Towards the „Real-world Laboratory“, Gaia 4/2016: 253-259.
– Birkmann, J., Welle, T., Solecki, W., Lwasa, S., Garschagen, M. (2016): Boost Resilience of Small and Mid-sized Cities, Nature 537: 605–608.
– Brack, W. (2003): Effect-Directed Analysis: a Promising Tool for the Identification of Organic Toxicants in Complex Mixtures? Analytical and Bioanalytical Chemistry 377: 397.
– Burgess, R.M., Ho, K.T., Brack, W., Lamoree, M. (2013): Effects-Directed Analysis (EDA) and Toxicity Identification Evaluation (TIE): Complementary but Different Approaches for Diagnosing Causes of Environmental Toxicity, Environmental Toxicology and Chemistry 32(9): 1935–1945.
– CAS Registry (2017): www.cas.org/content/chemical-substances, retrieved: 8 February 2017.
– CONAMA Resolution (2005): Rules on the Classification of Water Bodies and Environmental Guidelines for its Framework and Establishes the Conditions and Effluent Discharge Standards and Makes Other Provisions, National Environmental Council Resolution No. 357/2005 – DOU Publication: 18/03/2005, www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf, retrieved: 8 February 2017.
– CONAMA Resolution (2008): Rules on the Classification of Groundwater and Environmental Guidelines for its Framework and Makes Other Provisions, National Environmental Council Resolution No. 396/2008 - DOU Publication: 07/04/2008, http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562, retrieved: 8 February 2017.
Convention on Biological Diversity (2010): Aichi Biodiversity Targets 14-16, https://www.cbd.int/sp/targets/, retrieved: 3 March 2017.
EAA – European Environmental Agency (2014): Public Participation: Contributing to Better Water Management, EAA Report, 3/2014, Copenhagen.
– European Parliament (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, Brussels.
European Parliament (2008): Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008, Brussels.
European Parliament (2012): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy, abbreviated: COM/2011/0876 final - 2011/0429 (COD), Brussels.
EPA - United States Environmental Protection Agency (2017): Toxic and Priority Pollutants Under the Clean Water Act, https://www.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act, retrieved: 7 March 2017.
– Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P. (2013): Understanding, Management and Modelling of Urban Hydrology and its Consequences for Receiving Waters: A State of the Art, Advances in Water Resources 51: 261-279.
– Foster, S., Tyso, G. (2015): Resilient Cities and Groundwater, International Association of Hydrogeologists - Strategic Overview Series.
Furtula, V., Farrell, E.G., Diarrassouba, F., Rempel, H., Pritchard, J., Diarra, M.S. (2010): Veterinary Pharmaceuticals and Antibiotic Resistance of Escherichia Coli Isolates in Poultry Litter from Commercial Farms and Controlled Feeding Trials, Poultry Science 89 (1): 180-188, doi:10.3382/ps.2009-00198.
– GWP – German Water Partnership (2016): Wasser 4.0, brochure for the importance of digitalization and automatization in the water sector, www.germanwaterpartnership.de/fileadmin/pdfs/gwp_materialien/gwp_wasser_40.pdf, retrieved: 8 February 2017.
– Hansjürgens, B., Kehl, Ch., Loft, L. (2016): The economic approach to ecosystem services and biodiversity: policy design and institutions matter, Gaia 3/2016: 174 -178.
– Hölzel, C.S., Harms, K.S., Küchenhoff, H., Kunz, A., Müller, C., Meyer, K., Schwaiger, K., Bauer, J. (2010): Phenotypic and Genotypic Bacterial Antimicrobial Resistance in Liquid Pig Manure is Variously Associated with Contents of Tetracyclines and Sulfonamides, Journal of Applied Microbiology 108: 1642–1656, doi:10.1111 1/j.1365-2672.2009.04570.
– ICWE – International Conference on Water and the Environment (1992): The Dublin Statement on Water and Sustainable Development, www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/english/icwedece.html, retrieved: 8 February 2017.
– ISOE (2016): CuveWaters – Sustainable Water Management in Namibia, www.isoe.de/en/projects/current-projects/wasserressourcen-und-landnutzung/cuvewaters/, retrieved: 8 February 2017.
– Joss, S., Tomozeiu, D., Cowley, R. (2011): Eco-cities - A global survey 2011: Eco-city profiles, University of Westminster, London.
Leadley, P., Pereira, H.M., Alkemade, R., Fernandez-Manjarrés, J.F., Proença, V., Scharlemann, J.P.W., Walpole, M.J. (2010): Biodiversity Scenarios: Projections of 21st Century Change in Biodiversity and Associated Ecosystem Services, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal.
– Le Coz, J., Patalano, A., Collins, D., Guillén, N.F., García, C.M., Smart, G.M., Bind, J., Chiaverini, A., Le Boursicaud, R., Dramais, G., Braud, I. (2016): Crowdsourced Data for Flood Hydrology: Feedback from Recent Citizen Science Projects in Argentina, France and New Zealand, Journal of Hydrology 541: 766-777.
Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Zhang, J., Liang, S., Wang, X.C. (2014): A Review on the Occurrence of Micropollutants in the Aquatic Environment and their Fate and Removal During Wastewater Treatment, Science of the Total Environment 473–474: 619–641.
– Lüthi, C., Lehn, H., Norström, A., Panesar, A., Rüd, S., Saywell, D., Verhagen, J., Ulrich, L., Ingle, R. (2012): SuSanA factsheet: Planning of sustainable sanitation for cities. In: Münch, E., Ingle, R., Mbalo, D., Kappa, L. (eds.), Compilation of 13 factsheets on key sanitation topics, Sustainable Sanitation Alliance c/o, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn.
Machado, A.A.S., Spencer, K., Kloas, W., Toffolon, M., Zarfl, C. (2016): Metal Fate and Effects in Estuaries: A Review and Conceptual Model for Better Understanding of Toxicity, Science of the Total Environment 541: 268-281.
– Machado, A.A.S., Valyi, K., Rillig, M.C. (2017): Potential Environmental Impacts of an “Underground Revolution”. A Response to Bender et al., Trends in Ecology and Evolution, in press.

– Martinez-Harms, M.J., Bryan, B.A., Balvanera, P., Law, E.A., Rhodes, J.R., Possingham, H.P., Wilson, K.A. (2015): Making Decisions for Managing Ecosystem Services, Biological Conservation 184: 229–238.
Matta, E., Selge, F., Gunkel, G., Rossiter, K., Jourieh, A., Hinkelmann, R. (2016): Simulations of Nutrient Emissions from a Net Cage Aquaculture System in a Brazilian Bay, Water Science and Technology 73(10): 2430-2435.
– Monserrat, J.M., Martinéz, P.B., Geracitano, L.A., Amado, L.L., Martins, C.M.G., Pinho, G.L.L., Chaves, I.S., Ferreira-Cravo, M., Ventura-Lima, J., Bianchini A. (2007): Pollution Biomarkers in Estuarine Animals: Critical Review and New Perspectives, Comparative Biochemistry and Physiology C 146: 221-234.
– Nasiri, F., Savage, T., Wang, R., Barawid, N., Zimmerman, J.B. (2013): A System Dynamics Approach for Urban Water Reuse Planning: a Case Study from the Great Lakes Region, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 27(3): 675-691.
– Niitamo, V.P., Kulkki, S., Eriksson, M., Hribernik, K.A. (2006): State-of-the-Art and Good Practice in the Field of Living Labs, International Technology Management Conference (ICE).
– OECD – Organisation for Economic Co-operation Development (2009a), Private Sector Participation in Water Infrastructure: OECD Checklist for Public Action, Paris.
– OECD – Organisation for Economic Co-operation Development (2009b), Managing Water for All: An OECD Perspective on Pricing and Financing, Paris.
– OECD – Organisation for Economic Co-operation Development (2013), Water Security for Better Lives, OECD Studies of Water, Paris.
Ordinance of the Ministry of Health (2011): Regulates the Procedures for Control and Surveillance of Water Quality for Human Consumption and its Portability Standards, Ordinance No. 2914, http://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/PORTARIA%20No%202.914,%20DE%2012%20DE%20DEZEMBRO%20DE%202011.pdf, retrieved: 8 February 2017
– Paquin, P.R., Farley, K., Santore, R.C., Kavadas, C.D., Mooney, C.G., Wu, K.-B., Di Toro, D.M. (2003): Metals in Aquatic Systems: A Review of Exposure Bioaccumulation, and Toxicity Models. SETAC, Pensacola.
– Rodriguez, D.J., van den Berg, C., McMahon, A. (2012): Investing in Water Infrastructure: Capital, Operations and Maintenance, Water Paper, World Bank, Washington DC.
– Schug, T.T., Johnson, A.F., Birnbaum, L.S., Colborn, T., Guillette, L.J. Jr., Crews, D.P., Collins T., Soto, A.M., Vom Saal, F.S., McLachlan, J.A., Sonnenschein, C., Heindel, J.J. (2016): Minireview: Endocrine Disruptors: Past Lessons and Future Directions. Molecular Endocrinology 30(8): 833-47, doi: 10.1210/me.2016-1096.
– Skelton, G. (2015): In California, rights to water exceed the supply, Los Angeles Times, 12 April 2015, http://www.latimes.com/local/politics/la-me-cap-drought-water-20150413-column.html, retrieved: 3 March 2017.
– Tortajada, C. (2006): Water Management in Singapore, Water Resources Development 22(2): 227-240.
UN (2015a): Sustainable Development Goals, http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/, retrieved 3 March 2017.
– UN (2015b): World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, New York.
– UNEP/GEC (2005): Water and Wastewater Reuse - An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management, United Nations Environment Programme, Osaka and Shiga.
Varga, M., Kuehr, R. (2007): Integrative approaches towards zero emissions regional planning: Synergies of concepts, Journal of Cleaner Production 15: 1373-1381.
– Wilcox, J., Nasiri, F., Bell, S., Rahaman, M.S. (2016): Urban Water Reuse: A Triple Bottom Line Assessment Framework and Review, Sustainable Cities and Society 27: 448-456.
World Health Organization, Martuzzi, M., Tickner, J.A. (Eds.) (2004): The Precautionary Principle: Protecting Public Health, the Environment and the Future of our Children, Copenhagen.
– Wu, J., Franzén, D., Malmström, M.E. (2016): Nutrient Flows Following Changes in Source Strengths, Land Use and Climate in an Urban Catchment, Råcksta Träsk in Stockholm, Sweden, Ecological Modelling 338: 69-77.
– Zalewski, M., Wagner-Lotkowska, I. (2004): Manual for Integrated Watershed Management - Ecohydrology and Phytotechnology, United Nations Environment Programme, http://ecohydrology-ihp.org/demosites/resources/arquivos/existingpublications/2004-UNESCO-EH-GUIDELINES.pdf, retrieved: 8th February 2017.

Zuerst veröffentlicht in *Science policy report,* April 2017
Mit freundlicher Genehmigung von
– Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.
Nationale Akademie der Wissenschaften
German National Academy of Sciences Leopoldina
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale), Germany
– Academia Brasileira de Ciências (ABC)
Brazilian Academy of Sciences
Rua Anfilófio de Carvalho, 29, 3° andar, Rio de Janeiro, Brazil
– Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU)
Universität Duisburg-Essen
Centre for Water and Environmental Research
Universitätsstraße 2, 45141 Essen, Germany

Authors

(6) The authoring group of young scientists, senior experts and academy representatives at the Workshop „How Do We Want to Live Tomorrow? Perspectives on Water Management in Urban Regions" from 4–7 October 2016 in Essen, Germany.

Viktoria Berger (University of Duisburg-Essen), Fernando Mainardi Fan (Federal University of Rio Grande do Sul), Friederike Gabel (University of Münster), Paulo Henrique Galvão (Federal University of Ouro Preto), Maria Gies (University of Duisburg-Essen), Daniel Grabner (University of Duisburg-Essen), Simone Langhans (Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries), Anderson Abel de Souza Machado (Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries), Rodrigo Lilla Manzione (São Paulo State University), Elena Matta (Technical University Berlin), Ana Andreu Mendez (The United Nations University, Dresden), Marcio Augusto Ernesto de Moraes (National Center for Monitoring and Warning of Natural Disasters), Ana Carolina Daniel Morihama (University of São Paulo), Priscilla Macedo-Moura (Federal University of Minas Gerais), Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Federal University of Pernambuco), Natalia Periotto (Federal University of São Carlos), Gwendolin Porst (Technical University Berlin), Caroline Rigotto (Feevale University), Benedikt Roters (Ruhr West University of Applied Sciences), Stephan Schulz (Technical University Darmstadt), Talita Fernanda das Graças Silva (Federal University of Minas Gerais), Matheus Martins de Sousa (Federal University of Rio de Janeiro), Alexandra Suhogusoff (University of São Paulo), Ingo Daniel Wahnfried (Federal University of Amazonas), Christine Wolf (Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH – UFZ)

Daniel Hering. Foto: Vladimir Unkovic

Gewässer sind prägende Elemente der Landschaft. Bäche und Flüsse bilden ein dichtes Netzwerk, sie verbinden Landschaftselemente und Siedlungen. Seit jeher nutzt der Mensch die Gewässer auf vielfältige Art und Weise. Diese Nutzungen bleiben nicht ohne Auswirkungen auf den Naturhaushalt und auf die Nutzbarkeit der Gewässer.

Gewässer

Mehr als Wasser

Von Daniel Hering, Florian Leese & Peter Haase

Gewässer sind prägende Elemente der Landschaft. Bäche und Flüsse bilden ein dichtes Netzwerk, sie verbinden Landschaftselemente und Siedlungen. Seit jeher nutzt der Mensch die Gewässer auf vielfältige Art und Weise: zur Gewinnung von Trinkwasser, Nahrung und Energie, als Transportweg und Vorfluter für Abwasser und zusehends zur Naherholung und zum Wassersport. All diese Nutzungen bleiben nicht ohne Auswirkungen auf den Naturhaushalt und auf die Nutzbarkeit der Gewässer für andere Zwecke: Abwasser verändert Prozesse und Lebensgemeinschaften in Gewässern grundlegend, eingetragene Nährstoffe führen zu einem verstärkten Pflanzenwachstum, Dämme und Wehre verhindern Wanderungen von Organismen.

Die Erforschung der Auswirkungen von Gewässerbelastungen und die Entwicklung von Maßnahmen zu ihrer Vermeidung oder Minderung sind die Aufgaben der angewandten Limnologie, einer über hundert Jahre alten Forschungsdisziplin. Neben der Entwicklung von Verfahren und Methoden, zum Beispiel zur Reinigung von Abwasser oder zur Renaturierung von Flüssen, haben Ergebnisse angewandt-limnologischer Forschung erheblich zur Spezifizierung und Umsetzung von Rechtsnormen beigetragen. In Europa steht eine EU-Richtlinie im Fokus, die Wasserrahmenrichtlinie, die in das Wasserhaushaltsgesetz des Bundes und die Wassergesetze der Bundesländer übernommen wurde, und die Gewässerschutz und Gewässerbewirtschaftung in Europa zu einem gewissen Maße harmonisiert.

Gewässer in Deutschland waren noch bis in die 1980er Jahre (in Ostdeutschland bis in die 1990er Jahre)

streckenweise massiv durch ungereinigtes oder unzureichend gereinigtes Abwasser verschmutzt. Schon zu dieser Zeit wurde die Wasserqualität anhand von Bioindikationssystemen erfasst: das Vorkommen, die Häufigkeit oder das Fehlen bestimmter Arten gibt Aufschluss über den Sauerstoffhaushalt des Gewässers, der seinerseits von dem Gehalt an gelöster organischer Substanz abhängig ist. Diese Substanzen werden unter Sauerstoffverbrauch von Bakterien und Pilzen abgebaut, wodurch der Sauerstoffgehalt vor allem nachts und zu Zeiten hoher Abwasserbelastung stark sinken kann. Durch Bioindikation können diese Verhältnisse zuverlässiger abgebildet werden als durch direkte Messungen der organischen Substanz oder des Sauerstoffgehaltes, da Organismen nur dann vorkommen, wenn ihre Ansprüche an die Wasserqualität über einen längeren Zeitraum erfüllt werden; sie integrieren daher zeitlich und räumlich. In Deutschland sind die Zeiten der massiven Gewässerbelastung lange vorbei und die meisten Bäche und Flüsse haben heute wieder eine vergleichsweise gute Wasserqualität.

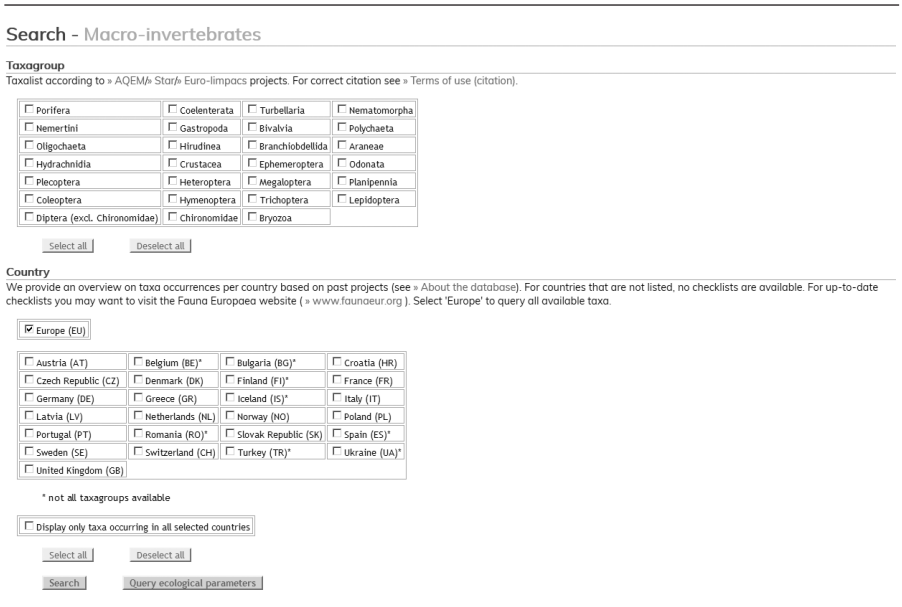
Gewässerbewertung

Der gesellschaftliche Anspruch an Gewässer und ihre Qualität ist seither gestiegen. Dies wird auch durch die genannten Rechtsvorschriften, vor allem die Wasserrahmenrichtlinie, widergespiegelt, die Gewässerqualität viel breiter definiert als reine Wasserqualität. Als Ziel wird ein „guter ökologischer Zustand“ und ein „guter chemischer Zustand“ ausgegeben, definiert als geringfügige Abweichung von der naturnahen Referenz. Der ökologische Zustand wird wiederum über Bioindikationssysteme gemessen, aufgrund der wesentlich komplexeren Interaktionen mit Belastungen nun allerdings mit Vertretern verschiedener Organismengruppen:

- das Phytoplankton, im Wasser schwebende Organismen, die vor allem den Nährstoffhaushalt eines Gewässers abbilden
- die aquatische Flora, vor allem höhere Wasserpflanzen und auf Steinen wachsende Mikroalgen, die Gewässerversauerung und Einträge von Nährstoffen, Salz und Pflanzenschutzmitteln widerspiegeln
- das Makrozoobenthos (Kleintiere, die auf der Gewässersohle leben), das Wasserqualität, Wassertemperatur und die Qualität der Kleinlebensräumen auf der Gewässersohle abbildet
- und die Fischfauna, die darüber hinaus von Wanderungshindernissen wie Dämmen oder Wehren beeinträchtigt werden.

Die heute in der Wasserwirtschaft verbreitet angewandte Systeme zur Bewertung der Gewässerqualität, die maßgeblich von Wissenschaftler*innen der Universität Duisburg-Essen mitentwickelt wurden, nutzen Kenntnisse zu den Eigenschaften von Organismen, um die Wirkung verschiedenster Belastungsfaktoren auf die Lebensgemeinschaften der Gewässer zu beurteilen. Dazu wurden in den letzten Jahren Datenbanken zu den Eigenschaften von Arten des Phytoplanktons, der Mikroalgen und Wasserpflanzen, des Makrozoobenthos und der Fische aufgebaut. Die am verbreitetsten angewandte Grundlage ist die online Datenbank www.freshwaterecology.info; hier sind, zum Beispiel für das Makrozoobenthos, Informationen zu einer Vielzahl von biologischen und ökologischen Eigenschaften zusammengestellt und einheitlich codiert: Sensitivität für Belastungen mit organischer Substanz, Säure und Pflanzenschutzmitteln, Temperaturpräferenz, bevorzugte Nahrung, bevorzugte Lebensräume auf verschiedenen Maßstäben, Lebenszyklen und Verbreitungsangaben (Abb. 1) [1].

Die Prozedur zur Bewertung eines Gewässerabschnittes ist aus mehreren Schritten aufgebaut und wird hier am Beispiel des Makrozoobenthos erläutert (Abb. 2). Die Gewässerbewertung basiert auf einer standardisierten Probennahme; die gesammelten Tiere werden bestimmt und mit der resultierenden Taxaliste wird eine Reihe von Indices berechnet, deren Wert mit Erwartungswerten unter naturnahen Bedingungen verglichen werden; aus diesem Vergleich ergibt sich letztlich die Bewertung. Je nach Gewässertyp werden unterschiedliche Indices und Grenzwerte herangezogen. Darüber



(1) www.freshwaterecology.info, eine Datenbank zu den Eigenschaften von mehr als 20.000 Gewässer-bewohnenden Organismen in Europa.
Quelle: www.freshwaterecology.info

hinaus kann mit einer entsprechenden Software eine Vielzahl weiterer Indices berechnet werden, zum Beispiel zu den bevorzugten Aufenthaltsorten oder Nahrungsquellen der vorgefundenen Arten, die bei der Interpretation der Ergebnisse helfen.

Entsprechende Bewertungssysteme werden in ganz Europa angewandt, wenn auch mit einigen nationalen Anpassungen. Diese haben vor allem die Ursache, dass viele Länder bereits existierende Datenreihen weiter nutzen wollen und daher bereits vorhandene Methoden auf die Erfordernisse der neuen Rechtsvorschriften angepasst haben. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde durch eine aufwändige Interkalibrierung sichergestellt.

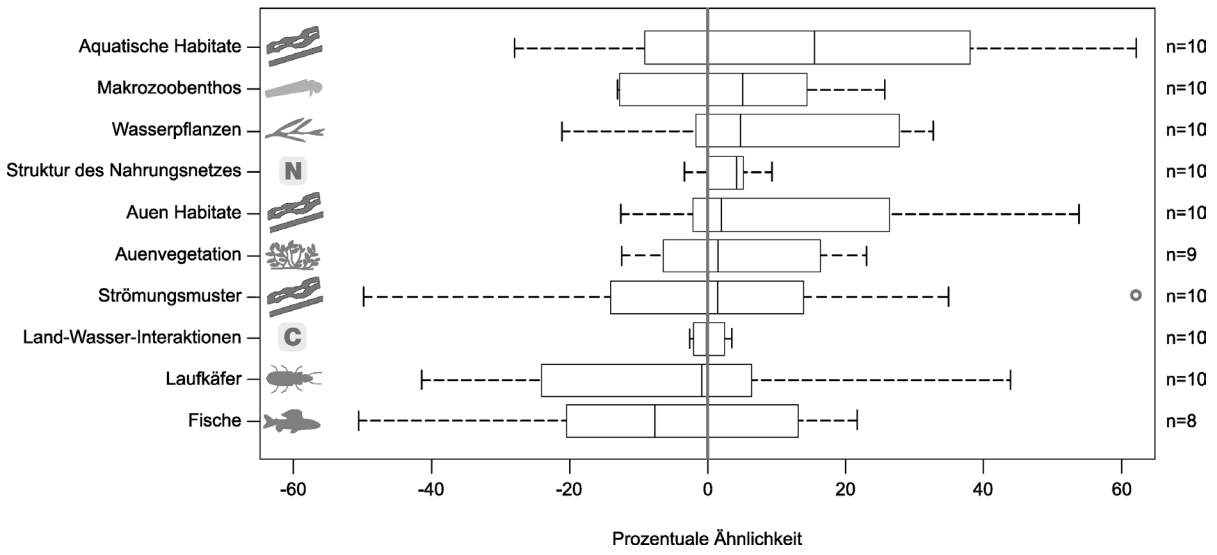
In den nächsten Jahren sind umfangreiche Veränderungen, vor allem im Bereich der zu Grunde liegenden Erfassungsmethoden, geplant. Es besteht weitgehend Konsens, dass an der eigentlichen Bewertung in zukünftigen Monitoringzyklen möglichst wenig geändert werden soll, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Gleichzeitig besteht aber der Bedarf, die Kosten des Monitorings und die Zeitspanne zwischen Probennahme und Ergebnis-Verfügbarkeit zu reduzieren. Zudem ist es wünschenswert, auch die Vielzahl an Organismen zu erfassen, die in Standardverfahren unberücksichtigt bleiben, um zum Beispiel unerwartete Einwanderer oder Rückgänge bei wenig beachteten Arten festzustellen. DNA-basierte Methoden können dies leisten und werden in den nächsten Jahren zur Anwendungsreife gelangen. Ähnlich wie beim genetischen Fingerabdruck in der Forensik können Arten eindeutig über ihre DNA erkannt werden. Die entsprechende Technik heißt DNA-Barcoding, bei dem die DNA aus Zellen isoliert, ein Teil des mitochondrialen COI-Gens (Cytochrom-c-Oxidase 1) über eine Polymerase-Kettenreaktion (PCR) vervielfältigt und anschließend „abgelesen“ (sequenziert) wird. Die erhaltene Buchstaben-Sequenz wird gegen eine Datenbank verglichen, in welcher idealerweise Sequenzen aller bekannten Arten vorkommen. Durch den Abgleich wird ermittelt, um welche Art es sich handelt. Ein Vorteil der Technik ist, dass nur zelluläre Fragmente eines Organismus benötigt werden. So kann unabhängig vom Lebensstadium (Larve, Puppe, Imago) eine eindeutige Identifikation erfolgen. Viele Studien belegen die Präzision des DNA-Barcoding für Gewässeranalysen und zeigen, dass auch bislang übersehende Arten identifiziert werden können. Durch große internationale und nationale Kampagnen wie das „German Barcode of Life Projekt“ (www.bolgermany.de) werden aktuell verlässliche Datenbanken aufgebaut. Sogenannte Hochdurchsatz-Sequenzierer ermöglichen es zudem, ganze Lebensgemeinschaften auf einmal innerhalb weniger Tage zu untersuchen. Dieses Verfahren wird als DNA-Metabarcoding bezeichnet. Sofern die Barcodes aller vom Bewertungssystem verwendeten Arten/Taxa bekannt sind, lässt sich die traditionelle Bestimmung einer zum Beispiel Makrozoobenthos-Probe somit 1:1 durch DNA-Metabarcoding ersetzen. Zudem liefert das Barcoding eine Reihe von Zusatzinformationen, die in der Gewässerbewertung derzeit zwar keine Verwendung finden, aber zur Abschätzung der Biodiversität und ihrer Veränderung sowie für die Interpretation der Ergebnisse von großer Bedeutung sind. [2]

Ergebnisse der Gewässerbewertung in Europa

Die Ergebnisse der Gewässerbewertung integrieren die Effekte aller Belastungen auf die Lebensgemeinschaften der Gewässer. Für die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen ist es anschließend notwendig, die wesentlichen Belastungen zu identifizieren; dies geschieht in der Regel durch eine Kombination der biologischen Bewertungsergebnisse (insbesondere diagnostischer Indices,

(2) Der Prozess zur biologischen Bewertung von Gewässern, am Beispiel des Makrozoobenthos (Kleintiere, die auf der Gewässersohle leben).
Quelle: www.dnaqua.net

die auf einzelne Belastungen reagieren) und von direkten Messungen oder Modellierungen der Belastungsintensität. Aus der Kombination dieser Daten können die wesentlichen Probleme, die auf ein Gewässer einwirken, identifiziert und Maßnah-



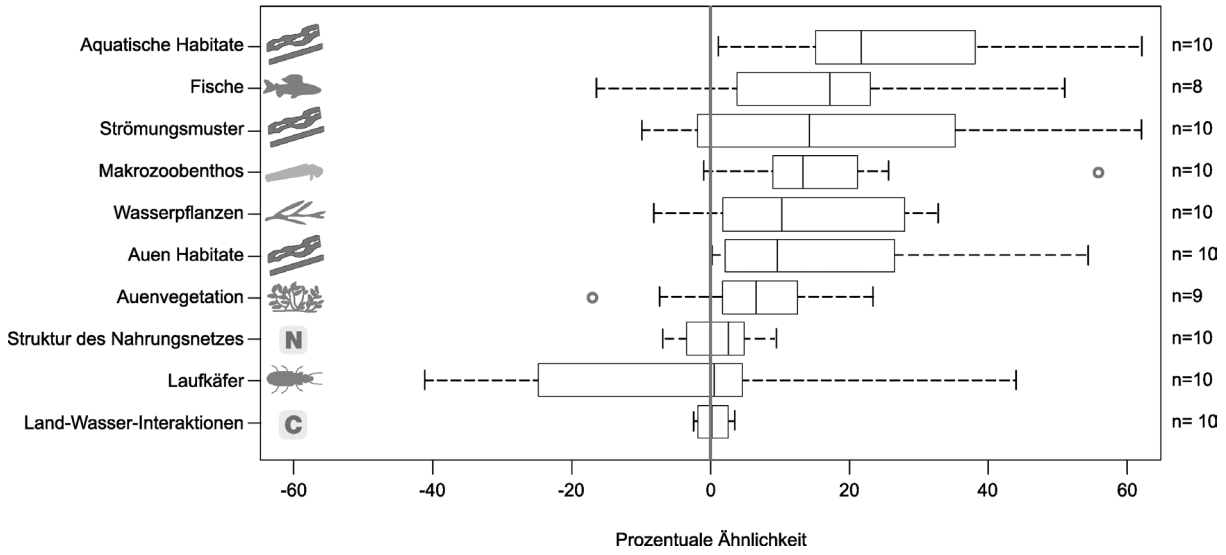
(3) Skaleneffekte bei der Renaturierung von Flüssen. Untersucht wurden jeweils ein langer und ein kurzer renaturierter Abschnitt in zehn Flusseinzugsgebieten in Europa, jeweils im Vergleich zu nahegelegenen nicht renaturierten Abschnitten. Für verschiedene Organismengruppen (z.B. Fische) und Parameter ist dargestellt, wie stark sich die Effekte zwischen „langen" und „kurzen" renaturierten Strecken unterscheiden. Negative Werte bedeuten jeweils, dass die Effekte in den kurzen Strecken größer sind, wohingegen bei positiven Werten die Effekte in den längeren Strecken größer sind.
Quelle: nach Hering et al. 2015, verändert

men zur Minderung der Probleme abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Gewässerbewertung zeigen, dass etwa die Hälfte der Gewässer in Europa die anspruchsvollen Ziele der Wasserrahmenrichtlinie bereits erreicht, wobei es starke regionale Unterschiede gibt. In Deutschland ist ein Großteil der Gewässer von dem „guten Zustand" weit entfernt. Auch die Analyse der wesentlichen Belastungsfaktoren gibt ein regional sehr unterschiedliches Bild: In Skandinavien sind die Hauptbelastungsfaktoren die Ausleitung von Wasser für Wasserkraftwerke sowie die Versauerung, die durch Luftverschmutzung in den 1970er und 1980er Jahren hervorgerufen wurde und deren Effekte nun langsam abklingen. Auch in Südeuropa ist die in Gewässern verbliebende Wassermenge das Hauptproblem, da viel Wasser vor allem zu Bewässerungszwecken entnommen wird, wodurch sich stoffliche Belastungen im Gewässer viel stärker auswirken. In Mitteleuropa hingegen wirken sehr zahlreiche Belastungen mittlerer Intensität auf die meisten Gewässer ein: diffuse Belastungen mit Nährstoffen (vor allem aus der Landwirtschaft), Pflanzenschutzmitteln, Feinsedimenten (die ebenfalls vorwiegend von landwirtschaftlichen Nutzflächen abgetragen werden) und Veränderungen der „Hydromorphologie", also der Strömungs- und Habitatbedingungen im Gewässer, zum Beispiel durch Begradigung und Entfernung von Ufergehölzen. In allen Regionen zeigt sich jedoch, dass die verschiedenen Belastungen zusammenwirken und sich in der Summe stärker auswirken können, als wenn ihre Wirkungen lediglich addiert würden. So führt die Beseitigung von Ufergehölzen entlang von Fließgewässer zu einer starken Zunahme der Wassertemperaturen und des Lichteinfalls, wodurch die Auswirkungen von Nährstoffeinträgen vervielfacht werden: In besonnten Gewässern werden Nährstoffe viel schneller in Biomasse umgesetzt, wodurch sich insbesondere nachts Sauerstoffdefizite ergeben. Einer Analyse der Daten, die für den zweiten Bewirtschaftungsplan der Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2015 erhoben wurden, zeigt die Defizite deutlich auf: Ein Großteil der mitteleuropäischen Gewässer erreicht die ambitionierten Umweltziele aufgrund des Einflusses intensiver Landwirtschaft nicht.

Renaturierung von Fließgewässern

Als Konsequenz der nicht erreichten Umweltziele werden bereits seit einigen Jahren umfangreiche Maßnahmen zur Verbesserung des Gewässerzustandes angeschoben, die häufig als „Renaturierung" oder „Revitalisierung" bezeichnet werden. Ein Schwerpunkt der Maßnahmen in Deutschland und seinen Nachbarländern liegt auf der Verbesserung der Hydromorphologie, zum Beispiel durch Aufweitung von Gewässern, direkte Schaffung von Habitaten auf der Gewässersohle und Beseitigung von Wanderungshindernissen. Über die Wirkung der Maßnahmen ist erstaunlich wenig bekannt: Ein großer Teil der Maßnahmen wird keiner direkten Erfolgskontrolle unterzogen, sondern es wird nur die aggregierte Wirkung vieler Maßnahmen in einem Flusseinzugsgebiet über das allgemeine Gewässermoni-



(4) Effekte der Habitatdiversifizierung bei der Renaturierung von Flüssen (gleiche Datengrundlage wie Abb. 3). Verglichen werden die Effekte von Maßnahmen mit geringer und stärkerer Wirkung auf die Habitatvielfalt der Gewässersohle. Negative Werte bedeuten jeweils, dass die Effekte bei den Maßnahmen mit geringerer Habitatdiversifizierung größer sind, bei positiven Werten sind die Effekte bei den Maßnahmen mit größerer Habitatdiversifizierung stärker.
Quelle: nach Hering et al. 2015, verändert

toring im Zusammenhang mit der Wasserrahmenrichtlinie untersucht. Um Maßnahmen zu optimieren, damit sie mit möglichst geringen Kosten den ökologischen Zustand und Leistungen der Gewässer maximal verbessern, muss die Wirkung einzelner Maßnahmen jedoch direkt untersucht werden.

Wir haben in den letzten Jahren den wohl größten Datenbestand zu den Effekten hydromorphologischer Renaturierungsmaßnahmen aufgebaut und über vierzig naturnah umgestaltete Gewässerabschnitte in ganz Deutschland untersucht, jeweils im Vergleich mit einem nahe gelegenen nicht renaturierten Abschnitt. Viele dieser Maßnahmen wurden zudem nach fünf Jahren einer zweiten Untersuchung unterzogen, um zu überprüfen, ob die gewünschten Effekte gegebenenfalls mit zeitlicher Verzögerung auftreten. Die untersuchten Maßnahmen umfassten meist mehrere Renaturierungsmethoden: Aufweitung oder Remäandrierung des Gewässerbettes, direkte Schaffung von Habitaten (z.B. durch Zugabe von Totholz oder Kies) sowie die Schaffung stehender Gewässer in der Aue. Meist wurden wenige hundert Meter Flusslauf umgestaltet.

Die Effekte dieser Maßnahmen auf verschiedene Kompartimente des Gewässers, seiner Aue und seiner Lebensgemeinschaften sind sehr unterschiedlich. Zunächst überrascht, dass die Organismengruppen, die besonders positiv auf hydromorphologische Renaturierungsmaßnahmen reagieren, nicht im Wasser leben: Landlebende, uferbewohnende Laufkäfer und höhere terrestrische Pflanzen der Flussaue sind nach einer Renaturierung oft doppelt so artenreich. Dies hängt vor allem mit der Schaffung zahlreicher neuer Lebensraumtypen wie Kies- oder Sandbänken zusammen, die „über Wasser“ sehr schnell besiedelt werden, zum Beispiel durch flugfähige Insekten. Wasserlebende Organismen, die eigentlichen „Zielgrößen“ der Renaturierung, reagieren hingegen wesentlich langsamer, in vielen Fällen bleibt einer Reaktion vollständig aus.

In den letzten Jahren haben wir umfassend untersucht, unter welchen Bedingungen Renaturierungen überdurchschnittlich „erfolgreich“ oder „erfolglos“ sind. So wurde vielfach vermutet, dass die Länge der renaturierten Flussabschnitte schlicht nicht ausreicht, um Populationen anspruchsvoller Arten ausreichend Lebensraum zu geben; kurze renaturierte Gewässerstrecken werden zudem durch Belastungen im Einzugsgebiet überproportional beeinflusst. Um die Rolle der Länge des renaturierten Flussabschnittes auf den Renaturierungserfolg zu untersuchen, haben wir europaweit in zehn Flusseinzugsgebieten jeweils einen langen und einen kurzen renaturierten Abschnitt untersucht, immer im Vergleich mit nahegelegenen nicht renaturierten Abschnitten. Auch in dieser Untersuchung wurden eine Vielzahl von Organismengruppen des Gewässers und der Aue sowie funktionale Parameter berücksichtigt. Falls die Lebensgemeinschaften des langen renaturierten Abschnittes sich von den Lebensgemeinschaften des nahegelegenen Vergleichsabschnittes stärker unterschieden als dies für den kurzen renaturierten Abschnitt der Fall war, wurde dies als Hinweis gedeutet,

dass sich die Länge des renaturierten Abschnittes positiv auf den Renaturierungserfolg ausgewirkt hat. Tatsächlich gibt es solche Effekte, allerdings nur in geringem Maße (Abb. 3). Ein ganz anderes Bild ergibt sich jedoch, wenn der Datensatz anders gegliedert wird: Werden jeweils die Probestellen, bei denen die Renaturierungen zu größeren Habitatveränderungen auf der Gewässersohle führten, zusammengefasst und den Probestellen mit geringeren Habitatveränderungen in dem jeweiligen Einzugsgebiet gegenübergestellt, so zeigt sich ein viel deutlicherer Unterschied. Dies ist ein Hinwies, dass die Diversifizierung der Gewässersohle sich direkt und positiv auf die Biodiversität auswirkt (Abb. 4). [3]

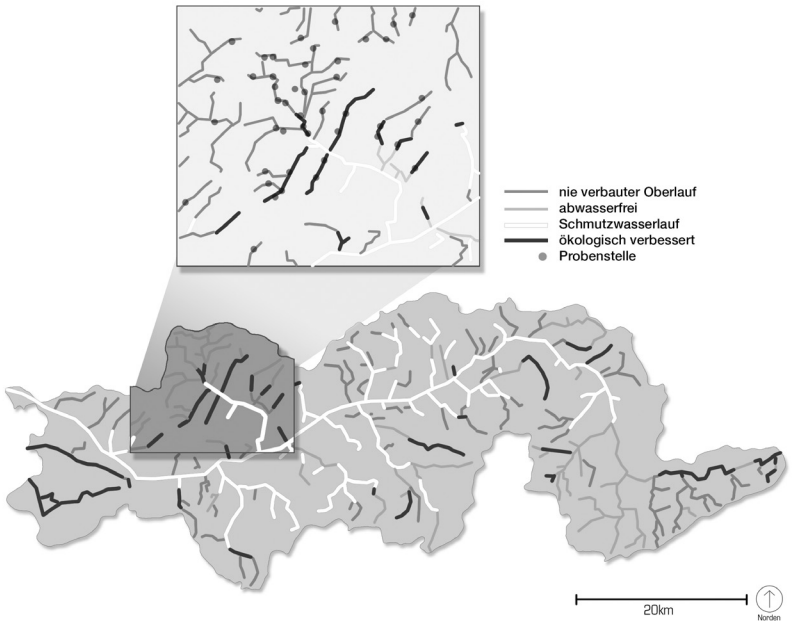
Darüber hinaus ist das Wiederbesiedlungspotenzial für den biologischen Erfolg einer Renaturierung eine entscheidende Größe. Viele renaturierte Flussabschnitte liegen in einer weitgehend ausgeräumten Landschaft und zudem war ihre Wasserqualität über viele Jahrzehnte hinweg schlecht; Populationen anspruchsvoller Arten sind oft in ganzen Flusseinzugsgebieten ausgestorben, so dass auch umfangreiche und gut durchgeführte Renaturierungsmaßnahmen lediglich Habitate für anspruchsvolle Arten bereitstellen, jedoch nicht von diesen Arten besiedelt werden. Anhand von 24 Renaturierungsprojekten in Deutschland wurde die Rolle von Wiederbesiedlungsquellen (von anspruchsvollen Makrozoobenthos-Arten besiedelten Flussabschnitten in der näheren Umgebung) untersucht. Dazu wurden mehr als 1.200 Datensätze zu den Lebensgemeinschaften nahe gelegener Flussabschnitte zusammengestellt, die sich in 0 bis 5, 5 bis 10 und 10 bis 15 Kilometern Entfernung zu den renaturierten Flussabschnitten befinden. Die Analyse zeigte, dass die Ansiedlung anspruchsvoller Lebensgemeinschaften in renaturierten Flussabschnitten maßgeblich von Besiedlungsquellen in maximal fünf Kilometer Entfernung abhängt, während es Arten aus weiter entfernt liegenden Besiedlungsquellen in der Regel nicht schaffen, neuentstandene naturnahe Flussabschnitte zu besiedeln. [4] Ähnliche Abhängigkeiten des Renaturierungserfolgs von Quellpopulationen konnten auch für die Fische gezeigt werden.

Das Fallbeispiel Emschersystem

Urbane Fließgewässer unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von Bächen und Flüssen der freien Landschaft: ihre laterale Entwicklung ist aufgrund von Verkehrswegen, Leitungen und Bebauung eingeschränkt, Kleinlebensräume und Wasserqualität sind durch vielfältige Belastungen beeinträchtigt und häufig sind lange Strecken verrohrt, so dass die verbleibenden Abschnitte isoliert sind. Dies alles hat Rückwirkungen auf die Lebensgemeinschaften, die durch einen hohen Anteil an toleranten und eine geringen Anteil störungssensibler Arten gekennzeichnet sind.

In der Gewässerbewertung und -bewirtschaftung werden Stadtbäche daher oft als „erheblich veränderte Gewässer“ im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie ausgewiesen. Bei erheblich veränderten Gewässern stehen gewässerspezifische Nutzungen im Vordergrund, so dass der „gute ökologische Zustand“, das ambitionierte Ziel der Wasserrahmenrichtlinie, im Regelfall nicht erreichbar ist.

Selbst im Vergleich zu anderen urbanen Räumen sind die Gewässer des nördlichen Ruhrgebietes, der sogenannten Emscherzone, besonders stark beeinträchtigt: in Betonhalbschalen verlegt, dienten sie seit 100 Jahren vorwiegend dem oberirdischen Transport von Abwasser. Aufgrund der Bergbau-bedingten Senkungen der Oberfläche war es lange Zeit nicht möglich, unterirdische Abwassersammler zu verlegen; die Emscher und ihre Nebengewässer wurden daher zu oberirdischen Abwassersammlern ausgebaut. Die Böden des Ruhrgebietes sind zudem ein Flickenteppich aus Altlasten, die



(5) Das Emschersystem im Jahr 2016. Während der Unterlauf der Emscher noch abwasserführend ist, sind viele Nebenbäche abwasserfrei oder sogar bereits renaturiert. Viele Oberläufe und Quellbäche wurden niemals zum Transport von Abwasser genutzt; aus diesen Strecken werden die renaturierten Abschnitte nun wiederbesiedelt.
Quelle: eigene Darstellung

Gewässer mit Schadstoffen aller Art belasten können. Straßenabwässer und Regenüberläufe tragen zu einer komplexen Belastungssituation bei. Seitdem die Bergsenkungen abgeklungen sind, hat die Emschergenossenschaft damit begonnen, die Emscher und ihre Nebengewässer naturnah umzubauen: Es werden Kanäle zum unterirdischen Transport des Abwassers gebaut, anschließend werden die Betonhalbschalen, in denen die Gewässer verlaufen, entfernt und das Gewässer naturnah umgestaltet. Mit einem Investitionsvolumen von über fünf Milliarden Euro handelt es sich wohl um das weltweit größte Projekt zur naturnahen Umgestaltung eines Gewässersystems. Sobald ein Bach abwasserfrei und naturnah umgestaltet ist, besiedeln ihn Tiere und Pflanzen – allerdings mit Hindernissen: Sie müssen aus benachbarten Regionen einwandern, da in den als Abwassergerinne genutzten Gewässern des Emscher-Einzugsgebietes jahrzehntelang fast keine höheren Lebewesen vorkamen; auch können stoffliche Belastungen und Barrieren die Besiedlung hemmen.

Aus wissenschaftlicher Sicht haben die Gewässer des Emschersystems jedoch einen großen Vorteil. Studien zur Wiederbesiedlung renaturierter Fließgewässer kranken in der Regel daran, dass nie vollständig sicher ist, ob eine nach der Renaturierung vorkommende Tier- oder Pflanzenart nicht auch schon vor der Renaturierung anwesend war und schlicht übersehen wurde. Im Fall der Emscher ist dies auszuschließen. Alle Organismen, die in den renaturierten Emscher-Nebengewässern vorkommen, sind mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erst nach der Umgestaltung eingewandert. Bei Kenntnis möglicher Wiederbesiedlungsquellen lassen sich daher Distanzen, zeitlicher Verlauf und Dynamik der Wiederbesiedlung vergleichsweise einfach erforschen. Diese Erkenntnisse sind auch für Gewässer außerhalb des Emscheraumes von großem Interesse.

Derzeit ist das Emschersystem ein Mosaik aus Abschnitten unterschiedlicher Historie und Qualität (Abb. 5): Während ein Großteil des Emscher-Hauptlaufes nach wie vor ein offener Abwassersammler ist, sind viele Nebenbäche abwasserfrei oder sogar bereits naturnah umgestaltet. Die Oberläufe der meisten Nebenbäche hingegen wurden nie zum Transport von Abwasser genutzt – hier haben sich naturnahe Lebensgemeinschaften erhalten, von denen aus die umgestalteten Gewässerabschnitte nun besiedelt werden. Seit nunmehr sieben Jahren untersuchen wir das Teileinzugsgebiet der Boye, eines der größten Emscher-Nebengewässer. Bislang sind sieben Abschnitte der Boye und ihrer Nebengewässer naturnah umgestaltet und die sich dort etablierenden Lebensgemeinschaften wurden jährlich untersucht. Zudem untersuchten wir über 30 mögliche Wiederbesiedlungsquellen im Einzugsgebiet der Boye und in benachbarten Einzugsgebieten, um die Ausbreitungswege der besiedelnden Arten nachzuvollziehen.

Bereits in den ersten Jahren nach der naturnahen Umgestaltung stellt sich eine Pionierlebensgemeinschaft ein, die vorwiegend aus sich schnell ausbreitenden Arten und Habitat-Generalisten besteht. Anschließend durchläuft die Lebensgemeinschaft einen Reifungsprozess, der einerseits durch die Entwicklung von Habitaten geprägt wird, andererseits durch die Verdrängung der Pionierarten durch Spezialisten für die sich entwickelnden Habitate, die langsamer einwandern. Auch hier lässt sich beobachten, dass fast alle Arten aus einer Distanz von maximal fünf Kilometern einwandern. Bereits in der Pionierphase sind in erstaunlich hohem Maße flugunfähige Arten vertreten, die vermutlich im Eistadium über Wasservögel oder über das Grundwasser eingetragen werden. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Wiederbesiedlung liegt in der Anbindung der naturnah umgestalteten Strecke an einen naturnahen Oberlauf, aus dem anspruchsvolle Arten mit dem fließenden Wasser eindriften. Dies verkürzt die Wiederbesiedlungszeit auf etwa die Hälfte. Durch Auswertungen von bereits vor längerer Zeit umgestalteten Strecken zeigt sich, dass sich nach etwa zehn Jahren eine stabile Lebensgemeinschaft etabliert hat. [5]

Auch in urbanen Gebieten mit einer massiven Belastungsgeschichte ist es somit möglich, naturnahe Zustände wiederherzustellen und eine Biodiversität zu etablieren, die den Gewässern in der freien Landschaft kaum nachsteht.

Ausblick

Die Arbeitsgruppen der Fakultät für Biologie im Zentrum für Wasser- und Umweltforschung haben den Anspruch, auch weiterhin die Methoden zur Gewässerbewertung in Deutschland und Europa federführend weiter zu entwickeln, Maßnahmen zur Renaturierung von Gewässern einer umfassenden Erfolgskontrolle zu unterziehen und Methoden zu entwickeln, die bei der Renaturierung von Gewässern großräumig zur Anwendung kommen.

Ein Schwerpunkt der nächsten Jahre wird auf der Entwicklung und Etablierung der nächsten Generation von Untersuchungs- und Bewertungsverfahren liegen. Die Untersuchung von Gewässern und ihren Lebensgemeinschaften ist immer noch in starkem Maße „Handarbeit“. DNA-basierte Methoden, bei denen ganze Lebensgemeinschaften unter Umgehung der zeitaufwändigen mikroskopischen Bestimmung automatisch identifiziert werden können, werden von der AG Aquatische Ökosystemforschung maßgeblich entwickelt. Neben dem reinen Ersatz zeit- und kostenintensiver Arbeitsschritte wird in Zukunft auch die automatisierte Erfassung und Bewertung von Ökosystemfunktionen an Bedeutung gewinnen, zum Beispiel der Selbstreinigungsfähigkeit von Gewässern.

Die Wirkung multipler Belastungen auf Lebensgemeinschaften und Funktionen von Gewässern ist erst in Ansätzen verstanden. In den vergangenen Jahren haben wir eine Vielzahl von Versuchen in Mesokosmen und Fließrinnen durchgeführt und dabei zwei oder mehr Belastungen auf Lebensgemeinschaften einwirken lassen. Die direkte Wirkung dieser Stressoren-Kombinationen auf Lebensgemeinschaften, aber auch auf die Fitness der Individuen und die von ihnen im Naturhaushalt ausgeführten Funktionen lassen sich nun besser verstehen. Diese Untersuchungsansätze werden wir ausweiten und mit großräumigen Datenauswertungen zur Wirkung von Belastungen im Freiland kombinieren.

In enger Zusammenarbeit mit der Wasserwirtschaft in der Region, in Deutschland und in Europa werden wir unsere Datenbestände zur Entwicklung renaturierter Fließgewässer weiter ausbauen. Neue Modellierungsansätze werden helfen, die Entwicklung renaturierter Fließgewässer besser zu verstehen und vor allem vorhersagbar zu machen. Dies betrifft die Entwicklung der Lebensgemeinschaften, zusehends aber auch die Funktion der Ökosysteme. Regional steht das Emschersystem im Fokus: ein einzigartiges Freilandlaboratorium zur Entwicklung von Lebensgemeinschaften von der Nulllinie aus.

Unsere Daten und Ergebnisse werden weiterhin dazu beitragen, Gewässermonitoring, Gewässerentwicklung und Gewässerschutz zu verbessern und großräumig anwendbar zu machen.

Summary

Applied limnology deals primarily with the effects of stressors on freshwater ecosystems and with measures for mitigating stressors and restoring degraded water bodies. It contributes to the development of methods for the assessment and restoration of freshwater ecosystems, but also to the refinement and implementation of policies, in Europe in particular to the implementation of the Water Framework Directive (WFD). According to this directive, the target of water management is not only good water quality, but "good ecological quality", measured as the distance of freshwater biota to undisturbed references. Working groups of the University of Duisburg-Essen have greatly contributed to develop assessment methods measuring ecological quality, which are based on profound knowledge of how individual freshwater species respond to a variety of stressors, including various sources of pollution, habitat degradation and flow alteration. The data are summarized in the online database www.freshwaterecology.info. Currently, the methods are undergoing a major shift from morphology-based species identification to automated DNA-based identification, which is driven by the EU-funded COST action DNAqua.Net, coordinated by the University of Duisburg-Essen. According to the assessment systems' results, about half of the European water bodies are currently not reaching "good status", but the causes of degradation differ regionally: while in Northern Europe the effects of water power generation and remnants of acidification are predominant factors, Southern European water bodies are particularly affected by water scarcity caused by irrigation. In Central Europe, many different stressors at medium intensity affect water bodies simultaneously, including input of nutrients, pesticides and fine sediment and, in particular, hydromorphological degradation. To restore degraded water bodies, a large number of restoration projects have been initialised over the last couple of years, the effects of which were intensively studied by scientists of the University of Duisburg-Essen. The effects of restoration measures on freshwater biota vary, with floodplain organism groups (e.g. riparian ground beetles) responding most rapidly, while the response of most aquatic organism groups is delayed. Using a paired study design, it could be revealed that the length of the restored section does not greatly impact the restoration success, but the amount of habitat changes on the river bottom is of great importance. Recolonization of restored river reaches with sensitive organisms is mainly based on colonization sources in the immediate surroundings (up to five-kilometer distance). A detailed study on recolonization was performed in the Emscher catchment, which offers great opportunities for studying the succession of newly established freshwater assemblages.

Anmerkungen

1) Schmidt-Kloiber & Hering 2015
2) Leese et al. 2017
3) Hering et al. 2015
4) Sundermann et al. 2011
5) Winking et al., 2014

Literatur

– Hering, D., J. Aroviita, A. Baattrup-Pedersen, K. Brabec, T. Buijse, F. Ecke, N. Friberg, M. Gielczewski, K. Januschke, J. Köhler, B. Kupilas, A.W. Lorenz, S. Muhar, A. Paillex, M. Poppe, T. Schmidt, S. Schmutz, J. Vermaat, P.F.M. Verdonschot, R.C.M. Verdonschot, C. Wolter & J. Kail (2015): Contrasting the roles of section length and instream habitat enhancement for river restoration success: A field study on 20 European restoration projects. Journal of Applied Ecology 52: 1518–1527.
– Leese, F., D. Hering & W. Wägele (2017): Potenzial genetischer Methoden für das Biomonitoring der Wasserrahmenrichtlinie. Wasserwirtschaft 2017 (7/8): 49–53.
– Schmidt-Kloiber, A. & D. Hering (2015): www.freshwaterecology.info – An online tool that unifies, standardises and codifies more than 20,000 European freshwater organisms and their ecological preferences. Ecological Indicators 53: 271–282.
– Sundermann, A., S. Stoll & P. Haase (2012): River restoration success depends on the species pool of the immediate surroundings. Ecological Applications 21: 1962–1971.
– Winking, C., A.W. Lorenz, B. Sures & D. Hering (2014): Recolonisation patterns of benthic invertebrates: a field investigation of restored former sewage channels. Freshwater Biology 59: 1932–1944.

Weitere Informationen und relevante Forschungsprojekte
www.wiser.eu
www.mars-project.eu
www.dnaqua.net
www.freshwaterplatform.eu

Die Autoren

Daniel Hering, Jahrgang 1965, studierte Biologie in Marburg und promovierte 1995 bei Harald Plachter über Land-Wasser-Interaktionen in alpinen Flussauen. Nach einer Postdoc-Phase beim U.S. Forest Service in Oregon arbeitete er ab 1997 als Wissenschaftlicher Assistent in der Arbeitsgruppe von Helmut Schuhmacher an der Universität-Gesamthochschule Essen und beschäftigte sich vorwiegend mit der Renaturierung von Fließgewässern. Seit dem Jahr 2000 arbeitet er vorwiegend an der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Bewertungssystemen für Gewässer in Europa. Er koordinierte drei von der EU geförderte Forschungsvorhaben zu Fragen der Gewässerbewertung und des Gewässermanagements: AQEM (2000 bis 2002), WISER (2009 bis 2013) und MARS (2014 bis 2018). Seit 2010 ist er Professor für Angewandte Hydrobiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Florian Leese, Jahrgang 1978, studierte Biologie in Marburg und Bochum. Nach seiner Diplomarbeit am Max-Planck-Institut für Limnologie, Fluss-Station Schlitz und der Promotion am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (Bremerhaven) und der Ruhr-Universität Bochum arbeitete er seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter, und später Nachwuchsgruppenleiter, an der Ruhr-Universität Bochum am Lehrstuhl von Ralph Tollrian. Seit 2013 konzentriert sich seine Forschung auf die Entwicklung neuer genetischer Methoden zur Erfassung von Biodiversität. Seit 2015 ist er Professor für Aquatische Ökosystemforschung an der Universität Duisburg-Essen.

Peter Haase, Jahrgang 1966, studierte Biologie in Göttingen und Ökologische Umweltsicherung in Kassel. Seine Promotion schloss er 1999 mit einem Beitrag zur Fließgewässertypologie ab. Nach sehr kurzer Hochschulassistenten-Tätigkeit an der Uni Kassel übernahm er 2000 die Leitung der damaligen Senckenberg Außenstelle im Spessart (jetzt Gelnhausen). Der Schwerpunkt seiner Arbeiten liegt in den Bereichen Fließgewässer-Ökologie (Biodiversität, Renaturierungen, global change), ökologische Langzeitforschung (LTER) und Naturschutzforschung. Von 2012 bis 2015 war er außerplanmäßiger Professor an der Uni Frankfurt und seit 2016 ist der Professor für Fluss- und Auenökologie an der UDE im Rahmen einer gemeinsamen Berufung mit Senckenberg.

Florian Leese. Foto: Vladimir Unkovic

Mathias Ulbricht. Foto: Vladimir Unkovic

Membranverfahren sind ein anerkannt wesentliches Element in einer nachhaltigen Wasserwirtschaft. Seit der Inbetriebnahme der ersten größeren Anlagen zur Wasseraufbereitung mit druckgetriebenen Membranen in den 1960er Jahren entwickelt sich die Membrantechnologie stetig weiter, immer mit den Zielen, Kosten für Investition und Betrieb zu senken und weitere Anwendungsgebiete zu erschließen.

Erfolgreiche Trennungen

Innovationen zu Membranverfahren für die Wasseraufbereitung

Von Stefan Panglisch & Mathias Ulbricht

Membranverfahren sind ein anerkannt wesentliches Element in einer nachhaltigen Wasserwirtschaft mit wachsender nationaler und internationaler Bedeutung, aufgrund intrinsischer Vorteile im Vergleich zu konventionellen Verfahren und wegen ihrer Vielseitigkeit. Seit der Inbetriebnahme der ersten größeren Anlagen zur Wasseraufbereitung mit druckgetriebenen Membranen in den 1960er Jahren entwickelt sich die Membrantechnologie stetig weiter, immer mit den Zielen, Kosten für Investition und Betrieb zu senken und weitere Anwendungsgebiete zu erschließen. Der Einsatz von Membranen ist je nach Membranart zur Rohwasser- und Abwasseraufbereitung oder auch zur Wasserwiederverwendung möglich, wobei die Elimination von Partikeln, Mikroorganismen und Mikroschadstoffen sowie die Entsalzung maßgebliche Ziele sind. Mathias Ulbricht und Stefan Panglisch erforschen und entwickeln gemeinsam und fakultätsübergreifend verbesserte und neue Membranmaterialien und Prozesse.

Membranen und Membranverfahren

Membranen sind in den vergangenen Jahrzehnten als sehr effektive Trennhilfsmittel für eine Vielzahl von wesentlichen industriellen Prozessen etabliert worden. Die besonderen Vorteile von Trennverfahren mit Membranen im Vergleich zu traditionellen Operationen wie Destillation oder Extraktion basieren darauf, dass die Separation mittels Transport durch eine selektive Barriere erfolgt. Dafür können Membranen mit sehr unterschiedlichen Selektivitäten genutzt werden, entweder mit dichten Barrierestrukturen, in denen die Selektivität durch Löslichkeit und Diffusion von Ionen oder Molekülen bestimmt wird, oder mit porösen Trennschichten, in denen größere Moleküle oder Partikel durch Größenausschluss zurückgehalten werden können. Die höhere Effektivität von Membranprozessen beruht darauf, dass in der Regel keine ther-

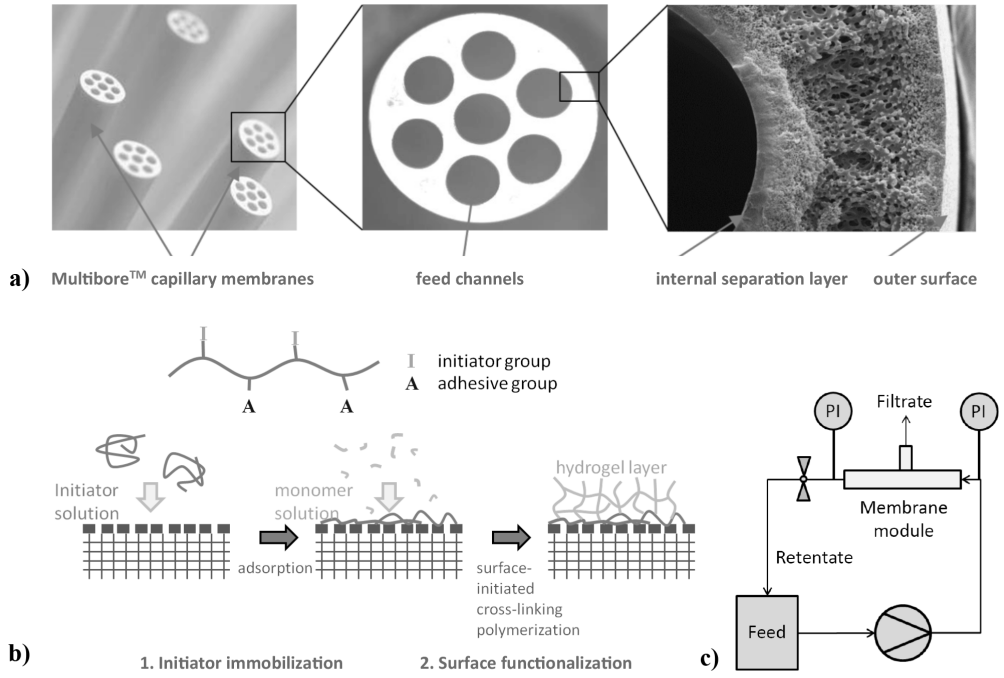
mische Energie aufgewendet werden muss, um Komponenten einer Mischung selektiv zu verdampfen (wie bei der Destillation) oder dass das Trennhilfsmittel – idealerweise – nicht regeneriert werden muss (wie bei der Extraktion, wo der erhaltene Extrakt in Extraktionsmittel und extrahierten Stoff getrennt wird).

Für Anwendungen zur Wasseraufbereitung, -reinigung, und -wiederverwendung sind druckgetriebene Membranverfahren, analog zur Filtration, von besonders großem Interesse. Mittels Umkehrosmose oder Nanofiltration können mit Hilfe von Membranen mit dichten oder nanoporösen Trennschichten Salze oder Mikroschadstoffe abgetrennt werden. Die Ultra- oder Mikrofiltration mit porösen Membranen (Porengröße > 2 nm) ist für die Abtrennung von Makromolekülen und kolloidalen Partikeln geeignet und besonders relevant für die Entfernung von Mikroorganismen, Viren oder Trübstoffen aus Wasser. Der besondere Vorteil von Membranverfahren besteht darin, dass es zumindest prinzipiell möglich ist, die Membran als absolute Barriere zu nutzen; das heißt bei Wahl einer geeigneten Membran unter geeigneten Trennbedingungen sind bestimmte kritische Kontaminationen im gereinigten Wasser, dem Filtrat, nicht mehr enthalten.

Technische Membranen können aus organischen Polymeren oder anorganischen, keramischen Materialien hergestellt werden. Aufgrund der relativ einfachen, kostengünstigen und flexiblen Verarbeitbarkeit zu einer großen Vielfalt von Membranstrukturen dominieren Membranen aus organischen Polymeren in den meisten Anwendungen, auch in der Wasserreinigung. Ein besonders wesentliches Verfahren zur Herstellung von Membranen basiert auf der sogenannten Phasenseparation. Ein Film einer Lösung des Membranpolymers wird durch Rakeln oder Extrusion in der gewünschten Geometrie, zum Beispiel flach oder als Kapillare, erzeugt und anschließend in definierter Weise mit einem Nichtlösungsmittel für das Polymer, in der Regel Wasser, in Kontakt gebracht. Die resultierende kontrollierte Ausfällung des Polymers führt zu porösen Flach- oder Kapillarmembranen, deren Porenstruktur sich durch die Wahl einer Vielzahl an Parametern (z.B. Art von Polymer und Lösungsmitteln) in weiten Grenzen einstellen lässt. Besonders wesentlich ist, dass dabei auch die Barriereeigenschaften optimiert werden können. So sind für die Ultra- und Nanofiltration anisotrope Membranen mit einer sehr dünnen porösen oder dichten Trennschicht (Dicke < 1 µm) auf einer makroporösen Unterstruktur essentiell, weil nur so die gewünschte Trennselektivität auch mit hohen Flüssen durch die Membran realisiert werden kann. Mikrofiltrationsmembranen haben größere Barriereporen (z.B. 0,2 µm für die Sterilfiltration); deshalb ist der Filtrationswiderstand geringer und eine gleichmäßigere Porengrößenverteilung über die Membrandicke ermöglicht eine optimale Trennleistung. Anisotrope poröse Membranen können auch in einem anschließenden Schritt durch eine Grenzflächenpolymerisation mit einer ultradünnen Trennschicht aus einem anderen Polymer versehen werden; das ist der Weg zu Dünnschicht-Kompositmembranen, die für die Umkehrosmose Stand der Technik sind. Dieses breite Portfolio an Membranen mit einstellbaren Trenngrenzen zwischen Mikrofiltration und Umkehrosmose wird, je nach Membrantyp und Anwendung, in unterschiedlichen Modulen für Trennprozesse eingesetzt. Dabei lassen sich die Verfahren prinzipiell einfach skalieren, je nach Volumenstrom des zu behandelnden Wassers werden kleinere oder größere Membranflächen (bzw. weniger oder mehr Membranmodule parallel) benötigt.

Darüber hinaus gibt es für Membranverfahren auch Limitierungen, die aus dem Trennprozess resultieren. Besonders relevant ist die sogenannte Konzentrationspolarisation: Durch die Anreicherung der von der Membran zurück gehaltenen Teilchen unter Filtrationsbedingungen verringern sich sowohl die Selektivität als auch der Fluss durch die Membran. Aktuell wird dieses Problem durch Maßnahmen beim Modul- oder Prozessdesign adressiert, aber deren Effektivität ist begrenzt. Ein weiteres signifikantes Problem beim Betrieb von Membranen sind irreversible Verschmutzungen auf der Membranoberfläche und eine damit verbundene dramatische Reduktion der Permeabilität. Dieser als Fouling bezeichnete Vorgang macht häufige Reinigungsprozesse zur Regeneration der Permeabilität notwendig und reduziert die Standzeit der Membran. Aus vorhandenen Studien ist bekannt, dass die natürlichen organischen Substanzen (Natural Organic Matter = NOM) hauptsächliche Verursacher von Membranfouling sind. Um den durch Fouling eintretenden Permeabilitätsverlust zu kompensieren, ist die Installation größerer Membranflächen erforderlich, was maßgeblich die Investitionskosten für solche Anlagen beeinflusst. Die zusätzlich verringerte Lebensdauer der Membranen macht zudem einen häufigen Austausch von Membranmodulen erforderlich.

Daher besteht trotz der sehr erfolgreichen Entwicklung bis in den industriellen Maßstab noch immer großes Interesse an Optimierungen. Dies geschieht durch sehr verschiedene Ansätze, wie die Verringerung der notwendigen Membranfläche beispielsweise durch den Einsatz von Membranen mit höherer Foulingbeständigkeit, durch die Erhöhung der Eliminationsleistung für störende Wasserinhaltsstoffe beispielsweise durch die Verbesserung der Trennleistung von Membranen oder durch die Erhöhung der Standzeit oder die Senkung des Energie- und Chemikalienbedarfs. Neben der genannten Optimierung von Membranen und Membranmodulen rücken zur Erreichung der genannten Ziele seit einiger Zeit die Anpassung der Membranprozesse und insbesondere



(1a) Multibore® Kapillar-Ultrafiltrationsmembranen aus Polyethersulfon (inge/BASF); b) schematische Darstellung der ortsselektiven Oberflächenfunktionalisierung von Ultrafiltrationsmembranen mit Hilfe eines makromolekularen Initiators mit Haft- und Initiatorgruppen sowie einer hohen Molmasse, sodass das Makromolekül die Trennschichtporen der Membran nicht passieren kann; nach Adsorption des Makroinitiators an der zugänglichen Membranoberfläche wird durch Kontakt mit einer Monomer-Lösung eine vernetzende Polymerisation an der Oberfläche ausgelöst, die zu einer polymeren Hydrogelschicht führt, deren Struktur und Dicke durch die Reaktionsbedingungen gesteuert werden kann; c) schematische Darstellung der Apparatur zur Funktionalisierung der Membranen im Modul beziehungsweise zur Charakterisierung der Ultrafiltrationsleistung vor und nach Funktionalisierung.
Quellen: a) © inge GmbH/BASF SE. b) adaptiert nach [3]. c) adaptiert nach: M. Quilitzsch, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2015

deren synergistische Kombination mit weiteren Aufbereitungsverfahren stärker in den Fokus der Ingenieurwissenschaften.

Verbesserte oder neue Membranen

Für viele Membrantrennungen, zum Beispiel die Entsalzung von Wasser mittels Umkehrosmose oder die Rückhaltung von kolloidalen Partikeln mittels Ultrafiltration, findet man für die etablierten Materialien einen Zusammenhang, der weitere Verbesserungen der Prozessleistung limitiert: Eine Erhöhung der Selektivität ist mit einer Verringerung der Permeabilität verbunden, und eine Erhöhung der Permeabilität geht mit einer Verringerung der Selektivität einher [1]. Für die Verbesserung der intrinsischen Trennleistung von Membranen, das heißt das Verhältnis von Selektivität und Permeabilität, sowie weiterer Eigenschaften wie die Foulingbeständigkeit sind also Variationen des Membranmaterials eine nahe liegende Option. Besonders attraktiv mit Blick auf die Skalierbarkeit ist es, wenn signifikante Verbesserungen ohne größere Änderungen von etablierten Materialsystemen sowie etablierten Verarbeitungsschritten und -bedingungen realisiert werden können. Für viele bereits verfügbare Membranen kann auch eine nachträgliche Funktionalisierung der Oberfläche zu einer verbesserten Trennleistung führen. Dieser Ansatz ist vor allem für die Verbesserung der Foulingbeständigkeit von Interesse, kann aber auch zur Veränderung der Trennselektivität genutzt werden. Solche Oberflächenfunktionalisierungen sollten mit maximaler Kontrolle, das heißt mit minimaler Beeinträchtigung der Basismembran, und idealerweise auch mit in Modulen eingebauten Membranen möglich sein.

Ultrafiltrationsmembranen, die in der Wasseraufbereitung eingesetzt werden, bestehen typischer Weise aus Polyethersulfon oder Polyvinylidenfluorid, das heißt technischen Kunststoffen, die eine hohe chemische, mechanische und thermische Stabilität aufweisen. Solche anisotropen Membranen werden im industriellen Maßstab durch Phasenseparation hergestellt. Allerdings sind beide Polymere sehr hydrophob, sodass im Kontakt mit Wasser die Adsorption von gelösten Stoffen begünstigt ist; die Folge ist eine sehr starke Foulingtendenz für die meisten Wasserinhaltsstoffe. Die folgenden Beispiele aus der aktuellen Forschung der AG Ulbricht illustrieren komplementäre Ansätze, durch Funktionalisierungen nach der Membranherstellung beziehungs-

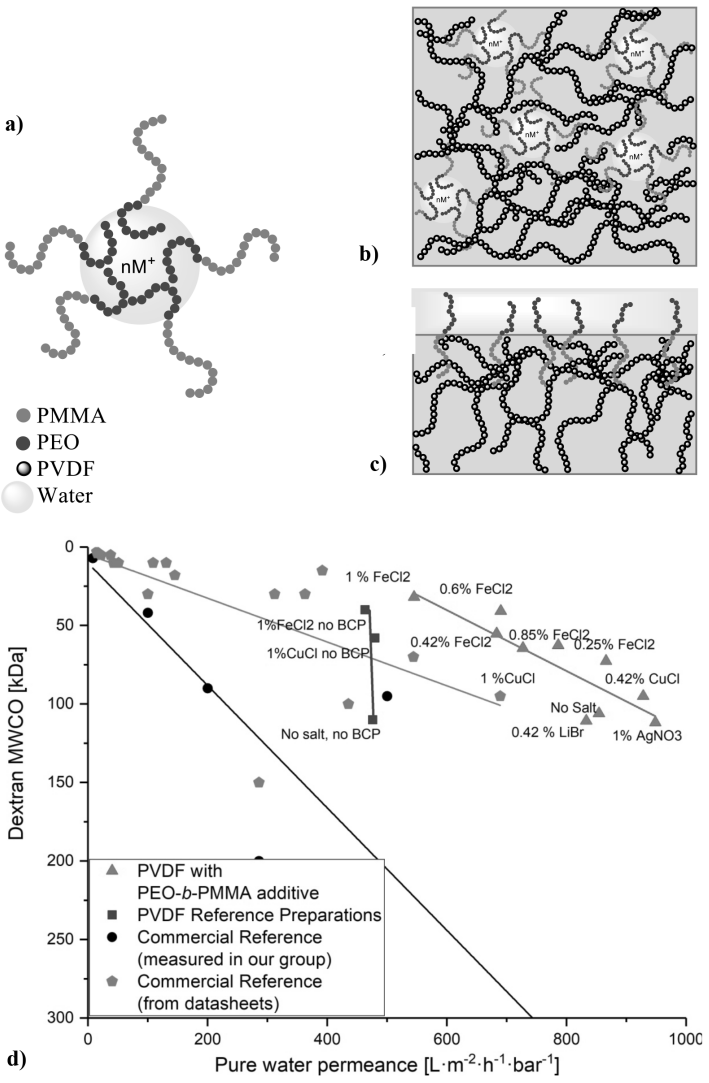
weise direkt im Herstellungsprozess, mit signifikantem Potential für die Verbesserung der Trennleistung von Ultrafiltrationsmembranen für die Wasseraufbereitung.

Aus Arbeiten anderer Gruppen sowie vorherigen eigenen Untersuchungen [2] ist gut bekannt, dass eine nachträgliche Funktionalisierung mit dünnen Schutzschichten aus hydrophilen Polymeren die Foulingtendenz von Ultrafiltrationsmembranen aus hydrophoben Polymeren minimieren kann. Um einen optimalen Effekt zu erzielen, müssen jedoch die Blockierung der Trennschichtporen der Basismembran minimiert und die intrinsischen Eigenschaften der Antifouling-Schicht optimiert werden. Beide Herausforderungen werden mit einer Funktionalisierungsstrategie adressiert, die gleichzeitig auch noch eine ortsselektive Funktionalisierung von Membranen in Modulen ermöglicht (Abb. 1) [3].

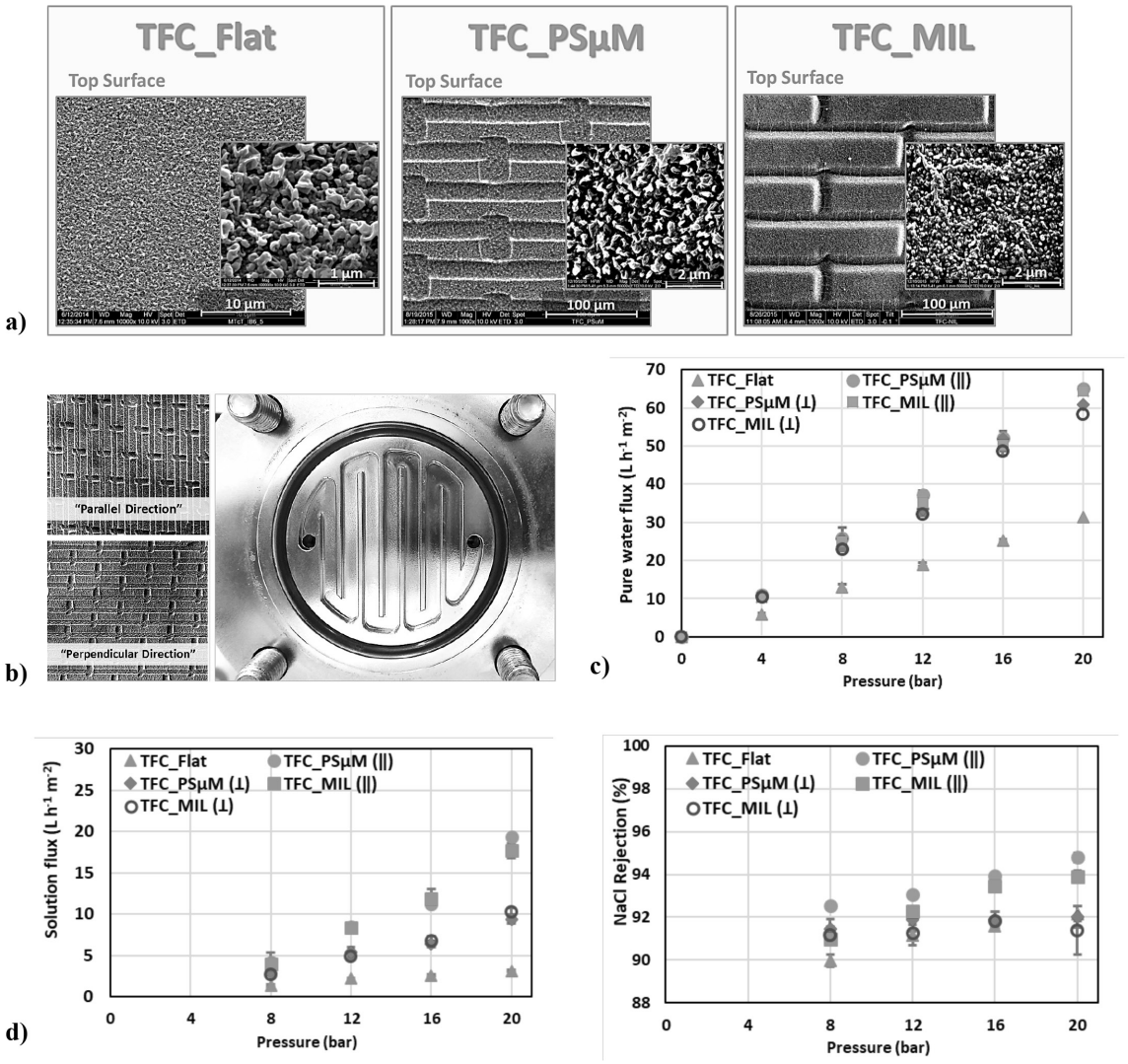
In vorherigen eigenen Studien hatten sich zwitterionische polymere Hydrogele mit einstellbarem Vernetzungsgrad als besonders effektiv zur Minimierung von adsorptivem Membranfouling durch Proteine, Polysaccharide, Huminstoffe und andere Substanzen erwiesen. Allerdings war die Funktionalisierungsmethode, die auf einer direkten Aktivierung des Membranpolymers Polyethersulfon durch UV-Strahlung basierte [2], nicht flexibel genug; zum Beispiel ist es auf diesem Wege unmöglich, selektiv die Trennschicht im Inneren der Feed-Kanäle einer Multibore Kapillarmembran zu modifizieren (vgl. Abb. 1a). Um die gewünschte Funktionalisierung gleichzeitig ortselektiv, effektiv, kontrolliert und flexibel zu gestalten, wurde eine Zweischritt-Methode, zusammen mit dafür maßgeschneiderten Hilfsmitteln und Bedingungen, etabliert. Von zentraler Bedeutung ist ein makromolekularer Initiator mit einer geeigneten Zusammensetzung aus Wiederholungseinheiten mit Haftgruppen zur festen Adsorption am Membranpolymer und Initiatorgruppen für einen effektiven Start einer radikalischen Polymerisation im Kontakt mit einer Monomerlösung, die einen komplementären Co-Initiator enthält (vgl. Abb. 1b). Für die Demonstration der Machbarkeit wurde ein Initiator/Co-Initiator-System aus Persulfat und tertiärem Amin gewählt, das sich bei Raumtemperatur nutzen lässt [3]. Außerdem muss der Makroinitiator eine so große Kettenlänge haben, dass er in einer wässrigen Lösung, die für die adsorptive Beschichtung der Membranoberfläche benutzt wird, die Trennschichtporen der Ultrafiltrationsmembran nicht passieren kann. Auf diese Weise lässt sich der Makroinitiator ortsselektiv auf der Trennschichtoberfläche der Membran anbringen; wenn die Beschichtung mittels Ultrafiltration von Kapillaren im Modul vorgenommen wird (vgl. Abb. 1c), dann wirkt diese Ortselektivität für alle Kanäle aller Kapillaren. In analoger Weise findet dann im zweiten Schritt der Funktionalisierungsprozedur die Oberflächen-initiierte vernetzende Polymerisation zu den dünnen Hydrogelschichten nur dort statt, wo zuvor der Initiator aufgebracht wurde; durch Einstellung von Konzentrationen, Temperatur und Reaktionszeit lässt sich die reaktive Beschichtung gezielt einstellen. Entscheidend für den Erfolg ist, dass die Reaktion nur dort stattfindet, wo Makroinitiator und Monomerlösung mit Co-Initiator in direkten Kontakt kommen; die Modifizierung anderer Bereiche der Membran, die zu einer sehr starken Verringerung der Permeabilität führen würde, lässt sich so verhindern. Bei Ultrafiltrationsmembranen für die Wasseraufbereitung bewirken die aufgebrachten Hydrogelschichten eine Veränderung der intrinsischen Trennleistung; die effektive Porengröße der Trennschicht verringert sich, sodass die Permeabilität abnimmt und die Selektivität zunimmt. Werden durch einfach realisierbare Änderungen im Herstellprozess Basismembranen mit größeren Trennschichtporen bereit gestellt, dann können die gewünschten Spezifikationen in Bezug auf Trenngrenze und Permeabilität auch für Hydrogel-Kompositmembranen erhalten werden.
Das wichtigste Ergebnis der Studie ist, dass das adsorptive Fouling der Membranen durch die Beschichtung deutlich verringert werden kann und dass dies erstmals auch für Kapillarmembranen, die im Modul modifiziert worden waren, demonstriert wurde. Während unmodifizierte Kapillarmembranen nach einem Tag Dead-end Filtration eines stark mit Huminstoffen und anderen Substanzen verunreinigten Wassers und anschließender Rückspülung mit Wasser nur noch 57 Prozent der ursprünglichen Permeabilität aufwiesen, waren dies bei den mit einem optimierten zwitterionischen Hydrogel beschichteten Membranen 88 Prozent. Folglich müssen solche verbesserten Membranen weniger intensiv gereinigt werden. Dass sich die Zweischritt-Funktionalisierung mit zwitterionischem Hydrogel mit Hilfe des Makroinitiator-Systems auch auf Ultrafiltrationsmembranen aus anderen Polymeren übertragen lässt und dass die beschichteten Membranen auch unter Bedingungen der chemischen Reinigung stabil sind, konnte jüngst demonstriert werden [4]. Aktuell wird daran gearbeitet, Antifouling-Beschichtungen, die ihre Wirksamkeit verloren haben, durch eine aggressive chemische Reinigung der Membran wieder zu entfernen und dann eine neue Schutzschicht aufzubringen.
In den derzeit laufenden Arbeiten wird das Konzept der nachtraglichen Ausrüstung von Membranen mit Antifouling-Schutzschichten an die Anforderungen unterschiedlicher realer Anwendungen angepasst.
Bei der Herstellung von Ultrafiltrationsmembranen im industriellen Maßstab werden den Lösungen des Membranpolymers oft auch noch hydrophile polymere Additive hinzugefügt, um die Strukturbildung zu beeinflussen. Ein Nebeneffekt ist eine teilweise Hydrophilierung der resultierenden Membranen.

Aus vielen Forschungsarbeiten, einschließlich eigener Studien [5], ist bekannt, dass man mit Blockcopolymeren, die aus hydrophilen und hydrophoben Segmenten bestehen, eine effektivere Hydrophilierung erzielen kann, weil sich diese amphiphilen Copolymere während der Phasenseparation definiert an der Membranoberfläche anordnen. Mit dem Ziel, Ultrafiltrationsmembranen aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) während der Membranherstellung effektiv zu modifizieren, wurden Diblockcopolymere aus Polyethylenoxid (PEO) und Polymethylmethacrylat (PMMA) hergestellt. Dabei sollte die bekannte gute Mischbarkeit von PMMA und PVDF (zusammen mit der Unlöslichkeit beider Polymere in Wasser) genutzt werden, um das Additiv PEO-*b*-PMMA effektiv in der Membranpolymermatrix zu verankern, während die hydrophilen PEO-Segmente mit ihren wohl bekannten Antifouling-Eigenschaften die entsprechenden Eigenschaften der Membran verbessern sollten. Im Verlauf der Arbeiten wurde darüber hinaus gefunden, dass sich die Selbstorganisation der Blockcopolymere in Lösung zu Mizellen ebenfalls nutzen lässt und dass sich dadurch die Porenstruktur der Trennschicht und somit die Membranleistung von PVDF-Ultrafiltrationsmembranen gezielt einstellen und verbessern lässt (Abb. 2) [6].

Das wichtigste Ergebnis der Arbeit ist der empirische Zusammenhang zwischen der Bildung von Mizellen in Lösungen von PEO-*b*-PMMA in N-Methylpyrrolidon mit geringen Anteilen an Wasser (einem Lösungsmittelsystem, das auch für die Herstellung der PVDF-Membranen verwendet wird) und der Trennleistung der resultierenden Membranen (vgl. Abb. 2d). Membranen, die mit Blockcopolymer, aber ohne Salz hergestellt wurden („no salt"), oder Membranen, bei deren Herstellung ein Salz zugesetzt wurde, das in den oben genannten Lösungen keine Mizellen induziert („0.42 % LiBr"), weisen bereits deutlich bessere Trennleistungen auf als Membranen, die ohne Blockcopolymer hergestellt wurden („no BCP"). Darüber hinaus gibt es einen bislang noch nicht bekannten Einfluss spezifischer Metallsalze (z.B. CuCl und $FeCl_2$) auf die Induzierung der Mizellbildung, welcher mit der positiven Wirkung derselben Salze auf die Trennleistung der Membranen korreliert. Membranen, die mit Hilfe solcher Salze hergestellt wurden, weisen bei jeweils gleichem MWCO deutlich höhere Permeabilitäten als alle anderen PVDF-Membranen



(2a) Schematische Darstellung von inversen PEO-*b*-PMMA Mizellen in einem organischen Lösungsmittel mit geringem Anteil an Wasser, deren Bildung durch Zugabe spezifischer Metallsalze induziert wird; b) Visualisierung des Einflusses von PEO-*b*-PMMA Mizellen in einer PVDF-Lösung in einem organischen Lösungsmittel auf die nach Phasenseparation mittels Wasser erhaltene Porenstruktur: PEO-Metallsalz-Wasser Domänen wirken als Template für Nanoporen in der Trennschicht; c) Segregation von PEO-*b*-PMMA an der Oberfläche von PVDF führt zu einer stabilen Hydrophilierung der Membranoberfläche; d) Zusammenhang zwischen Molekulargewichts-Ausschlussgrenze (MWCO) als Maß für die Trennselektivität und Wasserpermeabilität für eine Reihe von PVDF-basierten Ultrafiltrationsmembranen; Membranen, die mit PEO-*b*-PMMA hergestellt wurden, zeigen deutlich höhere Permeabilitäten bei gleicher Selektivität; die Trennselektivität lässt sich durch Art und Konzentration des zugesetzten Metallsalzes einstellen.
Quelle: adaptiert nach [6]



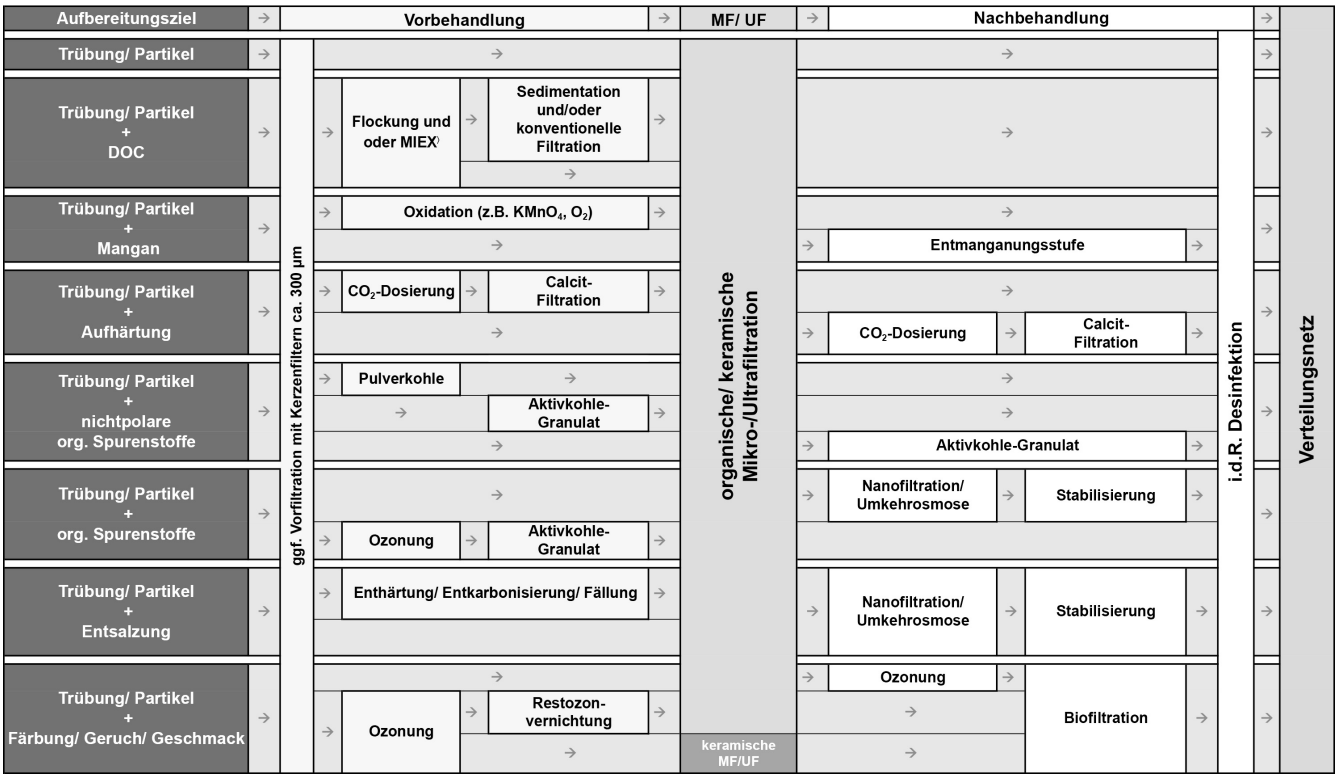
(3a) Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Trennschicht von flachen konventionellen sowie mittels „Phase Separation Micromolding“ (PSµM) oder „Microimprinting Lithography“ (MIL) strukturierten Dünnschicht-Kompositmembranen; b) Querstrom-Filtrationszelle, in welche die strukturierten Membranen mit den Mikrokanälen auf der Oberfläche parallel oder senkrecht zur Strömungsrichtung eingebaut werden; c) Wasserfluss in Abhängigkeit vom Druck für die unterschiedlichen Membranen in Abhängigkeit von der Anströmrichtung; d) Permeatfluss sowie Salzrückhalt bei der Nanofiltration von 10.000 ppm NaCl in Wasser als Funktion des transmembranen Drucks für die unterschiedlichen Membranen in Abhängigkeit von der Anströmrichtung.
Quelle: adaptiert nach [7]

auf (entweder aus den eigenen Präparationen oder anhand von Daten für kommerzielle Membranen). Mit solchen spezifischen Salzen lässt sich also vermutlich über die Dosierung in der Gießlösung die Porengröße der Trennschicht bei höherer Porosität im Vergleich zu konventionellen PVDF-Membranen steuern (vgl. Abb. 2b). Darüber hinaus zeigen die neuen PVDF-Membranen mit PEO-*b*-PMMA als funktionalem Additiv auch deutlich verbesserte Antifouling-Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen PVDF-Membranen und kommerziellen Membranen aus anderen Polymeren. Diese Ergebnisse sind höchst relevant, weil sich für ein etabliertes Membranpolymer durch kleine Anteile eines maßgeschneiderten Additiv-Systems im Rahmen desselben Herstellprozesses die resultierenden Membraneigenschaften deutlich verbessern und gezielt einstellen lassen.

Ein drittes Beispiel aus der Forschung der AG Ulbricht fokussiert auf neue Membranen auf Basis eines sehr gut etablierten Membrantyps. Mit Hilfe von zwei verschiedenen Mikrostrukturierungs-Verfahren wurde die Machbarkeit der Herstellung von Dünnschicht-Kompositmembranen für die Umkehrosmose oder Nanofiltration mit einer topographisch strukturierten Trennschicht demonstriert (Abb. 3) [7].

Die Oberflächentopographie wurde auf der porösen Trägermembran aus Polyethersulfon erzeugt, einerseits während der Phasenseparation auf einer vorstrukturierten

Schablone (PSµM), andererseits durch nachträgliches Prägen einer zuvor durch Phasenseparation hergestellten porösen Membran mit einer Schablone (MIL). Im Anschluss wurde durch Grenzflächenpolymerisation die trennaktive Schicht aus einem etablierten aromatischen Polyamid erzeugt (Abb. 3a). Die topographisch strukturierten Membranen haben bei gleichem Salzrückhalt eine doppelt so hohe Wasserpermeabilität im Vergleich zur flachen Referenzmembran, was einerseits mit der größeren aktiven Oberfläche (ca. 60 %, anhand der Geometrie), andererseits aber auch mit einer modifizierten Mikrostruktur der Trennschicht erklärt werden kann. Der Reinwasserfluss der strukturierten Membranen hängt nicht von der Anströmrichtung ab. Besonders bemerkenswert sind die Ergebnisse der Nanofiltration. Hier sind die Permeatflüsse bei gleichem transmembranen Druck für die strukturierten Membranen sehr viel höher als für die flache Referenz, aber vor allem zeigt sich ein sehr ausgeprägter Einfluss der Anströmrichtung. Für dieselben Membranen werden bei Anströmung parallel zu den Mikrokanälen auf der Oberfläche doppelt so hohe Flüsse im Vergleich zur senkrechten Anströmung erhalten; im Vergleich zur flachen Membran sind die Flüsse bis zu sechsmal höher. Gleichzeitig wird auch ein höherer Salzrückhalt beobachtet. Die Kombination aller Befunde belegt eindeutig, dass die deutliche Erhöhung der Membrantrennleistung durch eine sehr effektive Verringerung der Konzentrationspolarisation verursacht wird. Offensichtlich wirkt unter den genutzten turbulenten Strömungsbedingungen die Anströmung parallel zu den Mikrokanälen besonders effektiv im Sinne einer maximalen Vermischung des zurück gehaltenen Salzes zwischen Membranoberfläche und Volumen des Feeds. Derzeit laufen Studien, in denen weitere Einflüsse studiert werden, um wirkende Mechanismen besser zu verstehen und die erwünschten Wirkungen zu maximieren. Mit diesen Ergebnissen wurde eindeutig wissenschaftliches Neuland erschlossen. Die Befunde sind höchst relevant, weil sich damit eine Alternative abzeichnet, mit der das a priori unvermeidliche Problem der Konzentrationspolarisation wirksam verringert werden kann. Im Vergleich zu oder in Kombination mit bislang in Modulen genutzten Abstandshaltern über der Membran, die gleichzeitig für eine bessere Vermischung sorgen sollen, führt die Mikrostrukturierung der aktiven Membranoberfläche nicht zu Totzonen, und die zusätzliche Vermischung wird direkt an der Membranoberfläche induziert. Unter den beiden evaluierten Herstellverfahren hat die MIL-Methode das Potential, dass bereits etablierte Stützmembranen in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren mit der gewünschten Topographie versehen werden können. Arbeiten in diese Richtung befinden sich derzeit in Planung.



(4) Kombinationsmöglichkeiten der Mikro-/Ultrafiltration mit weiteren Aufbereitungsverfahren.
Quelle: Stefan Panglisch

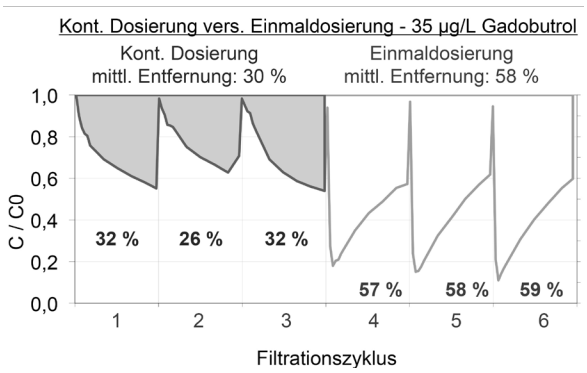
Prozessinnovationen

In der Wasseraufbereitung wird der Membranprozess nicht mehr singulär verstanden, sondern als Bestandteil einer Prozesskette, die durch das Aufbereitungsziel definiert wird (s. Abb. 4). Als zentrales Element kann die Mikro-/Ultrafiltration (MF/UF) mit einem oder mehreren weiteren Verfahren kombiniert werden, wie beispielsweise der Flockung, der Aktivkohlefiltration oder einer Ozonierung. Auf diese Weise können neben Mikroorganismen auch kolloidal oder molekular gelöste natürliche oder anthropogene organische Wasserinhaltsstoffe eliminiert werden, ohne gleichzeitig zu entsalzen, wie dies mit dichten Membranen (bei der Nanofiltration oder Umkehrosmose) zwangsläufig der Fall ist.

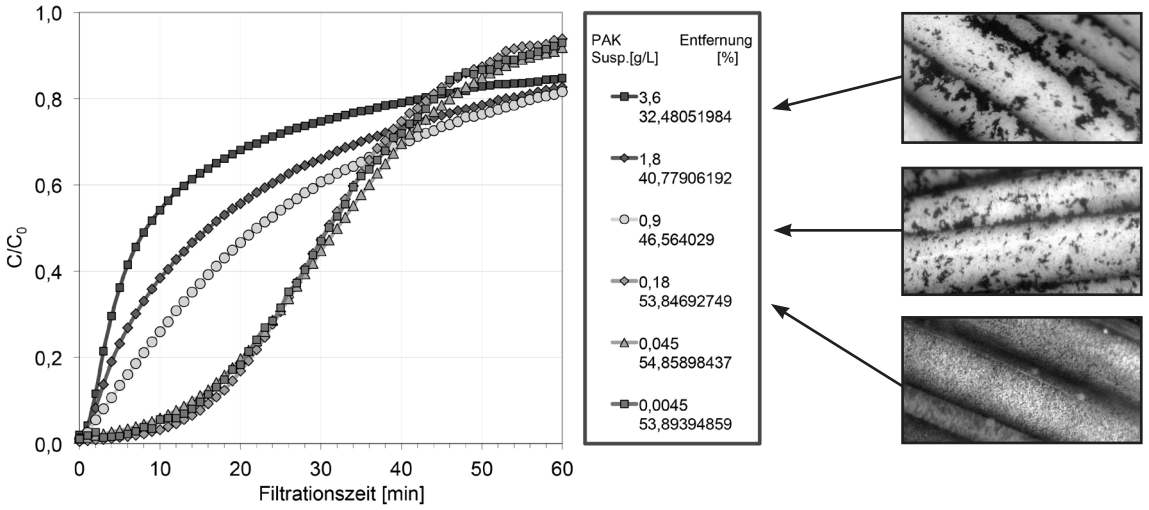
Als Hybridprozess wird eine derartige Kombination aus verschiedenen Aufbereitungsprozessen verstanden, durch die zusätzliche positive Effekte hervorgerufen werden können, die durch einfache Hintereinanderschaltung der Prozesse nicht erreicht werden können. In diesem Zusammenhang wird in der AG Panglisch beispielsweise die Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK) in den Zulauf einer MF/UF untersucht [8,9]. Ziele der Einzelprozesse sind es, organische Mikroschadstoffe zu eliminieren (durch die PAK) sowie Partikel (inkl. der PAK) und Bakterien zurückzuhalten (durch die MF/UF). Grundgedanke der hybriden Verschaltung ist darüber hinaus, irreversibles Fouling an der Membran zu minimieren und gleichzeitig die Effektivität der Adsorption zu steigern. Ersteres wird erreicht, weil die aus Kohlepartikeln gebildete Deckschicht zum einen Fouling verursachende Substanzen bindet und zum anderen die Effektivität der Rückspülung erhöht. Letzteres geschieht dadurch, dass durch die geringe Trenngrenze der Membran (z.B.: MWCO ~ 150 kDa, was einer Partikelgröße von ca. 50 nm entspricht) feinst vermahlene Aktivkohle (ca. 1–5 µm) eingesetzt werden kann, die eine erheblich bessere Kinetik der Adsorption aufweist, als üblicherweise verwendete PAK. Mit Testsubstanzen wie Diclofenac, Acesulfam, Amidotrizoesäure und Gadobutrol wurden verschiedene Aktivkohlen sowohl unvermahlen als auch vermahlen in Kombination mit einer MF untersucht. Durch die Vermahlung der PAK-Partikel in den unteren µm-Bereich konnte die Adsorptionskinetik und somit die Entfernung der organischen Stoffe im zeitlichen Rahmen eines üblichen Filtrationszyklus von 30 bis 60 Minuten deutlich verbessert werden. Als weitere Innovation führte die einmalige Dosierung der PAK zu Beginn eines Filtrationszyklus zu einer deutlich besseren Ausnutzung der Adsorptionskapazität im Vergleich zu einer kontinuierlichen Dosierung (s. Abb. 5). Dies konnte aufgrund der sehr dünnen Pulverkohleschicht auf der Membran und der damit verbundenen geringen Kontaktzeit nicht erwartet werden. Bei einer konventionellen Pulveraktivkohleanwendung ist für den Adsorptionsprozess in der Regel ein Kontaktreaktor notwendig, um die hier notwendige hohe Kontaktzeit zu gewährleisten.

Doch für den technischen Einsatz einer Einmaldosierung mit zum einen feinen Kohlepartikeln und zum anderen hohen Dosierkonzentrationen müssen weitere Faktoren berücksichtigt werden. Die in höheren Konzentrationen und bei kleineren Partikelgrößen bevorzugte Bildung von Agglomeraten in einer PAK-Suspension ist verbunden mit veränderten Eigenschaften der PAK-Schicht auf der Membran. Beispielsweise zeigt sich eine deutlich verringerte Entfernung von organischen Stoffen in einem Filtrationszyklus (s. Abb. 6). Ein Grund hierfür ist eine verschlechterte Adsorptionskinetik aufgrund längerer Diffusionswege innerhalb eines PAK-Agglomerats. Außerdem erzielt man bei Dosierung üblicher Mengen an Pulveraktivkohle keine flächendeckende Kohleschicht auf der Membran (s. Abb. 6, rechts), wenn die Bildung von Agglomeraten unberücksichtigt bleibt. Diese Problematik wird derzeit in einem Forschungsvorhaben adressiert, in dem der hybride Prozess im Pilotmaßstab im Ablauf einer Kläranlage betrieben wird.

Als weiterer Hybridprozess wird in der AG Panglisch die Kombination der MF/UF mit der Flockung untersucht. Da schon die Membran eine praktisch vollständige Entfernung der Partikel erlaubt, reduziert sich in dem Hybridprozess die Zielsetzung der Flockung auf die Überführung solcher Wasserinhaltsstoffe in die abtrennbare Form, deren Größe unterhalb der Trenngrenze der Membran liegt. Dies sind in der Regel gelöste organische Wasserinhaltsstoffe, so dass auch Membran-fouling verursachende kolloidale Wasserinhaltstoffe in die Flocke eingebunden werden. Da die sich aus den Flocken auf der Membran bildende Deckschicht zudem einen vergleichsweise geringen zusätzlichen Widerstand bildet und zudem durch



(5) Relative Ablaufkonzentrationen von Gadobutrol in Trinkwasser (20 mg/L PAK) beim Vergleich von kontinuierlicher und Einmaldosierung der PAK.
Quelle: Stefan Panglisch



(6) Relative Konzentrationen von Diclofenac (DFC) im Ablauf der MF-Anlage bei Einmaldosierung unterschiedlich konzentrierter PAK-Suspensionen (5 mg/L PAK). Quelle: Stefan Panglisch

die reguläre Rückspülung der Membranen gut entfernbar ist, ergibt sich für diese Verfahrenskombination mit der Verminderung von Membranfouling eine weitere Synergie. Die hierzu notwendigen Dosierkonzentrationen sind häufig sehr gering. Weiterhin kann aufgrund der geringen Trenngrenze der Membran auf die Bildung größerer Flocken verzichtet werden, was die notwendigen Reaktionszeiten deutlich reduziert [10,11]. Bei der Kombination der Flockung mit der Membranfiltration müssen die Bedingungen jedes einzelnen Teilschrittes bei der Flockung (Dosierung und Einmischung, Entstabilisierung, Flockenbildung) für sich und in Bezug auf die nachfolgende Membranfiltration optimiert werden [12].

Bislang erfolgte die Festlegung der optimalen Betriebsparameter (Zusammensetzung und Konzentration des Flockungsmittels, pH-Wert, G-Werte für Einmischung und Flockenbildung, notwendige Dauer der Flockenbildung) für eine mit der Membranfiltration gekoppelte Flockung im Wesentlichen empirisch in zumeist Standort-spezifischen Pilotierungen. Laboruntersuchungen beschränken sich auf die Optimierung einzelner Parameter, ohne die Einflüsse anderer Parameter zu berücksichtigen. Eine Übertragbarkeit oder Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle ist somit kaum möglich. In zukünftigen Arbeiten will die AG Panglisch sich daher mit den grundlegenden Zusammenhängen zwischen den Flockungsparametern und der Ausbildung und der Vermeidung reversiblen und irreversiblen Membranfoulings beschäftigen. Erkenntnisse aus den Untersuchungen sollen Anlagenbauern dienen, ein sowohl effizienteres als auch kostengünstigeres Systemdesign durchzuführen. Weiterhin werden in den überwiegenden Fällen die gleichen Flockungsmittel verwendet, wie in anderen Prozesskombinationen (Tiefenfiltration, Flotation, Sedimentation). Eine Modifizierung des Flockungsmittels zur selektiven Entfernung von membranfoulenden Substanzen scheint jedoch möglich zu sein und soll daher ebenfalls weiter vorangetrieben werden.

Fazit und Ausblick

Die Notwendigkeit der Bereitstellung von Wasserressourcen mit definierter Qualität und ausreichender Quantität ist eine essenzielle globale Aufgabe, für deren Lösung Membranverfahren weltweit als Schlüsseltechnologie angesehen werden, sei es zur Meerwasserentsalzung, zur Wasserwiederverwendung oder zur Nutzbarmachung besonders stark belasteter Ressourcen. Die Arbeitsgruppen Ulbricht und Panglisch bündeln bereits jetzt ihre Kompetenzen interdisziplinär in Forschung und Lehre, um Membranen und Membranprozesse durch innovative Entwicklungen kostengünstiger und für weitere Anwendungsfelder einsetzbar zu machen. Zukünftig sollen hierbei die aussichtsreichsten innovativen Aspekte in einem weitergehenden systemischen Ansatz verfolgt werden, in dem neben Membranmaterial- und struktur sowie Membranprozess auch Membrangeometrie, Modulbau, Systemdesign sowie Betrieb (inklusive Mess- und Regeltechnik) und Reinigung, bis hin zu Prozesssimulationen adressiert werden.

Summary

Because of their versatility and intrinsic advantages compared to conventional procedures, membrane processes are an acknowledged essential element in a sustainable water management system with growing national and international significance. Since the first major plants for water treatment with pressure-driven membranes were commissioned in the 1960s, membrane technology has been evolv-

ing steadily, always with the aim of reducing costs for investment and operation and of developing further areas of application. Depending on the membrane type, the use of membranes is possible for water and wastewater treatment and also for water reuse. Key targets are the elimination of particles, microorganisms and micro pollutants as well as desalination. Mathias Ulbricht and Stefan Panglisch are jointly researching and developing improved and new membrane materials and processes across faculties.

Anmerkungen/Literatur

1) J.R. Werber, C.O. Osuji, M. Elimelech, Materials for next-generation desalination and water purification membranes, Nature Reviews Materials 2016, 1, 16018.
2) H. Susanto, M. Ulbricht, High performance thin layer hydrogel composite ultrafiltration membranes for natural organic matter filtration, Water Research 2008, 42, 2827
3) M. Quilitzsch, R. Osmond, M. Krug, M. Heijnen, M. Ulbricht, Macro-initiator mediated surface selective functionalization of ultrafiltration membranes with anti-fouling hydrogel layers applicable to ready-to-use capillary membrane modules, Journal of Membrane Science 2016, 518, 328.
4) N. Lieu Le, M. Ulbricht, S.P. Nunes, How do polyethylene glycol and poly(sulfobetaine) hydrogel layers on ultrafiltration membranes minimize fouling and stay stable in cleaning chemicals?, Industrial Engineering Chemistry Research 2017, 56, 6785.
5) H. Susanto, M. Ulbricht, Characteristics, performance and stability of polyethersulfone ultrafiltration membranes prepared by phase separation method using different macromolecular additives, Journal of Membrane Science 2009, 327, 125.
6) J. Meyer, M. Ulbricht, Poly(ethylene oxide)-block-poly(methyl methacrylate) diblock copolymers as functional additive for poly(vinylidene fluoride) ultrafiltration membranes with tailored separation performance, Journal of Membrane Science 2018, 545, 301.
7) I. M.A. El-Sherbiny, A.S.G. Khalil, M. Ulbricht, Surface micro-patterning as a promising platform towards novel polyamide thin-film composite membranes of superior performance, Journal of Membrane Science 2017, 529, 11.
8) G. Hoffmann, R. Hobby, R, Gimbel, Untersuchungen zur Entfernung organischer Störstoffe mit der Verfahrenskombination Pulveraktivkohle/Membranfiltration bei der Wasseraufbereitung. Vom Wasser, 2014, 112, 79–126.
9) I. Ivančev-Tumbas, G. Hoffmann, R. Hobby, D. Kerkez, A. Tubić, S. Babić-Nanić, S. Panglisch, Removal of diclofenac from water by in/out PAC/UF hybrid process, Environmental Technology, 2017, in press (doi.org/10.1080/09593330.2017.1354077).
10) M. Dixon, C. Staaks, R. Fabris, V. Vimonses, C.W.K. Chow, S. Panglisch, M. Drikas, The impact of optimised coagulation on membrane fouling for coagulation/ultrafiltration process. Desalination and Water Treatment, 2013, 51, 2718–2725.
11) S. Panglisch, W. Dautzenberg, A. Holy, Drinking water treatment with combined coagulation ultrafiltration – Long term experience with Germany's largest plant. Water Science and Technology: Water Supply 2008, 8, 363–375.
12) S. Panglisch, G. Kraus, A. Tatzel, J.P. Lickes, Membrane performance in combined processes including ozonation or advanced oxidation, powdered activated carbon and coagulation – Investigations in pilot scale. Desalination 2010, 250, 819–823.

Die Autoren

Stefan Panglisch studierte an der Universität Duisburg allgemeinen Maschinenbau, an der er auch 2001 seine Promotion über Deckschichtbildung in kapillaren Membranen abschloss. Im Anschluss an seine Promotion war er über mehr als ein Jahrzehnt am IWW Rheinisch-Westfälischen Institut für Wasserforschung, einem national wie international renommierten Forschungs- und Beratungsinstitut, verantwortlich für den Bereich Wassertechnologie. Nach einer etwa dreijährigen Zeit als Forschungs- und Entwicklungsleiter der inge GmbH, einer Tochter des Chemieunternehmens BASF und weltweit eines der führenden Technologieanbieter für Ultrafiltrationstechnologie, ist er seit Juni 2014 verantwortlich für den Lehrstuhl Mechanische Verfahrenstechnik mit dem Schwerpunkt Wassertechnik (MVT/WT) an der UDE. Mit der Professur verbunden ist eine Position als wissenschaftlicher Direktor am IWW. Die Schwerpunkte seiner Forschungsarbeiten liegen derzeit bei der Optimierung und Simulation integrierter Membransysteme und Hybrid-Membranprozesse sowohl mit keramischen als auch polymeren Membranen und bei der physikochemischen Modifikation von Aktivkohlen zur Erhöhung der Selektivität der Adsorption organischer Stoffe.

Mathias Ulbricht hat an der Humboldt-Universität zu Berlin Chemie studiert; die Promotion erfolgte 1987. Im Anschluss war er dort als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, unterbrochen von mehreren Auslandsaufenthalten, von denen ihn der wichtigste 1992 bis 1993 an das Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, New York, USA, führte. Von 1994 bis 1996 hatte er ein Habilitandenstipendium der DFG; die Habilitation für das Fach Organische Chemie schloss er 1998 an der Humboldt-Universität zu Berlin erfolgreich ab. Von 1997 bis Mitte 1999 folgte eine Phase als wissenschaftlicher Mitarbeiter am GKSS Forschungszentrum Geesthacht in Teltow. Im Jahr 1999 gründete Mathias Ulbricht die Firma ELIPSA GmbH in Berlin und war bis 2003 als deren Geschäftsführer tätig. Im Jahr 2001 folgte er einem Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Chemie II an der damaligen Universität Essen, den er bis heute leitet. Seine Forschungsinteressen umfassen diverse Aspekte funktionaler Polymermaterialien mit einem besonderen Fokus auf verbesserte und neue Trennmembranen sowie Membran-basierte Technologien.

Stefan Panglisch. Foto: Vladimir Unkovic

Die Algen sind keine einheitliche Verwandtschaftsgruppe, sondern umfassen verschiedene Linien der Eukaryoten. Ihnen gemeinsam ist der Besitz von Plastiden, den Zellorganellen, in denen die Photosynthese abläuft. Plastiden finden sich in verschiedenen Linien der Eukaryoten, die allerdings nicht näher miteinander verwandt sind.

Spannende Alleskönner

Algen und ihre „Anwendungsgebiete“

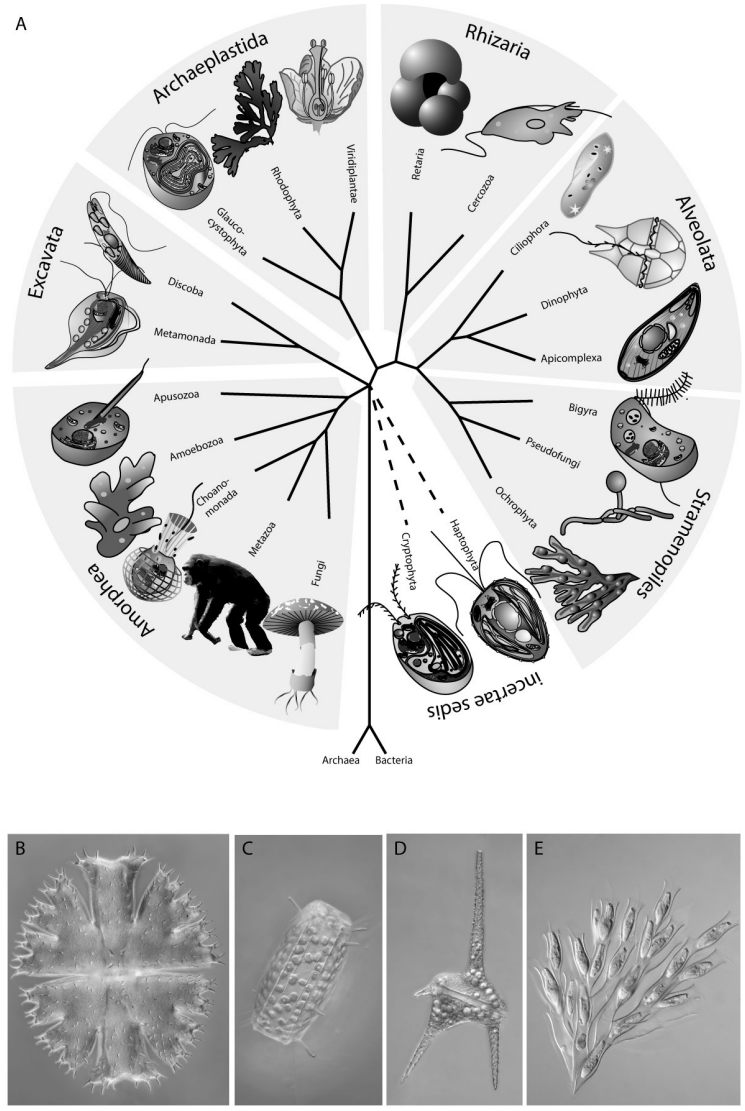
Von Jens Boenigk,
Sarah Zydorczyk und Thorsten Mietzel

Was sind Algen?

Der Begriff „Alge“ wird je nach Kontext unterschiedlich genutzt, die umgangssprachliche Verwendung des Begriffs deckt sich nur teilweise mit der wissenschaftlichen Verwendung. Als Algen werden alle phototrophen Organismen mit Ausnahme der Landpflanzen und der Cyanobakterien zusammengefasst. Als Mikroalgen werden mikroskopisch kleine Arten bezeichnet, die meisten von ihnen sind einzellig. Die Makroalgen (Großalgen) sind dagegen mit bloßem Auge erkennbar, sie bilden Gewebe aus und erreichen eine Größe von einigen Millimetern bis zu über 50 Metern. Die Algen sind keine einheitliche Verwandtschaftsgruppe, sondern umfassen verschiedene Linien der Eukaryoten. Ihnen gemeinsam ist der Besitz von Plastiden, den Zellorganellen, in denen die Photosynthese abläuft. Plastiden finden sich in verschiedenen Linien der Eukaryoten, die allerdings nicht näher miteinander verwandt sind. Die auch als Blaualgen bezeichneten Cyanobakterien betreiben zwar auch Photosynthese, sind aber keine Eukaryoten, sondern Bakterien und gehören somit nicht zu den Algen im Sinne dieser Definition. In ökologischen Studien werden dagegen oft die gesamten phototrophen Primärproduzenten als funktionelle Gruppe zusammengefasst – in diesem Sinne werden die Cyanobakterien dann nicht von den Algen abgegrenzt. Phylogenetisch sind die so zusammengefassten Organismen aber nicht näher miteinander verwandt (Abb. 1A). Im phylogenetischen Kontext machen diese Gruppierungen daher keinen Sinn.

Der Plastidenbau weicht zwischen den einzelnen Algengruppen

Jens Boenigk. Foto: Vladimir Unkovic



(1) Diversität der Eukaryoten. A) Tiere, Pflanzen und Pilze sind nur Seitenzweige im phylogenetischen Baum der Eukaryoten. Die weitaus meisten Linien umfassen einzellige Organismen. Algen finden sich in allen eukaryotischen Großgruppen mit Ausnahme der Amorphea. © Jens Boenigk. B) Micrasterias apiculata (Grünalgen; Viridiplantae). C) Thalassiosira punctigera (Kieselalgen; Ochrophyta). D) Ceratium hirudinella (Dinoflagellaten; Dinophyta). E) Dinobryon divergens (Goldalgen; Ochrophyta).
Fotos: © Wolfgang Bettighofer

stark voneinander ab. Man unterscheidet Algen mit einem ursprünglichen Plastidentyp (primäre Plastiden) und mit einem abgeleiteten (sekundären) [1].

Primäre Plastiden sind von zwei Membranen umgeben und besitzen entweder Chlorophyll a oder Chlorophyll a und b. Diese Plastiden findet man bei den als Archaeplastida zusammengefassten Algen, also den Rotalgen (Rhodophyta) und den Grünalgen (Chlorophyta und die mit den Landpflanzen verwandten streptophytischen Algen) sowie den Glaucocystophyta. Innerhalb der Algen mit ursprünglichen Plastiden, den Archaeplastida, stehen die Glaucocystophyta basal. Die Glaucocystophyta unterscheiden sich von den anderen Gruppen der Archaeplastida durch das Vorhandensein eines Carboxysoms und die Bildung einer Peptidoglycanwand in den Plastiden. Diese Eigenschaften sind in den anderen Linien reduziert.

Die Grünalgen (Chlorophyta und streptophytische Algen; Abb. 1B) umfassen sowohl terrestrische als auch aquatische Arten, die meisten Chlorophyta sind an Süßwasser angepasst. Innerhalb der Chlorophyta findet sich eine große Vielfalt an Formen, die von begeißelten und unbegeißelten Einzellern über Kolonien mit ausdifferenzierten Zellen bis zu unverzweigten und verzweigten Fadenalgen reicht. Auch die Landpflanzen gehören zu den Streptophyta, sie sind gewissermaßen eine vielzellige und an das Landleben angepasste Algenlinie. Die Streptophyta sind daher auch evolutionsbiologisch für das Verständnis der Entstehung der Landpflanzen bedeutend. Einige Rotalgen (Rhodophyta) leben im Süßwasser und im Boden, die weitaus meisten Taxa sind aber marin. Aufgrund ihrer akzessorischen Pigmente, die Licht in der „Grünlücke“ der Chlorophylle absorbieren, können die Rhodophyta in bis zu über 250 Metern Wassertiefe leben. Kommerziell werden Rotalgen zur Gewinnung der in der Molekularbiologie, Lebensmittel- und Kosmetikindustrie verwendeten Polysaccharide Agar und Carrageen genutzt.

Bei allen anderen Algen sind die Plastiden von drei oder vier Membranen umgeben und gehen auf die Aufnahme einer Rotalge oder einer Grünalge zurück. Diese Plastiden werden im Gegensatz zu den primären Plastiden der oben bezeichneten Gruppen als sekundäre Plastiden bezeichnet. Bei den weitaus meisten Algen mit sekundären Plastiden gehen die Plastiden auf die Aufnahme einer Rotalge zurück. Hierher gehören beispielsweise die Braunalgen oder Tange sowie die für die globale Primärproduktion bedeutenden Kieselalgen, Dinoflagellaten, Kalkalgen und Goldalgen.

Die Phaeophyceae (Braunalgen, Tange) sind vielzellig, einige Arten wie die Riesentange („Kelp“) der Gattung Macrocystis können bis zu 60 Meter lang werden. Sie sind fast ausschließlich marin und wachsen meist im flachmarinen Küstenbereich bis in die Spritzwasserzone auf

felsigem Untergrund. Neben ihrer ökologischen Bedeutung sind die Braunalgen kommerziell bedeutend für die Gewinnung von Alginaten. In der Lebensmittelindustrie dienen die Alginate als Emulgatoren und Verdickungsmittel. Alginate werden unter anderem in Backwaren, Tiefkühlprodukten, Speiseeis und Konserven verwendet. In der Medizin werden Alginate aufgrund ihres wundreinigenden Effekts eingesetzt.

Die Bacillariophyceae (Abb. 1C) sind eine artenreiche Gruppe vorwiegend aquatischer einzelliger Algen. Diatomeen leben in marinen, limnischen und terrestrischen Habitaten. Im Meer bilden sie eine bedeutende Komponente des Phytoplanktons, rund ein Viertel der globalen Primärproduktion geht auf Diatomeen zurück. Charakteristisch für die Bacillariophyceae ist die aus Silikat aufgebaute Schale. Die Ablagerungen der Diatomeen können gesteinsbildend sein und werden als Kieselerde abgebaut. Diatomeen sind kommerziell bedeutend – beispielsweise als Putzkörper in Zahnpasta, als Reflektormaterial in Straßenmarkierungen, als Trägermaterial für Nitroglycerin im Dynamit sowie vielfältig als Poliermittel, Filtermittel oder auch in Insektiziden, da die Schalen die Tracheen der Insekten verstopfen. Sie sind eine wichtige Indikatorgruppe für die Gewässerqualität und werden daher routinemäßig in ökologische Gewässeranalysen einbezogen.

Dinoflagellaten (Abb. 1D) sind nach den Bacillariophyceae die wichtigsten marinen Primärproduzenten. Sie können in nährstoffreichen Küstengewässern zu charakteristischen, oft rötlichen Algenblüten führen (Red Tide). Dinoflagellaten finden sich auch als intrazellulare Symbionten von Radiolarien, Foraminiferen, Mollusken, Nesseltieren sowie von einigen Ciliaten. Diese sogenannten Zooxanthellen ermöglichen den Wirtszellen eine phototrophe Ernährung und somit ein Überleben in nahrungsarmen Habitaten. Bedeutend ist diese Symbiose beispielsweise in Korallenriffen. Das Korallensterben geht im Wesentlichen auf eine Schädigung der Zooxanthellen zurück.

Die Goldalgen (Abb. 1E) sind morphologisch sehr divers, sie umfassen sowohl einzellige Arten als auch koloniebildende Formen. Vertreter der Chrysophyceae bilden Dauerstadien (Stomatocysten), die aus Silikat aufgebaut sind. In vielen Linien ist die Fähigkeit zur Photosynthese sekundär reduziert, auch diese farblosen Taxa besitzen aber noch rudimentäre Plastiden. Goldalgen sind vor allem in nährstoffarmen Süßgewässern bedeutend, die farblosen Vertreter sind aber auch bedeutend in terrestrischen und marinen Lebensräumen.

Ökologie

Algen leben in allen Lebensräumen, die meisten Arten leben in aquatischen Habitaten. Rund 50 Prozent der globalen Primärproduktion geht auf Algen zurück. Nur ein kleiner Teil der Primärproduktion wird direkt über die „klassische“ Nahrungskette von Metazoen genutzt. Ein weiterer Teil der aquatischen Primärproduktion wird durch Exsudation und Zelllyse als gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) freigesetzt. Der größte Teil der Primärproduktion fließt jedoch in das mikrobielle Nahrungsnetz und wird durch Fraßbeziehungen innerhalb der mikrobiellen Gemeinschaft (Bakterien, Flagellaten, Ciliaten) veratmet (Abb. 1). In mesotrophen Gewässern finden sich rund einige Hundert bis einige Tausend Algen pro Milliliter, ein bis drei Millionen Bakterien pro Milliliter, etwa 1.000 Flagellaten pro Milliliter und rund 100 Ciliaten pro Milliliter. Dem stehen wenige Metazoen gegenüber (meist weniger als zehn Rotiferen pro Milliliter, meist wenige oder weniger als ein Kleinkrebs (Cladoceren und Copepoden). In den ultra-oligotrophen Ozeanen sind die Abundanzen der Organismen um ein bis zwei Größenordnungen geringer, in eutrophen Teichen sind die Abundanzen entsprechend höher. Zu den bedeutendsten Primärproduzenten gehören Diatomeen, Dinoflagellaten und Grünalgen, zu den bedeutendsten Konsumenten gehören Choanoflagellaten, Bicosoeciden, heterotrophe Chrysophyceen, Dinoflagellaten und Ciliaten [2]. Über das mikrobielle Nahrungsnetz wird ein Teil dieser Produktion schließlich ebenfalls den Metazoen verfügbar.

Bei günstigen Umweltbedingungen kann es innerhalb eines kurzen Zeitraums zu einer explosionsartigen Vermehrung von Algen kommen. Solche Algenblüten können sowohl durch anthropogene Umweltveränderungen als durch natürliche Faktoren ausgelöst werden. Insbesondere der Eintrag von Nährstoffen führt im Frühjahr und Sommer zu Algenblüten. Algenblüten können nur wenige Tage oder aber auch mehrere Monate andauern und sich von wenigen Metern über mehrere Hundert Quadratkilometer ausdehnen. Im Meer sind häufig Dinoflagellaten und Haptophyta an Algenblüten beteiligt, in Süßgewässern sind neben Eugleniden und Grünalgen auch Cyanobakterien oft beteiligt. Die große Organismendichte wirkt sich negativ auf den Sauerstoffhaushalt der Gewässer aus und kann zu Anoxien führen. Verschiedene Blütenbildner produzieren auch toxische Substanzen, die in den bei Algenblüten auftretenden Konzentrationen für andere Organismen schädlich sind.

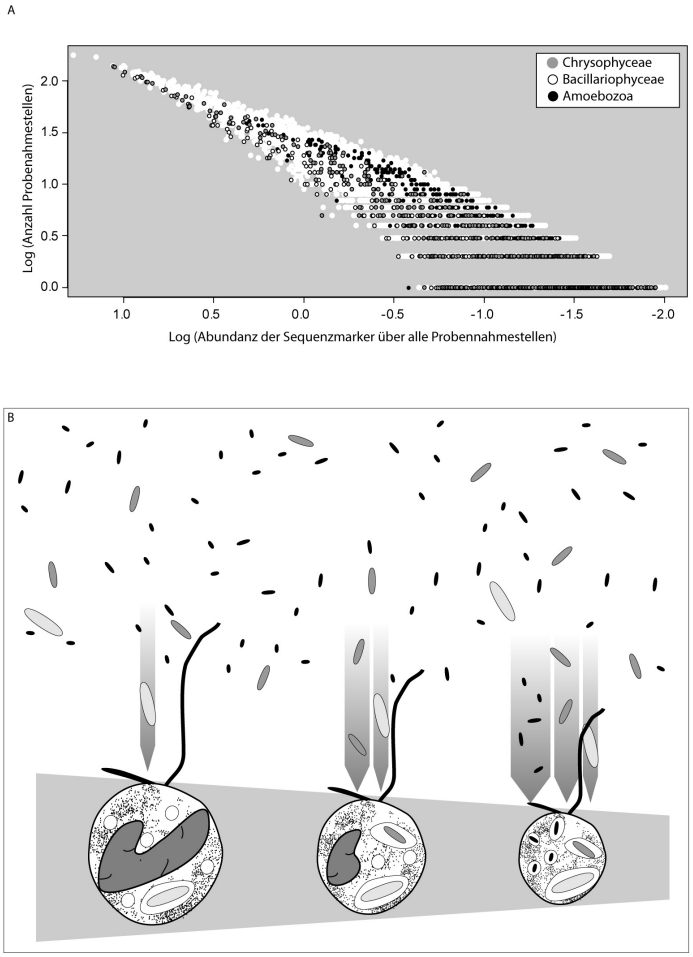
Algenforschung an der UDE

Verbreitungsmuster

Die Diversität von Algen und heterotrophen Einzellern ist enorm, ihre Verteilungsmuster sind dagegen nicht gut verstanden [2,3]. Während einige Taxa offensichtlich global verteilt sind, sind einige andere Taxa endemisch. Geographische Barrieren wie Gebirgszüge spielen eine Rolle für die Verbreitung von Algen, insbesondere ändert sich die Artenviel-

falt systematisch mit der Höhe und der Landnutzung [3,4]. Es ist aber höchst umstritten, inwieweit die für höhere Organismen beobachteten Verbreitungsmuster auf Protisten übertragbar sind. Die nacheiszeitliche Biogeographie Europas ist ideal für die Prüfung der Verallgemeinerbarkeit solcher biogeographischen Muster. Hochdurchsatzsequenzierung erlaubt jetzt die Analyse großräumiger Diversitätsmuster. Ein Forschungsschwerpunkt ist die Verteilung von Protisten in europäischen Binnengewässern im Hinblick auf die postglazialen Verteilungsmuster von Makroorganismen. Dies umfasst deren Diversität in aquatischen Ökosystemen auf der Basis von Planktonproben von 200 europäischen Seen einschließlich Seen aus Spanien, Frankreich, Italien, Schweiz, Österreich, Rumänien, Ungarn, der Tschechischen Republik, der Slowakei, Polen, Schweden, Norwegen, Griechenland, Kroatien und Bulgarien. Umweltbedingungen, insbesondere Nährstoffverfügbarkeit, pH-Wert und die Höhenlage der Seen in Gebirgsgradienten, begrenzen das Vorkommen von Arten und damit die Verbreitungsmuster von Algen und heterotrophen Protisten. Die Verknüpfung zwischen der Ökologie von Organismen und deren Verteilungsmuster sowie die Verallgemeinerbarkeit dieser Zusammenhänge sind die grundlegende Basis für das Verständnis der funktionellen Dynamik von Ökosystemen und deren assoziierter Biodiversität [5]. Das Zusammenspiel zwischen Biodiversität und Ökosystemfunktion wirft die Frage auf, in wieweit die funktionelle Differenzierung von Taxa deren Verteilungsmuster bedingt. Für die Analyse von Verbreitungsmustern werden in zunehmendem Maße molekulare Sequenzen als art- und gruppenspezifische Marker eingesetzt. Die Interpretation dieser molekularen Diversität stellt hohe Ansprüche an die Datenaufbereitung und die Trennung biologisch relevanter Information von methodisch bedingten Analyseartefakten. In der Abteilung Biodiversität wurden für die Aufbereitung und Analyse dieser molekularen Diversitätsdaten bioinformatische Protokolle entwickelt [6,7], auf deren Grundlage nun die Verbreitungsmuster interpretiert werden können.

Die Zuordnung von Umweltsequenzen zu Organismen bei den einzelligen Mikroalgen wird durch die Kombination mikroskopischer und molekularer Verfahren auf Einzelzellebene ermöglicht [8,9] und erlaubt die Verknüpfung von Umweltdaten zu Laboranalysen ausgewählter Arten. Einige Arten kommen nur in einem oder sehr wenigen Habitaten vor – in diesen können sie aber durchaus häufig sein. Andere Arten sind dagegen weit verbreitet und finden sich in durchaus unterschiedlichen Habitaten – viele dieser Arten erreichen aber nicht unbedingt hohe Abundanzen in den einzelnen Habitaten [2]. Diese verschiedenen Verbreitungsmuster reflektieren unterschiedliche Überlebensstrate-



(2) Verteilungsmuster und Ernährungsstrategien mikrobieller Eukaryoten. A) Organismen verschiedener Ernährungsstrategien sind unterschiedlich eingenischt. Die Punkte, die innerhalb der Punktwolke eher oben und eher rechts angeordnet sind stehen für Arten mit einer weiten Verbreitung und wenig spezialisierten Anpassung an bestimmte Habitateigenschaften, die meisten Amoebozoa entsprechen dieser Strategie. Dagegen stehen Punkte, die eher am unteren oder linken Rand der Punktwolke angeordnet sind, für Arten mit eingeschränkter Verbreitung und entsprechend engen Nischen, die meisten Kieselalgen entsprechen dieser Strategie. Die Goldalgen sind zwischen diesen beiden Extremen einzuordnen. B) Bei den Goldalgen lässt sich in verschiedenen Linien eine zunehmende Reduktion des Plastiden beobachten. Die Reduktion des Plastiden erlaubt eine kleinere Gesamtgröße der Zelle und diese kleineren Zellen können erfolgreich kleinste Bakterien als Futter nutzen. Die Aufgabe der Photosynthese geht daher mit einer höheren Effizienz der bakterivoren Ernährung einher.
Quelle: verändert nach Gardner. et al. [2] und De Castro et al. [10]

gien: eine Spezialisierung entsprechend einer engen Nischenweite im ersten Fall und breite Toleranzen sowie eine hohe Nischenweite im zweiten Fall. Die einzelnen Arten entsprechen in unterschiedlichem Maße diesen Strategien, interessanterweise lassen sich aber bereits auf der Ebene höherer taxonomischer Gruppen, verschiedener Familien und Ordnungen, Muster feststellen. So lassen sich aus den Verbreitungsmustern für die Kieselalgen vorwiegend recht spezialisierte Strategien ableiten, während viele Goldalgen intermediäre Strategien und die Amoebozoa eher generalistische Strategien aufweisen (Abb. 2A) [3].

Differenzierung der Ernährungsökologie und Verlust der Fähigkeit zur Photosynthese

Einer der offensichtlichsten funktionellen Unterschiede zwischen Organismen ist die Differenzierung der Ernährungsstrategien in heterotrophe, mixotrophe und phototrophe Organismen. In vielen Algengruppen haben einige Arten oder Verwandtschaftsgruppen die Fähigkeit zur Photosynthese verloren und sind sekundär wieder zu einer heterotrophen Lebensweise zurückgekehrt [1,10]. Daneben gibt es viele Arten, bei denen beide Ernährungsweisen – Photosynthese und heterotrophe Ernährung – parallel vorkommen. Übergänge zwischen den verschiedenen Ernährungsweisen finden sich in den unterschiedlichsten Organismengruppen. Besonders häufig findet sich die evolutive Entwicklung von heterotrophen Organismen aus phototrophen Vorfahren bei den Goldalgen (Chrysophyceae) [11]. Aufgrund dieser funktionellen Differenzierung und ihrer weiten Verbreitung [12] sind Goldalgen besonders geeignet, um die für diese Differenzierung verantwortlichen ökologischen und evolutionären Szenarien zu untersuchen [13]. Zudem sind die Chrysomonaden eine ökologisch vergleichsweise gut untersuchte Organismengruppe mit vielen Modellarten für ökologische und ökophysiologische Fragestellungen [14,15,16].

Molekulare Phylogenien basierend auf ribosomalen Gensequenzen zeigen, dass die verschiedenen heterotrophen Linien nicht einmalig, sondern mehrfach unabhängig aus phototrophen Vorläufern entstanden sind [11,17]. Phylogenien mitochondrieller Gensequenzen unterstützen diesen Befund weiter. Heterotrophie evolvierte also mehrfach innerhalb der Goldalgen.

Die Adaptionen an eine heterotrophe Lebensweise und der Grad der morphologischen und molekularen Reduktion (beispielsweise des Photosyntheseapparates) ist in verschiedenen Linien allerdings unterschiedlich stark. Ultrastrukturelle Untersuchungen belegen, dass auch die heterotrophen Stämme Plastiden besitzen, auch wenn diese in vielen Stämmen stark reduziert sind. Nur in einem der untersuchten Stämme fanden wir in diesen Plastiden ein inneres Membransystem (Thylakoide), während diese in den Plastiden der anderen Stämme vermutlich reduziert sind [11]. Molekulare Analysen basierend auf Transkriptomsequenzierungen ergaben weitere Beweise für die Präsenz von Plastiden. Dies gilt sowohl für Stoffwechselwege, die mit der Carotenoidbiosynthese zusammenhängen, als auch für Stoffwechselwege des basalen Kohlenstoffmetabolismus [18].

Diese Plastiden erfüllen zentrale Funktionen im Stoffwechsel auch der heterotrophen Formen. Trotz der heterotrophen Lebensweise ist der Ursprung aus „Algen“ damit klar nachvollziehbar und die plastidassoziierten Stoffwechselwege sind von zentraler Bedeutung für diese Organismen. Weiterführende Studien zur differentiellen Adaption von farblosen Goldalgen scheinen daher vielversprechend für die Entschlüsselung der Evolution der Goldlagen und insbesondere der Differenzierung der Ernährungsökologie innerhalb dieser Gruppe.

Die evolutionären und ökologischen Gründe für diese Differenzierung sind aktueller Forschungsgegenstand im Fachbereich der Biologie. Von einer autotrophen Ernährung ausgehend herrscht ein Selektionsdruck zugunsten einer mixotrophen Ernährung vor allem in nährstofflimitierten Umgebungen, da über die phagotrophe Ernährung Nährstoffe aufgenommen werden können [10,19]. Geraten mixotrophe Organismen unter permanente Lichtmangelbedingungen, so kann es zum Verlust der Fähigkeit zur Photosynthese kommen (Abb. 2B) [10]. Der umgekehrte Weg, also der Wechsel von heterotropher zu mixotropher oder phototropher Ernährung, ist in der Evolution wesentlich seltener realisiert, da dies in der Regel die Aufnahme eines phototrophen Endosymbionten und dessen Umwandlung zu einem Plastiden erfordert [1]. Dies ist ein wesentlich komplizierterer Prozess als der sukzessive Verlust der Fähigkeit zur Photosynthese. Die Nährstoff- und die Kohlenstoffversorgung sind treibende Kräfte in der Evolution von Mixotrophie und der Differenzierung verschiedener Ernährungstypen.

Anwendungsverfahren von Algen im Nährstoffabbau im Abwasser

Der Abbau von Nährstoffen, wie beispielsweise Stickstoff oder Phosphor, ist ein komplexes und energieintensives Verfahren auf einer kommunalen Kläranlage. Konventionelle Kläranlagen setzen hierzu biologische Systeme wie den Belebtschlamm ein. Da Mikroalgen während ihres Wachstums Stickstoff und Phosphor assimilieren und dabei anorganischen Kohlenstoff als Kohlenstoffquelle nutzen, sind Mikroalgen ein interessanter Ansatzpunkt in der Nährstoffabnahme auf Kläranlagen. Sie eignen sich insbesondere für die Behandlung von Abwässern mit einem für konventionelle biologische Verfahren schlech-

ten C/N/P Verhältnis. Zentrat mit einem CSB/TN-Verhältnis von 0,2 bis 0,4 kann ohne eine zusätzliche organische Kohlenstoffquelle mit konventioneller Klärtechnik nicht behandelt werden, da diese erst ab einem Verhältnis von 9:1 funktioniert. Im Rahmen eines bereits abgeschlossenen Forschungsvorhabens wurden daher auf einer Kläranlage unterschiedliche Algenreaktoren auf ihre Eignung zur Reinigung des durch Zentrifugen abgetrennten Schlammwassers untersucht [20]. Unter anderem wurden Versuche zur Anreicherung von Mikroalgen im Kulturmedium (BG-11 Medium) mit hohen Ammoniumkonzentrationen (50/150/400/1.000 mg-NH_4/L) durchgeführt. Die Ergebnisse (Tab. 2) zeigen, dass die Grünalge *Scenedesmus species*, die zur Untersuchung herangezogen wurde, sich in den ersten 21 Tagen an das Umgebungsmilieu adaptiert hat, so dass sich in der zweiten Phase der Untersuchungen die Wachstumsgeschwindigkeit und die Stickstoffabnahme erhöht hatte. Ferner konnte festgestellt werden, dass durch die hohe Ammoniumkonzentration, die Mikroalgen eine erhöhte Wachstumsgeschwindigkeit mit einhergehender Stickstoffabbauraten im realem Abwasser aufzeigten.

Neben der Verwendung von in normalen Fließgewässern vorkommenden Mikroalgen wurden auch solche, die im Schlammwasser enthalten sind und somit an die Lebensbedingungen angepasst sind (sog. Autochthone Arten), für Versuche im Labormaßstab verwendet. Hierfür wurde zunächst eine 1 L-Probe des Schlammwassers für eine Woche beleuchtet und so das Algenwachstum gefördert. Anschließend wurde eine geringe Menge Schlammwasser mit einer Pipette entnommen und auf eine Petrischale aufgetragen. Zusätzlich wurde ein Nährstoffmedium mit allen für das Wachstum benötigten Stoffen hinzugegeben (BG-11 Medium). Im Schlammwasser enthaltene Bakterien wurden mit Hilfe eines Antibiotikums (Ampicillin) abgetötet. Um die Algenkolonien von anderen im Schlammwasser enthaltenen Stoffen zu separieren wurde es mit Agar geliert. Die Beleuchtung erfolgte in einem 16:8 hell/dunkel Zyklus (fluoreszierenden Leuchtstoffröhren 40–80 µmol/m^2/s). Nach manueller Trennung einzelner Mikroalgenkolonien wurde diese zwei bis drei weitere Male in Petrischalen kultiviert. Anschließend wurden die Mikroalgen in 1-L Laborphotobioreaktoren weiter gezüchtet und die Nährstoffabbauraten mit den sonst verwendeten Mikroalgengattungen verglichen. Es zeigt sich, dass mit den Algen, die aus dem Schlammwasser extrahiert wurden, um bis zu 40 Prozent höhere Abbauraten erreicht werden konnten.

Auf drei halb-technischen Anlagen (Abb. 3) wurden auf der Kläranlage Dorsten Wachstumsgeschwindigkeiten der Mikroalge, die Stickstoffabbaurate und der Einfluss verschiedener Betriebsparameter auf die Behandlung von Zentrat der Schlammzentrifuge evaluiert [20].

In Tabelle (3) sind die Wachstumsgeschwindigkeiten und die Abbauraten dargestellt. Die höchste Algenwachstumsrate und der höchste Stickstoffabbau werden im Rohrreaktor erreicht. Dies ist auf die, bezogen auf das Volumen, größere beleuchtete Oberfläche und die somit stärkere Photosynthese zurückzuführen.

In dem Rohrreaktor beträgt die Wachstumsgeschwindigkeit zwischen 50 und 110 Milligramm TSS/L/d und ist somit fast zehnmal höher als die in den IBC Reaktoren in denen Wachstumsgeschwindigkeiten zwischen 2 und 10 Milligramm TSS/L/d erreicht werden. In einer konventionellen biologischen Abwasserbehandlung (mit Nitri- und Denitrifikation) liegt die Biomassezunahme der Bakterien zwischen 150 und 300 mg TSS/L/d [21].

Parameter	Durchführungsdauer (d)	Flokkulat (mg A1/L) 50	150	400	1.000
Stickstoff Abbau (mgNH4-N/L)	0–21	17,7 (35,4%)	22,0 (14,7%)	32,5 (8,1%)	50,0 (5,0%)
	21–35	24,7 (49,4%)	40,9 (27,3%)	85,0 (21,3%)	103,0 (10,2%)
Ammonium Abbaurate (mgNH4-N/L/d)	0–21	0,85	1,06	1,57	2,41
	21–35	1,76	2,92	6,07	7,47
finale Algenkonzentration (mg TSS/L)	0–21	400	322	284	267
	21–35	719	602	513	445
Algen Wachstumsrate (mg TSS/L)	0–21	17,3	13,7	11,9	11,1
	21–35	24,5	21,5	17,6	12,9
mg N abgebaut/mg TSS produziert	0–21	0,05	0,08	0,13	0,21
	21–35	0,08	0,15	0,37	0,58

(T1) Ergebnisse der Untersuchungen mit unterschiedlich hohen Ammoniumkonzentrationen, aufgeteilt in die zwei Untersuchungsphasen.

Spurenstoffproblematik im Gewässer

Die Begriffe Mikroverunreinigungen, Mikroschadstoffe und Spurenstoffe werden in der wissenschaftlichen Diskussion synonym benutzt und umfassen organische oder anorganische Stoffe natürlicher und anthropogener Herkunft, welche umweltrelevant sein können und in sehr geringen Konzentrationen (ng/L bis µg/L) im Abwasser, Trink-

(3) Links: Rohrphotobioreaktor, Mitte: offener Wassertank IBC, rechts: Wassertank IBC mit Leuchtstoffröhren.
Quelle: Pozza [20]

wasser sowie in Oberflächengewässern nachgewiesen werden können. Vor dem Hintergrund der verbesserten analytischen Nachweisverfahren und dem damit einhergehenden verstärkten Nachweis von Mikroschadstoffen, können immer mehr Stoffe in der aquatischen Umwelt gemessen werden. Zum Schutz der aquatischen Umwelt und den Trinkwasserressourcen ist eine gute Qualität der Oberflächengewässer zwingend erforderlich. Der „gute ökologische Zustand", wie er in den Zielen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) gefordert wird, kann in 90 Prozent der Gewässer Nordrhein-Westfalens nicht erreicht werden. Häufig sind Auswirkungen und Belastungen durch Mikroschadstoffe die Gründe für diesen hinreichenden Zustand. Dazu gehören beispielsweise Pharmazeutika, in der Landwirtschaft eingesetzte Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel, sowie Produkte des täglichen Gebrauchs (Personal Care Products) als auch Haushalts- und Industriechemikalien. Aus Vorsorgegründen wird daher eine Vermeidung beziehungsweise Verminderung des Eintrags von Mikroverunreinigungen angestrebt.

Seit einigen Jahren wird verstärkt nanopartikuläres Silber aufgrund der bakteriziden Wirkung des Silbers im medizinischen Bereich wie auch in vielen Bereichen des täglichen Lebens eingesetzt. Die zunehmende Verwendung dieser Nanopartikel führt unvermeidbar zum Eintrag von Silber in die Umwelt. In natürlichen Systemen führen bereits geringe Konzentrationen an Silber im Bereich von 5 µg/L zu einer Verschiebung des Artenspektrums sowie zu einer Verschiebung der Genaktivitäten und damit der Ökosystemfunktionen [22,23]. Das Verhalten von Silber-Nanopartikeln in aquatischen Systemen und deren biologische Effekte auf aquatische Organismen wurden in experimentellen Systemen untersucht. Insbesondere die mit der Photosynthese zusammenhängenden Stoffwechselwege sind stark betroffen, was möglicherweise auf eine Komplexbildung des Chlorophylls mit den Silberionen zurückzuführen ist [22,23].

Die Humanpharmaka stehen stellverstretend für die Vielfalt der Spurenstoffe und werden im Folgenden im Mittelpunkt gestellt. Über die natürlichen Ausscheidungen des Menschen gelangen Pharmaka in unveränderter Form oder als Metabolit in das Abwassersystem. Einige Wirkstoffe können auch als Salben zur äußerlichen Anwendung eingesetzt werden und gelangen durch das Waschen und Duschen direkt ins Abwasser. Neben der medizinischen Anwendung von pharmazeutischen Produkten, stellt die unsachgemäße Entsorgung von Medikamentenresten über die Toilette einen schwer abzuschätzenden, aber nicht zu vernachlässigenden Anteil für den Eintrag in die Abwasserkanalisation dar. Die derzeitigen Kläranlagen sind in der Regel nicht darauf ausgelegt, biologisch schwer abbaubare Arzneimittelrückstände gänzlich zu eliminieren [24,25,26] und überführen die Spurenstoffe in die nahegelegenen Oberflächengewässer.

Pharmaka in der aquatischen Umwelt

Täglich werden tonnenweise pharmazeutische Produkte im alltäglichen Gebrauch angewandt und sind ein unerlässlicher Bestandteil zur Behandlung von jeglichen Krankheitsbildern. Ein schwer vermeidbarer Nebeneffekt ist der Eintrag in die Gewässer. Bereits in den 70er Jahren wurden Untersuchungen zum Eintrag von Arzneimittelwirkstoffen in die Umwelt veröffentlicht [27]. Jedoch wurden erst 1994 mit dem Nachweis der Clofibrinsäure (Lipidsenker) in Berliner Oberflächengewässer die Forschungsaktivitäten intensiviert [28,29]. Die am häufigsten verschriebenen Wirkstoffe wie beispielsweise, Entzündungshemmer, Röntgenkontrastmittel sowie Psychotherapeutika [26,30], sind auch die meistvorkommenden Wirkstoffe in Oberflächengewässern [31]. Konzentrationen der Wirkstoffe liegen zwischen <0,1 bis >1,0 µg/L [30,32]. Ab welcher Konzentration jedoch ein negativer Effekt auf die Umwelt ausgeübt wird, ist bislang noch nicht ausreichend untersucht und gesetzlich nicht ver-

Reaktor	Rohrphotobioreaktor			Offener Wassertank IBC	Wassertank IBC mit Leuchtstofflampen
Typ und Material	Geschlossener Reaktor mit Plexiglasröhren			Offener Reaktor	Offener Reaktor mit Innenbeleuchtung
Reaktorvolumen	75–120 L			500 L	700 L
Durchmischung	Kreiselpumpe (16 m^3/h, 230 W)			Kreiselpumpe (9 m^3/h, 75 W)	Kreiselpumpe (7,8 m^3/h, 80 W)
Lichtquelle	Sonnenlicht				4 Leuchtstofflampen (30W x 4) mit Chlorophyllspektrum umhüllt von Plexiglasröhren
Algengattung	*Scenedesmus species*				
Abwasser	Zentrat aus den Schlammzentrifugen CSB 150–200 mgO_2/L TN_b 500–800 mgN/L N-NH_4 400–600 mgN/L $Phosphor_{ges}$ 20–50 mgP/L				
Versuchsart	**Batch Experiment (1)**	**Batch Experiment (2)**	**Kontinuierliche Experimente**	**Batch Experimente**	**Batch Experimente**
Behandelte Zentratmenge (L)	2,5	6	18,6 (8,1 + 0,7/d)	35–45	30–50
Versuchszeit (d)	3	12	17	17–40	30–70
Wassertemperatur (°C)		17	15	10–25	10–25
Stickstoffanfangskonzentration (mgN/L)		60	58	80–85	50, 70
Mikroalgenanfangskonzentration (mgTSS/L)		600	430	10–420	85, 200
Mikroalgen Wachstumsrate (mgTSS/L/d)	60		50-110	5,0–10,0	2,0–8,0
Stickstoffabbaurate (mgN/L/d)	7	14	10-25	1,0–5,0	0,2–2,0
Raumbelastung ($L_{Zentrat}/m^3_{Volumen}/d_{Versuchzeit}$) ($gN_{Zentrat}/m^3_{Volumen}/d_{Versuchzeit}$)	7 5,3	11 8,4	14,6 9,8	2–4 1,4–2,8	1–2 0,8–1,4
Schlammbelastung ($gN_{Zentrat}/kgTSS_{Algen}/d_{Versuchzeit}$) TSS_{Algen} mit der Anfangskonzentration der Mikroalgen	45,7	8,7	22,7	4,4–13,5	3,7–4,0

(T2) Randbedingungen und Ergebnisse der halbtechnischen Versuche.

ankert. Die Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR) hat gleichwohl 2013 in ihrem Memorandum festgelegt, dass Pharmaka je Einzelstoff lediglich zu 0,1 µg/L in die aquatische Umwelt überführt werden dürfen [33]. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien zur Erfassung von Umweltkonzentrationen von Arzneimitteln durchgeführt. Eine umfangreiche Studie zum Vorkommen von Arzneimitteln in der Umwelt wurde vom Bund/Länderausschuss für Chemikaliensicherheit (BLAC) in Deutschland von 2000 bis 2003 durchgeführt. Ein Überblick über die Auswirkungen der Substanzparameter, die in der vorliegenden Studie angewandt und in Nordrhein-Westfalen als umweltrelevant eingestuft wurden [25], können der Tabelle (1) entnommen werden.

Weitestgehend unerforscht sind die öko- und humantoxikologischen Konsequenzen von Mikroschadstoffen. Die im Trinkwasser nachgewiesenen Mengen an Mikroschadstoffen sind hundert bis Millionen Mal geringer als die maximalen zulässigen Rückstandsmengen in Nahrungsmitteln für den humanen Gebrauch und werden daher als unbedenklich eingestuft. Allerdings bringen die geringen Konzentrationen gewisse Gefahren für die aquatische Umwelt mit sich [35]. Ein sehr bekanntes Beispiel hierfür ist das in der Anti-Baby-Pille enthaltene Hormon 17-alpha-Ethinylöstradiol (EE2), das von der Frau unverändert ausgeschieden und durch ungenügende Reinigung auf der Kläranlage ins Gewässer überführt wird. Dieser Eintrag hat die Verweiblichung der männlichen Fische und der damit einhergehenden Populationsände-

rung beziehungsweise -einbruch zur Folge [32,36].

Bedingt durch die steigende Bevölkerungspopulation steigen die individuellen Lebenserwartung und der damit verknüpfende steigende Arzneimittelkonsum wird die Anzahl der Mikroschadstoffe, die über das kommunale Abwassernetz in die Umwelt eingebracht werden, ansteigen [28]. Da etwaige aquatische Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden können, besteht auch vor dem Hintergrund der EG-WRRL und der Zielwerte der IAWR für die Elimination der Spurenstoffe, großer Handlungsbedarf.

Technische Möglichkeiten zur Elimination von Spurenstoffen

Neben allgemeinen Handlungsstrategien wie beispielsweise fachgerechte Entsorgung der Bevölkerung nahe zu legen (durch Öffentlichkeitsarbeit) oder die Zulassungsbeschränkungen von Arzneiwirkstoffen auf Umweltrelevanz zu verstärken, sind weitereichende Reinigungsverfahren auf Kläranlagen unerlässlich, da diese als Haupteintragsquelle von Spurenstoffrückständen in die Umwelt gelten [37,38]. Konventionelle Kläranlagen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, eliminieren anorganische und organische Spurenstoffe aus den Abwässern auf unterschiedliche Weisen. Durch Sorption können Mikroschadstoffe an Partikeln des Klärschlammes und/oder im Fall organischer Stoffe durch biologischen Abbau aus den Abwässern entfernt beziehungsweise in andere Stoffe transformiert werden [25]. Das Spektrum der im Klärprozess zu eliminierenden Spurenstoffe umfasst eine große Anzahl von Verbindungen, die hinsichlich ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften unterschiedlich sind. Die jeweilige Spezifikation und Konzentrationen der Substanzen bestimmen die Elimination während des Klärprozesses [39].

Wie die Funde in Oberflächengewässern zeigen, können konventionelle Kläranlagen mit der derzeitigen Technik nicht alle Mikroschadstoffe vollständig aus dem Abwasser entfernen [25,40,41]. Aus diesem Grund erscheint im Sinne des Vorsorgeprinzips eine weitergehende Eliminierung dieser Stoffe folgerichtig. Diese sollte zweckmäßig als Nachbehandlungsschritt nach der biologischen Abwasserreinigung eingesetzt werden. Grundsätzlich kommen zur Elimination von Mikroverunreinigungen oxidative, adsorptive und physikalische Verfahren in Frage [42,43]. Jedoch unterscheiden sich die Eliminationsleistung, Betriebssicherheit, Wartungsaufwand, Kosten und sonstige Umweltwirkungen dieser Verfahren und müssen im Einzelfall vor Ort (über Machbarkeitsstudien) ermittelt und erörtert werden.

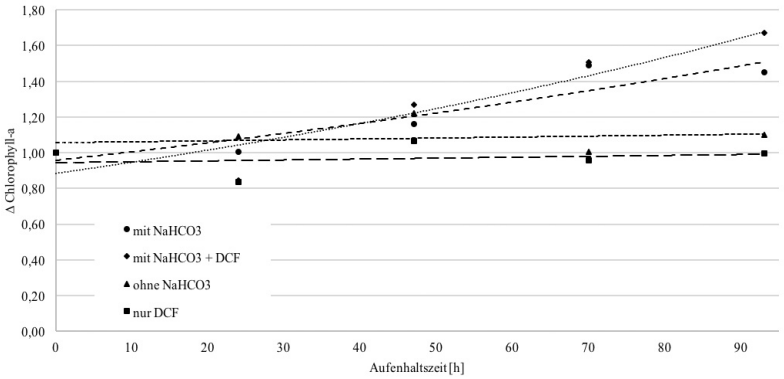
Grünalgen in der weiterführenden Abwasserreinigung

Eine vielversprechende Alternative zum aktuellen Stand der Technik ist der Einsatz von Mikroalgen in der weiterführenden Reinigungsstufe einer Kläranlage zur Eliminierung von organischen Schadstoffen [44,45]. Matamoros et al. [46] konnten in ihrer Laborstudie nachweisen, dass die Mikroalgen *Chlorella spezies* und *Scenedesmus spezies* Ibuprofen und Koffein zu 99 Prozent biologisch abbauen können. Carbamazepin und Tris(2-chlorethyl) phosphat dahingegen konnte nicht abgebaut werden. Escapa et al. [47] konnten in ihrer Studie zeigen, dass die Mikroalgen *Chlorella sorokiiana*, *Chlorella vulgaris* und *Scenedesmus obliquus* neben Phosphor und Stickstoff den Spurenstoffparameter Diclofenac abbauen können.

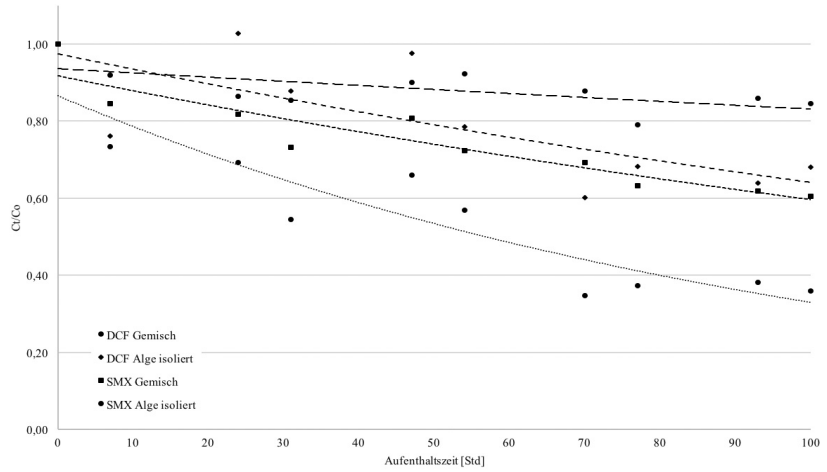
Vor dem Hintergrund des Austrags von Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser in die aquatische Umwelt ist eine umweltschonendere Alternative im Vergleich zum Stand der Technik wünschenswert. Aktueller Forschungsbestand ist das Anwendungspotential von Mikroalgen, hier insbesondere der Grünalge *Chlorella vulgaris*, in der Spurenstoffelimination als Alternative zum Stand der Technik erforscht werden. Hierzu wurden Wachstumsversuche zur Anreicherung von Mikroalgen im Kulturmedium (BG-11 Medium) mit dem Analgetikum Diclofenac (DCF, 500µg/L) mit und ohne leichter verfügbaren Kohlenstoffen (Natriumhydrogencarbonat) durchgeführt [48,49]. Hierfür wurden in 500mL Probenflaschen das Wachstumsverhalten der Mikroalge *Chlorella vulgaris* ermittelt. Die Beleuchtung erfolgte in einem 20:4 hell/dunkel Zyklus (fluoreszierenden Leuchtstoffröhren 50–80 µmol/m2/s). Ferner wurden die Proben kontinuierlich rotiert, um eine Biofilm- und Flockenbildung zu vermeiden. Die Ergebnisse (Abb. 4) zeigen, dass die Anwesenheit des pharmazeutischen Wirkstoffes keinen negativen Effekt auf die Alge aufzeigen. Im Gegenteil, in den Proben, in denen der Alge beide Kohlenstoffquellen zur Verfügung gestellt wurden, konnten höhere Wachstumsraten erzielt werden. Erhält die Grünalge ausschließlich den Wirkstoff Diclofenac als alleinige Kohlenstoffquelle im Kulturmedium, so kann ein stationäres Wachs-

Substanzgruppe	Wirkstoff	Umweltauswirkungen Organismus	Effekt
Analgetikum	Diclofenac	Regenbogenforellen	Schädigung der inneren Organe
Antiepileptikum	Carbamazepine	Karpfen	Missbildungen in der Leber & Erhöhung der Membranmaterialmenge im Zytoplasma
Antibiotika	Sulfatmethoxazol	Wirbellose	Wachstumsveränderungen

(T3) Schädliche Auswirkungen auf die Umwelt unterschiedlicher Pharmaka.
Quellen: Triebskorn et al., 2007 (Analgetikum, Antiepileptikum), LANUV, 2007 (Antibiotika)



(4) Ergebnisse des Wachstumsverhalten der Grünalge *Chlorella vulgaris* mittels der Chlorophyll-a Analyse.



(5) Ergebnisse der Eliminationsraten der Grünalge *Chlorella vulgaris*.

tumsverhalten beobachtet werden.

Neben der Wirkung des Analgetikums Diclofenac auf das Wachstumsverhalten der *Chlorella vulgaris*, wurde das Abbauverhalten von Diclofenac (500µg/L) und Sulfamethoxazol (100µg/L, Antibiotika) untersucht. Hierzu wurden die analytischen Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der instrumentalen analytischen Chemie mit der Flüssigkeitschromatographie in Kombination mit einem Massenspektrometer (Liquid chromatography-mass spectrometry = LC-MS) durchgeführt. Damit der Alge ein eindeutiger Abbau nachgewiesen werden kann, wurden Referenzproben ohne Alge im Parallelversuch analysiert.

Die Ergebnisse (Abb. 5) verdeutlichen, dass ein Abbau beider Wirkstoffe, trotz hoher Anfangskonzentrationen im Vergleich zum Oberflächengewässer, ermittelt werden konnte. Es bleibt anzumerken, dass mit „Gemisch" die Algenkultur *Chlorella vulgaris* mit angesiedelte Bakterien in der Probe gemeint ist. „Alge isoliert" veranschaulicht das Abbauverhalten, das der Alge allein zugeschrieben werden kann. Dies wurde an Hand der Referenzproben ermittelt, da das Verhältnis an Bakterien in den Proben untereinander ähnlich ist. Im DCF-Gemisch beträgt die Abbaurate rund 65 Prozent, davon wurden rund 32 Prozent von der Alge („isoliert") abgebaut. Beim Antibiotika SMX werden rund 40 Prozent im Gemisch und 15 Prozent von der Grünalge abgebaut. Da auf einer konventionellen Kläranlage auch Bakterien vorliegen, ist eine symbiotische Beziehung zwischen Alge und Bakterie bedeutsam.

Das Wissen um den Eintrag von Mikroschadstoffen und deren Wirkungen auf die aquatische Umwelt ist noch weitestgehend lückenhaft und daher besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Abtrennung von Mikroalgen aus einem bestehendem System

Bei einer verfahrenstechnischen Umsetzung sollte die Thematik der Abtrennung von Mikroalgen aus einem bestehenden System nicht unterschätzt werden. Aus diesem Grund wurden unter anderem Abtrennungsversuche mittels des Verfahrens der Mikroflotation durchgeführt [20]. Hierbei werden sehr kleine Luftblasen in das Algen-Wassergemisch eingeblasen. Die Algen haften an den Luftblasen und werden so an die Oberfläche transportiert. Hierzu wurden Versuche an der Universität Duisburg-Essen und an der Cranfield University in Großbritannien durchgeführt. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen pH-Werten (5, 7 und 9) und mit und ohne Verwendung eines Flockungsmittels (auf Aluminium basierend) durchgeführt. Ohne Flockungsmittel konnten bei einem pH-Wert von fünf 45 bis 55 Prozent der AFS abgetrennt werden. Mit Flockungsmittel (5–70 mgAl/L) konnten 70 bis 85 Prozent der AFS abgetrennt werden.

Des Weiteren wurden Flockulationsversuche mit unterschiedlichen Flockungsmitteln unter Einbezug des Jar-Tests (Sedimentationszeit hier von 120 Min.) untereinander und mit der Methode der Sedimentation und unter Anwendung einer Laborzentrifuge verglichen. Bei der Auswertung (Tab. 5) wurden die Parameter Algengattung, Algenkonzentration und pH-Wert konstant gehalten. Hier bleibt anzumerken, dass die Ergebnisse bei anderen Betriebsparametern variieren können.

Anlage	pH	Flokkulat (mg Al/L)	Abtrennung (%)	Trübung (%)
DAF Batch Test (Model DBT6)	5	25	72,5	81,9
Druck 4,5bar				
Scenedesmus species	7	40	78	90
Trübung 44,5 ± 5 NTU				
Biomasse 130 ± 10mgTSS/L	9	70	68,9	77,8
LAB-Float 20	5	4,5	89,7	7,3
Druck 3,0-2,5 bar				
Scenedesmus species	7	24	84,9	93,3
Trübung 98,4 ± 16 NTU				
Biomasse 120 ± 15mgTSS/L	9	12	85	74,7

(T4) Ergebnisse der Abtrennungsversuche unter Anwendung des Mikroflotationsverfahrens.

Allgemein verdeutlichen die Ergebnisse, dass ein Einsatz von Flockungsmitteln einen positiven Effekt auf die Sedimentationsleistung aufzeigt. Während das konventionelle Sedimentationsverfahren eine Abtrennungsleistung von rund 16 Prozent erzielt, können unter Anwendung von Flockungsmitteln Ergebnisse zwischen 19 und 93 Prozent je nach Dosierrate und Flockungsmittel erreicht werden. Dass die Flockulationseffizienz abhängig von der Dosierung des jeweiligen Flockungsmittels ist, konnten bereits Harun et al. [50] in deren Arbeit aufzeigen und konnte mit der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden. Ein Artefakt spiegelt das $FeSO_4$ wieder, da hier die Abtrennungsleistung bei einer Dosierrate von 500/1.000 mg/L wieder sinkt. Dieses Ergebnis kann mit einem möglichen Überschuss an Fe^{2+}-Ionen im Medium zusammenhängen, die einen Einfluss auf die Extinktionsmessung haben.

Die Laborzentrifuge konnte zwar eine sehr hohe Abtrennungseffizienz erreichen ohne zusätzliche Flockungsmittel, jedoch sind die Kosten in der verfahrenstechnischen Umsetzung zu hoch [50].

Ausblick

Die abgeschlossenen Untersuchungen im Fachbereich Biodiversität belegen eine parallele Evolution innerhalb der Goldalgen von pigmentierten, phototrophen Algen zu farblosen, heterotrophen Algen unter Aufgabe der Photosynthese. Zudem konnten ökologische Rahmenbedingungen für die Evolution von farblosen Algen aus phototrophen Arten und für die Koexistenz von Goldalgen mit verschiedenen Ernährungsweisen ermittelt werden. In künftigen Untersuchungen sollen ökologische Faktoren, die eine Differenzierung der Ernährungsweisen begünstigen, näher untersucht werden. Dies umfasst auch ein Verständnis der Ökologie und der Physiologie der Algen, insbesondere von Arten in verschiedenen Stadien der Reduktion.

Parallel zu den ökologischen, physiologischen und molekularen Untersuchungen an ausgewählten Algenarten werden wir die Verbreitungsmuster verschiedener Algengruppen in Abhängigkeit der Ernährungsweise analysieren. Die funktionelle Diversität von Algen, die funktionelle Redundanz verschiedener Arten und die Muster und Mechanismen der Verbreitung von Algenarten sind wichtige Rahmenparameter, um die Auswirkungen der Veränderung von Ökosystemen auf Biodiversität abschätzen zu können.

Bisherige Untersuchungen im Fachbereich der Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft konnten einen Nährstoffabbau mittels der Grünalge *Scenedesmus spezies* im Abwasser aufzeigen. Ferner konnte die Idee der Nutzung von Mikroalgen zur Elimination von Mikroverunreinigungen und insbesondere von Pharmazeutika voran getrieben werden. Die unterschiedlichen Versuche konnten aufzeigen, dass die Grünalge *Chlorella vulgaris* im Stande ist, die pharmazeutischen Wirkstoffe

Flockungsmittel		$Al_2(SO_4)_3$	$AlCl_3$	$FeSO_4$	$FeCl_2$	$Fe_2(SO_4)_3$	$FeCl_3$	Sedimentation	Zentrifugation
Algengattung		*Chlorella vulgaris*							
Algenkonzentration [mg/L]		~ 9,5							
pH		~ 7,5							
Dosierrate	**5**	18,90	29,92	57,88	20,79	19,24	19,89		
Flokkulat	**10**	22,71	32,08	61,64	25,46	23,31	22,02		
[mg/L]	**50**	30,81	41,34	75,72	39,24	40,91	29,11		
	100	33,37	47,36	77,03	39,72	43,78	31,50		
	500	56,81	92,48	62,41	65,42	66,51	76,53		
	1.000	69,05	93,14	54,18	72,39	76,66	87,13		
ohne Flockungsmittel								15,97	90,75

(T5) Ergebnisse der Versuche zur Abtrennung mittels Flockungsmittel bei einer Algenkonzentration von 9 mg/L der Grünalge *Chlorella vulgaris*.

Diclofenac und Sulfamethoxazol im Kulturmedium zu reduzieren und in Symbiose mit Bakterien höhere Abbauraten erzielen kann. In zukünftigen Untersuchungen sollen weitere Wirkstoffe im Einzelnen und als „Cocktail" untersucht werden. Ferner bleibt zu klären, ob andere Algenarten auch zur Elimination von Mikroverunreinigungen eingesetzt werden können und ob es Algenarten gibt, die dazu besser geeignet sind.

Da das Lichtdargebot für Algen eine wesentliche Rolle für das Wachstum spielt und für die Umsetzbarkeit in Deutschland nicht ausreichend Sonnenlicht, vor allem nicht im Winter, vorhanden ist, müssen Untersuchungen mit LEDs durchgeführt werden, welche kostengünstiger sind als die bisher eingesetzten Leuchtstoffröhren. Neben der Thematik des Lichtdargebots stellt der große Platzbedarf von Algenanlagen eine wesentliche Rolle. Da in Deutschland der Platzbedarf auf bereits bestehenden Kläranlagen nicht so groß ist, müssen Anlagen geplant, getestet und untersucht werden, die neben dem optimalen Lichtdargebot auch mit einem eingeschränkten Platzbedarf optimale Leistung erzielen.

Summary

Algae are responsible for approximately 50 % of global primary production. Algal production is thus essential for the global carbon cycle, ecosystem health and climate. The diversity of algae and the multitude of species provide a buffer for ecosystem functions in the face of changing environmental factors and climate change. Algae are, however, not a monophyletic group, but rather comprise many different organismal lineages which are not closely related to each other. The common characteristic of algae is that they are eukaryotic photosynthetic organisms with the exception of land plants. The capability for photosynthesis was gained independently in several lineages and even more frequently lost independently in different lineages. This article describes the diversity of algae, pattern of algal distribution and evolutionary scenarios triggering the differentiation of nutritional strategies, in particular the shift from phototrophic nutrition to heterotrophic nutrition. Specifically the availability of nutrients, light and inorganic carbon or of alternative carbon sources is key in triggering the multiple differentiation and specialization of nutritional modes in algae. Today, nutrients are usually removed biologically in waste water treatment facilities. The shortcoming of this practice, however, is the enormous energy consumption for aeration and the transformation of organically bound carbons into CO_2. A sustainable alternative to remove nutrients is the use of micro algae. Different methods for the removal of nutrients by *Scenedesmus species* on a laboratory scale are described in the present article. Moreover, larger-scale tests were carried out at an urban wastewater treatment plant. The results suggest that the microalgae are effective in the removal of nitrogen, especially in a tubular reactor design. Furthermore, this article describes the degradation of diclofenac and sulfamethoxazole by the green algae *Chlorella vulgaris* on a laboratory scale. The results show that the microalgae can significantly reduce the concentration of the pharmaceuticals. Within 100 hours a removal efficiency of diclofenac by 65 % and of the antibiotic sulfamethoxazole by 40 % in an algae-bacteria mixture was observed.

Referenzen

1) Boenigk, J. und Wodniok, S. (2014): Biodiversität und Erdgeschichte. Springer-Spektrum, Heidelberg. 402 p. ISBN 978-3-642-55388-2
2) Grossmann, L.; Jensen, M.; Heider, D.; Jost, S.; Glücksman, E.; Hartikainen, H.; Mahamdallie, S.; Gardner,M.; Hoffmann, D.; Bass, D.; Boenigk, J. (2016b): Protistan community analysis – key findings of a large scale molecular sampling. ISME J 10:2269–2279
3) Grossmann, L.; Jensen, M; Pandey, R.V.; Jost, S.; Bass, D.; Psenner, R.; Boenigk, J. (2016c): Molecular Investigation of Protistan Diversity Along an Elevation Transect of Alpine Lakes. Aquat Microb Ecol 78:25–37
4) Glaser, K.; Kuppardt, A.; Boenigk, J.; Harms, H.; Fetzer, I.; Chatzinotas, A. (2015): The influence of environmental factors on protistan microorganisms in grassland soils along a land-use gradient. Sci Total Environ 537:33–42
5) Grossmann, L.; Beisser, D.; Bock, C.; Chatzinotas, A.; Jensen, M.; Preisfeld, A.; Psenner, R.; Rahmann Wodniok, S.; Boenigk, J.; (2016a): Trade-off between taxon diversity and functional diversity in European lake ecosystems. Mol Ecol 25:5876-5888
6) Lange, A.; Jost, S.; Heider, D.; Bock, C.; Budeus, B.; Schilling, E.; Strittmatter, A.; Boenigk, J.; Hoffmann, D. (2015): AmpliconDuo: a split-sample filtering protocol for high-throughput amplicon sequencing of microbial communities. PLOS One 10:e014
7) Pandey, R.V.; Nolte, V.; Boenigk, J. & Schlötterer, C. 2011. CANGS DB: a stand-alone web-based database tool for processing, managing and analyzing 454 data in biodiversity studies. BMC Res Notes 4:227
8) Jost, S.; Medinger, R.; Boenigk, J. (2010): Cultivation independent species identification of Dinobryon sp. (Chrysophyceae) by means of multiplex single cell PCR (MSC-PCR). J Phycol 46:901–906
9) Auinger, B.M.; Pfandl, K.; Boenigk, J. (2008) Improved methodology for identification of protists and microalgae from plankton samples preserved in Lugol's iodine solution: Combining microscopic analysis with single-cell PCR. Appl Environ Microbiol 74:2505-2510
10) De Castro, F.; Gaedke, U.; Boenigk, J. (2009): Reverse evolution: driving forces behind the loss of acquired photosynthetic traits. PLOS One 4: e8465
11) Grossmann L, Bock C, Schweikert M, Boenigk J (2016d): Small but manifold – hidden diversity in 'Spumella-like flagellates'. J Euk Mic 63:419–3
12) Boenigk, J.; Arndt, H. (2002): Bacterivory by heterotrophic flagellates: community structure and feeding strategies. Antonie Van Leeuwenhoek 81:465–480
13) Boenigk, J.; Pfandl, K.; Hansen, P.; (2006): Exploring strategies for nanoflagellates living in a 'wet desert'. Aquat Microb Ecol 44:71–83
14) Pfandl, K.; Posch, T.; Boenigk, J. (2004): Unexpected effects of prey dimensions and morphologies on the size selective feeding by two bacterivorous flagellates (Ochromonas sp. and Spumella sp.). J Euk Microbiol 51:626–633
15) Wu, Q.L.L.; Boenigk, J.; Hahn, M.W. (2004) Successful predation of filamentous bacteria by a nanoflagellate challenges current models of flagellate bacterivory. Appl Environ Microbiol 70:332–339
16) Boenigk, J. (2005): Some remarks on strain specifity and general patterns in the ecology of Spumella (Chrysophyceae). Nova Hedwigia Beih 128:167–178
17) Boenigk, J.; Pfandl, K.; Stadler, P.; Chat-

Sarah Zydorczyk. Foto: Vladimir Unkovic

Thorsten Mietzel. Foto: Vladimir Unkovic

zinotas, A. (2005): High diversity of the "Spumella-like" flagellates: An investigation based on the SSU rRNA gene sequences of isolates from habitats located in six different geographic regions. Environ Microbiol 7:685–697
18) Beisser, D.; Graupner, N.; Bock, C.; Wodniok, S.; Grossmann, L.; Vos; M.; Sures, B.; Rahmann, S.; Boenigk, J. (2017): Comprehensive transcriptome analysis provides new insights into nutritional strategies and phylogenetic relationships of chrysophytes. PeerJ 5: e2832; doi: 10.7717/peerj.2832
19) Rottberger, J.; Gruber, A.; Boenigk, J.; Kroth, P.G. (2013): Influence of nutrients and light on autotrophic, mixotrophic and heterotrophic freshwater chrysophytes. Aquat Microb Ecol 71:179–191
20) Pozza, C. (2014): Nutrient removal in wastewater using microalgae, Universität Duisburg-Essen, Shaker Verlag ISBN 978-3-8440-2754-9
21) Metclaf and Eddy (2003): Wastewater engineering: treatment, reuse and disposal, McGraw-Hill, New York
22) Beisser, D.; Kaschani, F.; Graupner, N.; Gossmann, L.; Jensen, M.; Ninck, S.; Schulz, F.; Rahmann, S.; Boenigk, J.; Kaiser, M. (2017): Quantitative proteomics reveals ecophysiological effects of light and silver stress on the mixotrophic protist Poterioochromonas malhamensis. PLOS One 12: e0168183. doi:10.1371/journal.pone.0168183
23) Boenigk, J.; Beisser, D.; Zimmermann, S.; Bock, C.; Jakobi, J.; Grabner, D.; Großmann, L.; Rahmann, S.; Barcikowski, S.; Sures, B. (2014): Effects of Silver Nitrate and Silver Nanoparticles on a Planktonic Community: General Trends after Short-Term Exposure. PLOS One: e95340
24) Berthold, G.; Seel, P.; Rückert, H.; Toussaint, B.; Ternes, T. (1998): Beeinflussung des Grundwassers durcharzneimittelbelastete oberirdische Gewässer. In: Arzneimittel in Gewässern (Fachtagung im Landesmuseum Wiesbaden, 4. Juni 1998). Hessische Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden
25) LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2007): Eintrag von Arzneimitteln und deren Verhalten und Verbleib in der Umwelt- Literaturstudie, Fachbericht 2
26) UBA (Umweltbundesamt) (2014): Arzneimittel in der Umwelt: Eintrag und Vorkommen; URL: http://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/arzneimittel/arzneimittel-umwelt (15.08.2017)
27) Bergmann, A.; Fohrmann, R.; Hembrock-Heger, A. (2008): Bewertung der Umweltrelevanz von Arzneistoffen, Umweltwissenschaften Schadstoff-Forschung, 20:197-208, DOI 10.1007/s 12302-008-0005-5
28) SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2007): Arzneimittel in der Umwelt - Stellungnahme, 2, ISSN 1612-2968
29) Stan, H.J.; Heberer, T.; Linkerhägner, M. (1994): Vorkommen von Clofibrinsäure im aquatischen System – führt die therapeutische Anwendung zu einer Belastung von Oberflächen-, Grund-und Trinkwasser, Vom Wasser, 83: 57–68
30) UBA (Umweltbundesamt) (2014): Arzneimittel der Umwelt – vermeiden, reduzieren, überwachen
31) UBA (Umweltbundesamt) (2014): Belastung der Umwelt durch Schadstoffe
32) BLAC (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Chemikaliensicherheit) (2003): Arzneimittel in der Umwelt – Auswertung der Untersuchungsergebnisse, Hamburg
33) IAWR (Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet) (2113): Europäisches Fließgewässermemorandum zur qualitativen Sicherung der Trinkwassergewinnung
34) Triebskorn, R.; Casper, H.; Scheil, V.; Schwaiger, J. (2007): Ultrastructual effects of pharmaceuticals (carbamazepine, dofibric acid, metoprolol, diclofenac) in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) and common carp (Cyprinus carpio), DOI: 10.1007/s00216-006-1033-x, Analytical and Bioanalytical Chemistry, Vol. 387: 1405–1416
35) Rönnefahrt, I.; Koschorreck, J.; Kolossa-Gehring, M. (2002): Arzneimittel in der Umwelt, Mitteilsungsblatt der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikoligie, 8. Jahrgang Nr. 4, Berlin
36) Kern, K. (2004): Umweltauswirkungen von Arzneimitteln- Bestandsaufnahme und Reformbedarf, UFZ-Diskussionspapiere, Leipzig
37) Heberer, T. (2002): Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment, Toxicology Letters, 10, S.131(1–2):5–17
38) Spengler, P.; Kröner, W.; Metzger, J.W. (1999): Schwer abbaubare Substanzen mit östrogenartiger Wirkung, Vom Wasser
39) Metzger, J.W.; Kuch, B.; Schneider, C. (2003): Pharmaka und Hormone in der aquatischen Umwelt, Teilbericht. Institut Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart
40) UBA (Umweltbundesamt) (2014): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer, ISSN 1862–4804
41) LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2011): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen
42) Biebersdorf, N.; Kaub, J. M. (2013): Kläranlage Ochtrup – 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen, Bochum
43) Mikroschadstoffe NRW, URL: http://www.masterplan-wasser.nrw.de/ (15.08.217)
44) Munoz, P.; Guieysse, B. (2006): Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review, Water Research, 40: 2799–2815
45) Subashchandrabose, S.R.; Ramakrishna, B.; Megharaj, M.; Venkateswarlu, K.; Naidu, R. (2013): Environment International, 51: 59–72
46) Matamoros, V.; Uggettib, E.; Garcíab, J.; Bayonaa, J. M. (2016): Assessment of the mechanisms involved in the removal of emerging contaminants by microalgae from wastewater: a laboratory scale study, Journal of Hazardous Materials Volume Vol. 301: 197–205
47) Escapa, C.; Coimbra, R.N., Paniagua, S.; García, A.I.; Otero, M. (2016): Comparative assessment of diclofenac removal from water by differnet microalgae strains. Algal Research 18, 127-134
48) Zydorczyk, S.; Schmuck, S.; Kerpen, K., Mietzel, T. (2017): Removal of diclofenac by Chlorella vulgaris. IWA World Water Congress & Exhibition 2016, Brisbane, Australia, 09.10–14.10.2016
49) Zydorczyk, S.; Schmuck, S.; Kerpen, K., Telgheder,U; Mietzel, T.: Degradation of the anti-inflammatory drug "diclofenac" by Chlorella vulgaris, poster, 1st IWA Confernece on Algal Technologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery, Delft, Netherland, 16.03–17.03.2017
50) Harun, R.; Singh, M.; Forde, G.M.; Danquah, M. K. (2010): Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 1037–1047

*Die Autor*innen*

Jens Boenigk studierte an der Universität zu Köln Biologie und Geologie/Paläontologie und promovierte 2000 über Räuber-Beute-Interaktionen und Nahrungsselektion im mikrobiellen Nahrungsnetz. Nach einem Aufenthalt am Natural History Museum in London im Rahmen eines Marie-Curie-Stipendiums leitete er am Institut für Limnologie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Mondsee, Österreich, die Arbeitsgruppe „Ökologie der Flagellaten". Er habilitierte 2005 an der Universität Innsbruck. Seit seinem Ruf an die Universität Duisburg-Essen im Jahr 2010 leitet er an der Fakultät für Biologie die Abteilung Biodiversität. Seit 2016 ist er Dekan der Fakultät für Biologie.

Nach ihrer Ausbildung zur Bauzeichnerin studierte **Sarah Zydorczyk** von 2009 bis 2014 Bauingenieurwesen an der Universität Duisburg-Essen. Ihre Bachelorarbeit zum Thema „Untersuchung des Entlastungspotentials von Abwasserkanälen durch den Einsatz „intelligent" gesteuerter dezentraler Regewasserspeicher" wurde dafür mit dem DWA-Preis „Industriepreis Automation in der Abwasserwirtschaft 2013" ausgezeichnet. Seit ihrem Masterabschluss promoviert sie am Fachgebiet Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft mit dem Forschungsschwerpunkt der Spurenstoffelimination mit Hilfe von Algen, wobei sie eng mit Mitarbeiter*innen der Lehrstühle für Analytische Chemie und Allgemeine Botanik für algenspezifische Fragestellungen zusammenarbeitet.

Thorsten Mietzel studierte von 1995 bis 2001 Bauwissenschaften an der Universität Essen. Von 2001 bis 2009 war er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft an der Universität Duisburg-Essen. 2007 promovierte er zum Thema „Ein neues Verfahren zur Bewertung von Maßnahmen zur Niederschlagswasserbehandlung". Seit 2009 ist er akademischer Rat/Oberrat am Lehrstuhl für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft.

Elke Dopp. Foto: Vladimir Unković

Moderne Kläranlagen reinigen Abwasser effizient von leicht abbaubaren organischen Stoffen und Nährstoffen. Sie sind aber nicht für die Eliminierung von Mikroschadstoffen konzipiert, so dass viele dieser Stoffe im Abwasser kaum abgebaut werden und somit über die Vorflut in Oberflächengewässer gelangen. Dieser Artikel geht unter anderem der Frage nach, wie überhaupt Auswirkungen von Gemischen unzähliger Verbindungen im niedrigen Konzentrationsbereich auf Organismen messbar sind.

Mikroschadstoffe aus Abwasser entfernen

Wie messe ich den Erfolg?

Von Torsten C. Schmidt, Bernd Sures, Elke Dopp und Jochen Türk

Hintergrund

In den letzten Jahrzehnten wurde zunehmend realisiert, dass organische Verbindungen, die zum Beispiel als pharmazeutische Wirkstoffe, Industriechemikalien oder in Körperpflegemitteln verwendet werden, auch in unseren Gewässern zu finden sind – wenn auch zumeist in niedrigen Konzentrationen. Dazu trug auch eine immense Weiterentwicklung der instrumentellen Analytik bei, die früher unerreichbar niedrige Konzentrationen mittlerweile erfassen kann. Aufgrund der niedrigen Konzentrationen der meisten dieser Stoffe spricht man oft von „Spurenstoffen“ oder „Mikroschadstoffen“. Obwohl bezüglich der Wirkung dieser Spurenstoffe auf die aquatische Umwelt noch vieles unbekannt ist, gibt es doch einige Indizien, die eine Wirkung auf Organismen belegen. So haben Kidd et al. in einem langfristigen Freilandexperiment gezeigt, dass die gesamte Fischpopulation eines Sees bei einer regelmäßigen Dosierung von 5 ng/L des hormonell wirksamen Östrogens 17β-Estradiol (E2) zusammenbrechen kann [1]. Als eine der Hauptquellen für Mikroschadstoffe wurden die Abläufe von Kläranlagen identifiziert. Moderne Kläranlagen reinigen Abwasser effizient von leicht abbaubaren organischen Stoffen und Nährstoffen. Sie sind aber nicht für die Eliminierung von Mikroschadstoffen konzipiert, so dass viele dieser Stoffe im Abwasser kaum abgebaut werden und somit über die Vorflut in Oberflächengewässer gelangen. Vor allem im dichtbesiedelten Mitteleuropa

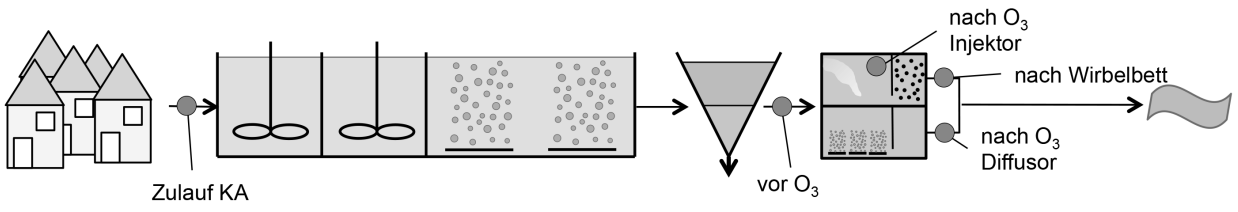
gibt es daher seit einigen Jahren Bestrebungen, Kläranlagen mit einer zusätzlichen Behandlungsstufe zur Spurenstoffelimination (sogenannte vierte Reinigungsstufe) auszustatten. Als technische Lösungen haben sich dabei die Ozonung oder die Sorption an Aktivkohle, entweder in großen Filtern oder als Pulveraktivkohle, durchgesetzt. Bei Einsatz von Ozon zur weitergehenden Abwasserbehandlung ist neben der Eliminationsleistung für die genannten Stoffe auch die Bildung von Transformationsprodukten von Bedeutung, denn eine vollständige Mineralisierung zu Kohlendioxid und Wasser ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Ob diese Transformationsprodukte nun ihrerseits eine mögliche schädliche Wirkung auf aquatische Ökosysteme haben, ist bisher kaum untersucht. In Einzelfällen werden höhere oder zumindest vergleichbare Toxizitäten wie für die Ausgangsstoffe berichtet [2], auch wenn die meisten Studien bisher zum Schluss kommen, dass dies Ausnahmen sind, aber nicht die Regel ist. Dennoch muss dieser Punkt weiter untersucht werden, um sicherzustellen, dass bei einem großflächigen Einsatz der Ozonung von Abwasser das gewünschte Ziel einer Reduktion von negativen Effekten auf aquatische Lebewesen auch wirklich erreicht wird. Aber wie messen wir überhaupt Auswirkungen von Gemischen unzähliger Verbindungen im niedrigen Konzentrationsbereich auf Organismen? Können wir aus Einzelsubstanzuntersuchungen auf den Effekt von Mischungen schließen? Und wenn wir Effekte finden: können wir schließen, auf welche Substanzen diese Effekte zurückzuführen sind? Welche Rolle spielen Abwasserbestandteile bei der Ozonung und können wir Laborversuche ohne weiteres auf großtechnische Anlagen übertragen? Im Rahmen des Fortschrittskollegs FUTURE WATER (siehe Beitrag von Simon Kresmann und Torsten C. Schmidt) und in weiteren Projekten untersuchen wir diese Fragestellungen. Dabei bedarf es der kombinierten Expertise von analytischen Chemiker*innen, Verfahrenstechniker*innen, Toxikolog*innen und Ökolog*innen, die sich an den beteiligten Institutionen Universität Duisburg-Essen, IWW Zentrum Wasser und Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) findet.

Verfahrenstechnik zur weitergehenden Spurenstoffelimination (sog. 4. Reinigungsstufe)

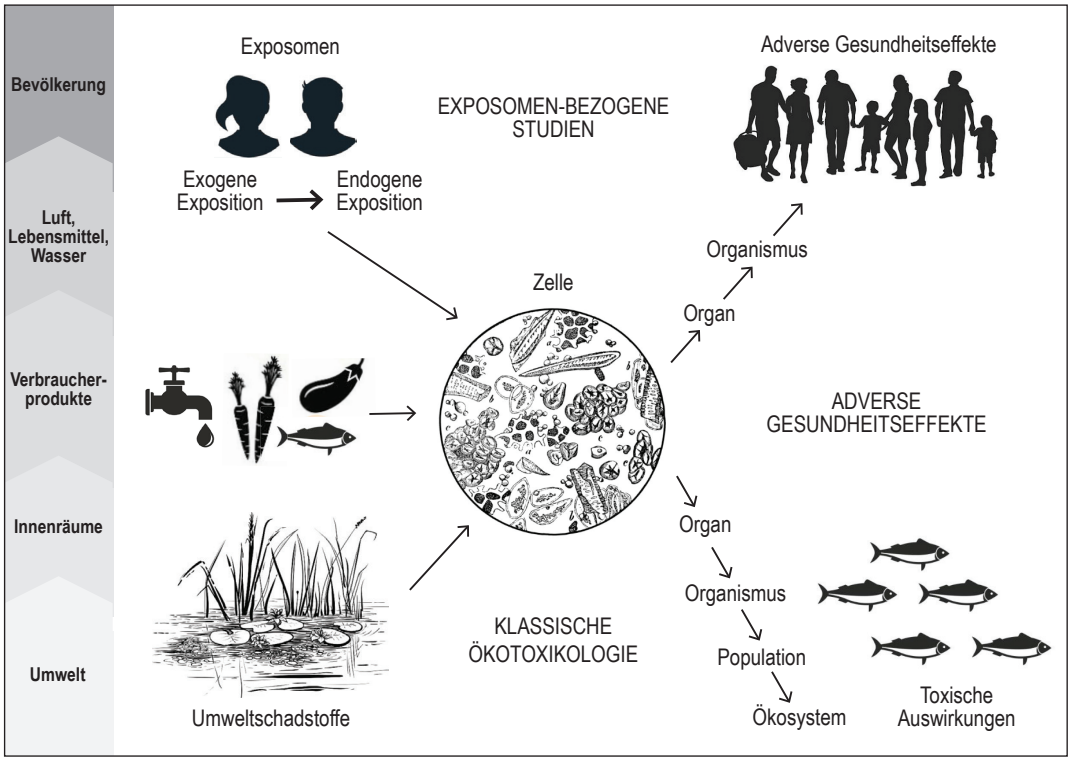
In Abbildung (1) ist beispielhaft der schematische Aufbau der Kläranlage in Duisburg-Vierlinden mit einer integrierten Ozonstufe gezeigt, die in vielen unserer Untersuchungen genutzt wurde. Markiert sind dort Entnahmepunkte für das Abwasser nach verschiedenen Behandlungsstufen. An diesen Stellen wird nicht nur Abwasser für chemische Analysen und Wirktests (siehe weiter unten) entnommen, sondern es werden auch Untersuchungen chemischer Prozesse bei der Ozonung vorgenommen, da nur bedingt auf Ergebnisse von gut definierten Laboruntersuchungen mit Reinstwasser zurückgegriffen werden kann. Dies liegt am hohen Gehalt an Ionen und organischem Material (der Matrix), die den Spurenstoffabbau beeinflussen. Die Matrix beeinflusst sowohl die Geschwindigkeit der Umsetzung in einem nachgeschalteten Reaktor als auch die Bildung von Transformationsprodukten. Außerdem gibt es unkritische Matrixbestandteile, die bei der Ozonung zu toxischen Stoffen umgewandelt werden können. Das wichtigste Beispiel hierfür ist die Oxidation von Bromid zu Bromat, einem potentiell kanzerogenen Stoff, für dessen Konzentration im Trinkwasser ein Grenzwert von maximal 10 µg/L gilt. Die Bromatbildung hängt von den anderen Matrixbestandteilen ab und kann im Trinkwasser ganz anders verlaufen als im Abwasser. Um ein besseres Verständnis der Abhängigkeit der Ozonung von der Matrix zu gewinnen, setzen wir daher gezielt Matrixbestandteile in Laboruntersuchungen zu und untersuchen die genannten Prozesse. Im Anschluss vergleichen wir diese Ergebnisse mit Untersuchungen an der realen Kläranlage.

Instrumentelle Analytik

Bei der instrumentellen Analytik wird im Wesentlichen zwischen der Target- und Non-Target-Analytik unterschieden. Bei der Target-Analytik existiert eine feste Liste an Substanzen, die in einer Probe nachgewiesen und deren Konzentration bestimmt werden sollen. Hierzu



(1) Schema der kommunalen Kläranlage Duisburg-Vierlinden mit konventioneller biologischer Behandlungsstufe und Nachklärung sowie weitergehender Spurenstoffelimination mittels Ozonung. Der Ozoneintrag erfolgt in Straße 1 über Diffusoren und in Straße 2 über ein Pumpe-Injektor-System. Straße 2 ist zusätzlich mit einem Wirbelbettreaktor zur biologischen Nachbehandlung ausgestattet. An den mit Punkten dargestellten Positionen sind Entnahmestellen für die chemische und wirkungsbezogene Analytik.
Quelle: eigene Darstellung



(2) Expositionswege von Chemikalien-/Substanz-Mischungen über die Umwelt und die Nahrungskette zum Menschen. Jede Art von exogener Belastung beeinflusst die endogene Exposition und beides zusammen bewirkt eine Beeinflussung des zellulären toxikologischen Wirkmechanismus. Das zelluläre Level kann als Integrator dienen, um beide Wirkmechanismen – sowohl die adversen Gesundheitsbeeinflussungen als auch die Effekte auf das Ökosystem zu verstehen [4].
Quelle: eigene Darstellung

werden Referenzstandards verwendet, mit denen zunächst die spezifischen massenspektrometrischen und chromatografischen Messparameter optimiert werden. Der Trend zur Bestimmung immer umfangreicherer Stoffgemische in einer Messung führt allerdings dazu, dass die Optimierung nicht für alle Substanzen möglich ist und in der Regel nur Substanzen mit ähnlichen Polaritäten gemeinsam gemessen werden können. Dieses analytische Fenster kann nur durch die Anwendung vieler unterschiedlicher Messmethoden erweitert werden.

Im Gegensatz zur Target-Analytik, die im Wesentlichen auf die Quantifizierung der in einer Probe zu bestimmenden Substanzen abzielt, erfolgt bei der Non-Target-Analytik die Messung ohne Referenzstandards. Aus den mittels hochaufgelöster Massenspektrometrie gemessenen Daten kann die Summenformel unbekannter Substanzen und derer Fragmente berechnet werden. Zusammen mit dem Isotopenverhältnis, Massenspektren und Retentionsdaten können Vergleiche mit in Datenbanken bereits vorhandenen Informationen zur Aufklärung der Substanzidentität genutzt werden. Ohne weitergehende Informationen ist die Aufklärung von gänzlich unbekannten Substanzen und die Zuordnung einer Summenformel zu einer Strukturformel als extrem anspruchsvoll zu bewerten. Die scheinbare umfassende Messung einer Probe mit vielen Tausend Signalen in einem Lauf ist hier allerdings ebenso wie die Target-Analytik auf ein durch die Probenvorbereitung und chromatographische Trennung eingeschränktes analytisches Fenster begrenzt. Durch den Einsatz zweidimensionaler Chromatographie kann dieses analytische Fenster erweitert werden [3].

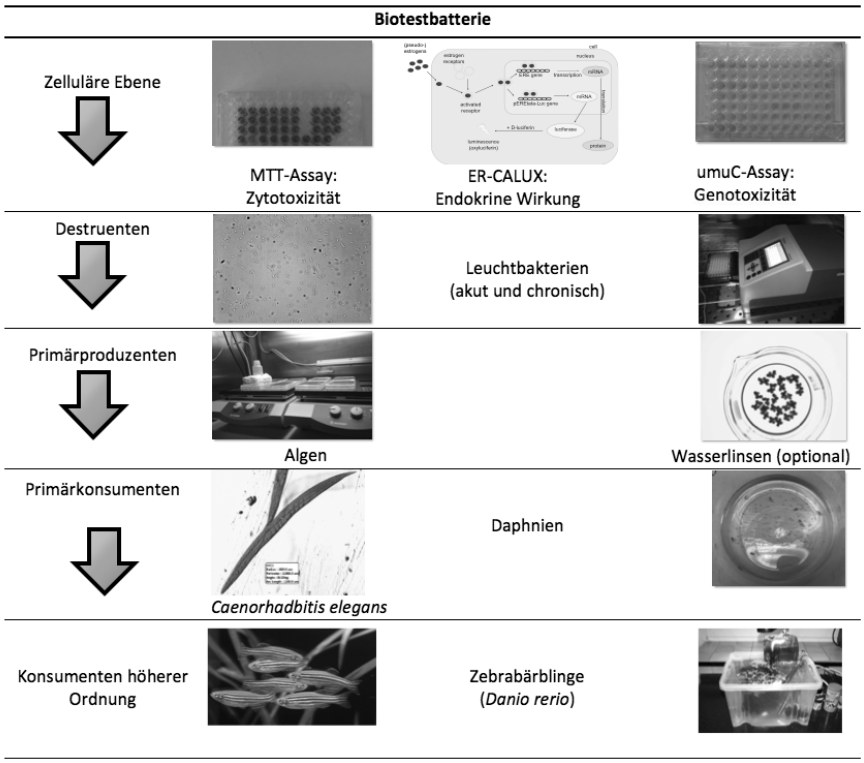
Im Bereich der oxidativen Abwasserbehandlung erfolgen daher zunächst mechanistische Untersuchungen mit Einzelverbindungen zur Ermittlung der Eliminierungsmöglichkeit und Bildung von Transformationsprodukten. Eine Bewertung der Wirkung dieser Transformationsprodukte ist allerdings so nicht möglich. Hierfür ist die Kombination mit der wirkungsbezogenen Analytik mit Bioassays erforderlich.

Bioassays

Neben dem chemischen Nachweis von Spurenstoffen ist deren Wirkung auf biologische Systeme relevant. Hieraus leitet sich eine zusätzliche Möglichkeit der Indikation von Spurenstoffen ab, indem die Wirkung einer gesamten Probe auf biologische Antworten untersucht werden kann. Die Vielzahl an Expositionswegen und biologischen Antworten ist in Abbildung (2) im Überblick dargestellt.

Durch den Einsatz einer Biotestbatterie (Kombination verschiedener biologischer Testsysteme) als Monitoringinstrument ergibt sich in Kombination mit der chemischen Analytik die Möglichkeit einer ganzheitlichen Betrachtung der Wasserqualität, analog zu einem Summenparameter. Es können akute und chronische Effekte durch verschiedene Testsysteme erfasst werden (Abb. 3).

Die in Abbildung (3) gezeigte Kombination von Wirktests wurde in eigenen Untersuchungen des öko- und humantoxikologischen Potentials von Kläranlagenabläufen hinsichtlich verschiedener Endpunkte sowohl *in-vivo* als auch



(3) Exemplarische Kombination von Biotests zum Nachweis von Effekten auf verschiedenen Ebenen.
Quelle: eigene Darstellung

in-vitro (Destruenten, Primärproduzenten, Primärkonsumenten und zelluläre Ebene) genutzt. Die Auswahl an biologischen Testverfahren (Bioassays) für die Bewertung der Wasserqualität ist variabel und entsprechend der Anwendungen und Zielsetzungen zu gestalten. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwischen *in-vitro*-Tests („Zelluläre Systeme im Reagenzglas“) und *in-vivo*-Tests (Verwendung von ganzen Organismen), die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden. Eine Kombination von *in-vitro*- und *in-vivo*-Verfahren ist zu empfehlen, da die zellbasierten Tests alleine nicht alle relevanten Wirkmechanismen abdecken können. Organismentests komplettieren daher in Biotestbatterien mögliche Wirkmechanismen auf breiterer Ebene.

In-vitro-Tests

In-vitro-Studien erlauben die Erforschung mechanistischer und physiologischer Zusammenhänge zwischen Mikroschadstoffen und ihrer biologischen Wirksamkeit. Bei ihrer Anwendung muss beachtet werden, dass bestimmte Testverfahren auf einen spezifischen Endpunkt ausgerichtet sind. Ähnlich wie bei der instrumentellen Analytik ist für die Bewertung des Erfolgs von oxidativen Verfahren häufig ebenfalls eine Anreicherung der Proben notwendig. Hierdurch wird das analytische Fenster auf die anreicherbaren Substanzen eingeschränkt. Die Bedeutung dieses Probenvorbereitungsschritts für die nachfolgenden Wirktests untersuchen wir derzeit in verschiedenen Projekten.

Von besonderer Bedeutung für die Bewertung von Abwasser ist dessen hormonelle (endokrine) Wirksamkeit, da die entsprechenden Effekte in Ökosystemen bereits in extrem niedrigen Konzentrationen relevant sein können [1]. Eine Verringerung der endokrinen Aktivität gereinigter Abwässer durch Ozonung und Aktivkohlebehandlung konnten unter anderem Stalter et al. [5] in Abwasserproben aus Kläranlagen nachweisen. Die Ozonung stellt hierbei eine sehr effiziente Methode zur Entfernung von Spurenstoffen dar.

Zum Monitoring von endokrinen Effekten auf zellulärer Ebene können statt der oben erwähnten Humanzellen (ER-Calux-Testsystem) auch Hefezellen eingesetzt werden. Diese sind robuster, einfacher in der Anwendung und geben ebenfalls Aufschluss über eventuelle endokrine Effekte von Substanzgemischen. Der Messwert wird dabei auf eine Äquivalentkonzentration von 17β-Estradiol bezogen. Auf diese Weise können auch noch nicht identifizierte EDCs (endocrine disrupting compounds) erfasst werden.

Abbildung (4) zeigt die östrogene (links) und die androgene Aktivität (rechts) an den verschiedenen Probenahmestellen im Verlauf der Abwasserbehandlung. Dabei wird das Ergebnis jeweils auf eine Referenzsubstanz bezogen, mit der die Aktivität einer Probe verglichen wird. Die Ergebnisse für die östro-gene Aktivität werden dabei in 17β-Estradiol Äquivalenten (EEQ) und die androgene Aktivität in 5α-Dihydrotestosteron Äquivalenten (DHTEQ) angegeben. Die Ergebnisse zeigen eine höhere Äquiva-lentkonzentration an androgener Aktivität als östrogene Aktivität. Dies entspricht den 10 bis 100fach höheren Ausscheidungsmengen von Androgenen, die dann auch in entsprechend höheren Konzent-rationen in der Kläranlage zu erwarten sind. Sowohl die östrogene als auch die androgene Aktivität wird während des herkömmlichen Klärprozesses nicht vollständig entfernt. Durch den Einsatz der zusätzlichen Ozonung und dem anschließenden Wirbelbett konnten beide Aktivitäten weiter reduziert werden. Die Konzentrationen nach dem Wirbelbett lagen bei 0,21 ng EEQ/L und 1,29 ng DHTEQ/L.

Weitere wichtige Endpunkte, die in *in-vitro*-Tests bestimmt werden, sind die Genotoxizität und Mu-tage-

nität von Proben (siehe Abb. 3). Am Beispiel der Ozonung mit nachgeschalteter biologischer Behandlung an der Kläranlage Duisburg-Vierlinden wurde ein effektdirigierter Ansatz aus der Kombination von instrumenteller Analytik, der *in-vitro* Bestimmung von östrogenen, androgenen, genotoxischen und mutagenen Effekten sowie der *in-vivo*-Bestimmung der Algenhemmung mittels *Desmodesmus subspicatus* erfolgreich zur Demonstration der guten Reinigungsleistung eingesetzt [6].

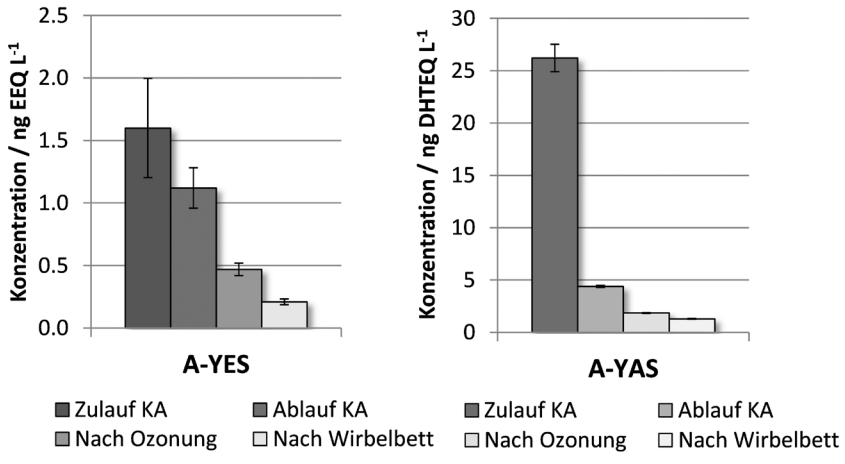
In-vivo-Tests

Im Rahmen von *in-vivo*-Experimenten werden Wirkungsuntersuchungen von Schadstoffen auf organismischer Ebene durchgeführt. Somit stellen diese Studien eine Weiterführung der aus den *in-vitro*-Untersuchungen gewonnen Erkenntnisse dar. Das zentrale Anliegen von *in-vivo*-Studien besteht in dem Nachweis möglicher schädlicher Wirkungen von Substanzen auf ökosystemarer Ebene, indem typische Vertreter von Nahrungsnetzen als Testorganismen Verwendung finden. Arten, die zu verschiedenen trophischen Stufen gehören, können individuell eingesetzt werden oder im Rahmen künstlicher oder natürlich zusammengesetzter Biozönosen (Mikrokosmen, Mesokosmen). Daneben umfassen *in-vivo*-Tests generell auch Tiere, allen voran Säugetiere wie Mäuse und Ratten, die für den Erkenntnisgewinn im Hinblick auf mögliche Schädigungen des Menschen eingesetzt werden.

Auch für Untersuchungen auf organismischer Ebene werden Studien an Zellen durchgeführt, zum Beispiel mit Leuchtbakterien und Algen (vgl. Abb. 3). Hiermit lassen sich Aussagen zu möglichen Effekten auf Ebene der Destruenten beziehungsweise der Primärproduzenten generieren. Beispielsweise deutet ein gestörtes Algenwachstum auf eine Störung des Photosynthesesystems hin [7], was innerhalb von Nahrungsnetzen weitreichende Konsequenzen haben kann. Für die Ebene der Konsumenten werden mehrzellige Tierarten wie Wasserflöhe (*Daphnia magna*), Fadenwürmer (*Caenorhabditis elegans*) und Fische (*Danio rerio*) eingesetzt. Hierbei berücksichtigen die Untersuchungen jeweils unterschiedliche Zielgrößen, zum Beispiel die Mortalität, Entwicklungsstörungen, Veränderungen der Reproduktivität oder des Verhaltens. Die jeweiligen Testverfahren sind im Rahmen von standardisierten Vorschriften normiert, so dass die Ergebnisse von Wirkuntersuchungen übertragbar sind. Da es sich bei den genannten Organismen um aquatische Arten handelt, ist ihr Einsatz im Rahmen von Überprüfungen zur Wirksamkeit der vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen naheliegend und vergleichsweise einfach durchführbar. Neben diesen Untersuchungsansätzen mit einzelnen Organismenarten sind zudem Erkenntnisse über die Auswirkungen von Mikroschadstoffen auf die in Ökosystemen vorkommenden Lebensgemeinschaften relevant. Hierzu liegen erste Ergebnisse vor, die im Rahmen größerer Verbundprojekte generiert wurden. Die bislang erhobenen Felddaten zeigen, dass Mikroschadstoffe Auswirkungen auf Fließgewässerorganismen haben können, zum Beispiel hinsichtlich der Hemmung der Photosynthese und physiologischer Parameter der untersuchten Organismen. Diese ersten Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit von Wirkungsuntersuchungen auf organismischer und biozönotischer Ebene.

Ausblick

Die erweiterte Abwasserreinigung ermöglicht eine Reduzierung von Mikroschadstoffeinträgen und trägt somit zum Schutz unserer wertvollen Wasserressourcen bei. Zur Erreichung eines guten chemischen und biologischen Zustandes unserer Gewässer ist dieser Punktquellenansatz ein wichtiger Baustein. Die Untersuchungen unterschiedlicher Kläranlagen, die mit einer erweiterten Abwasserreinigung zur Spurenstoffreduzierung ausgestattet wurden, zeigen aber auch, dass nicht alle Substanzen und Effekte durch diese eliminiert werden können. Zudem sind weitergehende Maßnahmen wie beispielsweise die Reduzierung von diffusen Stoffeinträge als auch gewässermorphologische Maßnahmen notwendig. Eine Herausforderung – auch für zukünftige Projekte – stellt die Bewertung und Erfassung der Mischungstoxizität dar. Einzelne Stoffe haben eine



(4) Erfassung östrogener und androgener Effekte von Abwasserproben vor und nach der Ozonung in der Kläranlage mit dem Hefe-Assay (A-YES bzw. A-YAS).
Quelle: eigene Darstellung

spezifische Toxizität, die jedoch in Mischung mit anderen Stoffen verändert sein kann. Dazu werden neue Technologien benötigt, die bisher nur in wenigen Fällen zur Untersuchung von Umweltwirkungen zum Einsatz gekommen sind (Proteomics, Metabolomics, Transcriptomics). Auch bei der Anwendung von Mischtoxizitätsmodellen besteht noch großer Handlungsbedarf [8,9]. Zur Bewertung aller Maßnahmen und der Erreichung der Ziele der EU Wasserrahmenrichtlinie stellt die am ZWU etablierte inter- und transdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen sowie Wissenschaft und Anwendung einen wesentlichen Baustein dar.

Summary

Surface waters can contain a diverse range of organic pollutants, including pesticides, pharmaceuticals and industrial compounds. Effluents from wastewater treatment plants (WWTPs) are known to be point sources of micropollutants for surface waters and are currently under scrutiny for retrofitting with advanced treatment options including ozonation. While bioassays have been used for water quality monitoring, there is still limited knowledge regarding the specific contributions of individual micropollutants to overall observed effects. This is particularly true for ozonation due to the possible formation of transformation and oxidation by-products. To further investigate the use of effect-based methods, a combination of state-of-the-art chemical analysis, *in-vivo* and *in-vitro* assays are established at the University of Duisburg-Essen and its affiliated institutes IUTA and IWW. As an example, the effectiveness of a full-scale ozone treatment in combination with a fluidized moving-bed reactor as biological post-treatment for the reduction of many micropollutants without the release of relevant toxic transformation products has been assessed by such a chemical and toxicity-based approach.

Literatur

1) K. A. Kidd, P. J. Blanchfield, K. H. Mills, V. P. Palace, R. E. Evans, J. M. Lazorchak, R. W. Flick (2007) Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. PNAS 104, 8897–8901.
2) X. Chen, J. Richard, Y. Liu, E. Dopp, J. Tuerk, K. Bester (2012) Ozonation products of triclosan in advanced wastewater treatment. Water Res. 46, 2247–2256.
3) J. Haun, J. Leonhardt, C. Portner, T. Hetzel, J. Tuerk, T. Teutenberg, T. C. Schmidt (2013) Online and splitless NanoLC × CapillaryLC with quadrupole/time-of-flight mass spectrometric detection for comprehensive screening analysis of complex samples. Anal. Chem. 85, 10083–10090.
4) B.I. Escher, J. Hackermüller, T. Polte, S. Scholz, A. Aigner, R. Altenburger, A. Böhme, S.K. Bopp, W. Brack, W. Busch, M. Chadeau-Hyam, A. Covaci, A. Eisenträger, J.J. Galligan, N. Garcia-Reyero, T. Hartung, M. Hein, G. Herbert, A. Jahnke, J. Kleinjans, N. Klüver, M. Krauss, M. Lamoree, I. Lahmann, T. Luckenbach, G.W. Miller, A. Müller, D.H. Phillips, T. Reemtsma, U. Rolle-Kampczyk, G. Schüürmann, B. Schwikowski, Y.M. Tan, S. Trump, S. Walter-Rohde, J.F. Wambaugh (2017) From the exposome to mechanistic understanding of chemical-induced adverse effects. Environ. Int. 99, 97–106.
5) D. Stalter, A. Magdeburg, M. Wagner and J. Oehlmann (2011) Ozonation and activated carbon treatment of sewage effluents: Removal of endocrine activity and cytotoxicity. Water Res. 45, 1015–1024.
6) F. Itzel, L. Gehrmann, H. Bielak, P. Ebersbach, A. Boergers, H. Herbst, C. Maus, A. Simon, E. Dopp, M. Hammers-Wirtz, T.C. Schmidt, J. Tuerk (2017) Investigation of full-scale ozonation at a municipal wastewater treatment plant using a toxicity-based evaluation concept. J Toxicol Environ Health A. 80, 1242-1258.
7) J. Boenigk, D. Beisser, S. Zimmermann, C. Bock, J. Jakobi, D. Grabner, L. Großmann, S. Rah-mann, S. Barcikowski, B. Sures (2014) Effects of silver nitrate and silver nanoparticles on a planktonic community: general trends after short-term exposure. PLoS One 9, e95340.
8) R. Altenburger, S. Scholz, M. Schmitt-Jansen, W. Busch, B.I. Escher (2012) Mixture toxicity re-visited from a toxicogenomic perspective. Environ. Sci. Technol. 6, 2508–2522.
9) S. Zimmermann, C. Wolff, B. Sures (2017) Toxicity of platinum, palladium and rhodium to Daphnia magna in single and binary metal exposure experiments. Environmental Pollution 222, 368–376.

*Die Autor*innen*

Torsten C. Schmidt hat seit 2006 den Lehrstuhl für Instrumentelle Analytische Chemie an der Universität Duisburg-Essen (UDE) inne. Er studierte Chemie an der Universität Marburg und promovierte 1997 in Analytischer Chemie. Nach PostDoc- und Assistentenzeit an der EAWAG/ETH Zürich und der Universität Tübingen habilitierte er 2006 in Hydrogeochemie und Umweltanalytik. Torsten C. Schmidt ist neben seiner Professur wissenschaftlicher Direktor für Wasserchemie am IWW Zentrum Wasser in Mülheim/Ruhr, Vorsitzender des Zentrums für Wasser- und Umweltforschung an der UDE und seit dem Januar 2013 Vorsitzender der Wasserchemischen Gesellschaft – Fachgruppe in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh). Seine Forschungsinteressen umfassen Substanzspezifische Isotopenanalytik, Trenntechniken, Extraktions- und Anreicherungsverfahren, Wasserchemie und -technologie mit Schwerpunkten auf Sorption und Oxidationsverfahren. Seit 2014 ist Schmidt Sprecher des vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Graduiertenkollegs FUTURE WATER. Für seine wissenschaftlichen Arbeiten im Grenzbereich der analytischen und Wasserchemie wurde er 2013 mit dem Fresenius-Preis der GDCh ausgezeichnet.

Bernd Sures studierte von 1988 bis 1993 in Bochum Biologie und Chemie. Von 1993 bis 1996 promovierte er an der Universität Karlsruhe über das Thema der Schwermetallanreicherung in Fischen und ihren Parasiten. Als wissenschaftlicher Assistent hat er im Jahr 2002 im Fach Zoologie seine Habilitation im Überschneidungsbereich zwischen Parasitologie und Ökotoxikologie durchgeführt, um dann weiterhin in Karlsruhe als Hochschuldozent zu arbeiten. Seit 2006 ist er Professor für Zoologie und Hydrobiologie und leitet die Abteilung Aquatische Ökologie an der Universität Duisburg-Essen. Seiner Forschungsschwerpunkte liegen weiterhin im Bereich parasitologischer und ökotoxikologischer Projekte in aquatischen Systemen. Aktuelle Verbundforschungsprojekte mit regionalen Wasserverbänden konzentrieren sich auf *in-vivo*-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Pulveraktivkohleanwendungen und Ozonierungsverfahren auf Kläranlagen.

Elke Dopp hat Agrar- und Umweltwissenschaften an der Universität Rostock studiert, dort promoviert und habilitiert. Ihre Lehrbefugnis (venia legendi) erhielt sie 2002 für das Fach Umwelttoxikologie von der Universität Rostock. Die Umhabilitation an die Universität Duisburg-Essen erfolgte im Jahr 2005. Sie erhielt dort die Lehrbefugnis für das Fach Hygiene und Umweltmedizin. Von 2010 bis 2016 leitete Elke Dopp das Geschäftsfeld Toxikologie am IWW Zentrum Wasser in Mülheim, das sie auch nach 2016 weiterhin beratend begleitet. Der Forschungsschwerpunkt von Elke Dopp liegt auf der Untersuchung der zellulären Veränderungen exponierter Zellkulturen (*in vitro*-Untersuchungen), die Umweltschadstoffen ausgesetzt werden. Sie

war und ist aktiv in verschiedene Gremienarbeit involviert (z.B. MAK-Kommission, WHO-Expertengremium, Expertengruppe des Umweltbundesamtes zur toxikologischen Bewertung von Arsen im Trinkwasser). Sie hat eigene Bücher, Zeitschriften und eine Vielzahl an Publikationen in nationalen und internationalen Zeitschriften veröffentlicht.

Jochen Türk hat von 1995 bis 2001 an der Universität Dortmund Chemie studiert und an der Universität Duisburg-Essen 2007 auf dem Gebiet der LC-MS-Methodenentwicklung für Arzneimittelwirkstoffe promoviert. Am Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) beschäftigt er sich seit 2001 mit einer ganzen Bandbreite analytisch-verfahrenstechnischer Fragestellungen aus den Themenbereichen Arbeitsschutz, Wasseranalytik, erweiterte Oxidationsverfahren (AOP), kommunale und industrielle Abwasserbehandlung, Chromatografische Verfahren, Massenspektrometrie und Strukturaufklärung. Die Kombination von instrumenteller und wirkungsbezogener Analytik zur Bewertung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren stellt den Schwerpunkt seiner in Bearbeitung befindlichen Habilitation dar. Sein übergeordnetes Ziel ist die Reduktion von toxikologisch relevanten Komponenten aus dem Wasserkreislauf sowie die sichere Handhabung von Gefahrstoffen (z.B. Zytostatika) in Apotheken, Ambulanzen, Krankenhäusern und der Pharmaindustrie. Seit 2009 ist er Bereichsleiter und seit 2015 technischer Leiter für das nach DIN ISO 17025:2005 akkreditierten Labores am IUTA. Darüber hinaus ist er in unterschiedlichen Gremien von DIN, DWA, VDI und Wasserchemischer Gesellschaft aktiv.

Jochen Türk. Foto: Vladimir Unkovic

Hans-Joachim Mälzer. Foto: Vladimir Unkovic

*Die Bemühungen der vergangenen Jahrzehnte im vorsorgenden Gewässerschutz haben zwar zu erheblichen Erfolgen in Form einer deutlichen Verbesserung der Ruhrwasserqualität geführt, was den Gesundheitsschutz der mit Trinkwasser aus der Ruhr versorgten Einwohner*innen und die Freizeitnutzung der Ruhr für verschiedene Wassersportarten verbessert hat. Dennoch war die Ruhr aber nicht als Badegewässer ausgewiesen und im Stadtgebiet Essen mit einem Badeverbot belegt. Dies hat sich geändert.*

Baden in der Ruhr

Vom Forschungsprojekt zum Badespaß

Von Hans-Joachim Mälzer & Wolf Merkel

Die Ruhr

Die Ruhr mit ihrem Einzugsgebiet dient fast fünf Millionen Menschen als Naherholungs- und Freizeitregion und stellt die Trinkwasserversorgung für den Ballungsraum Ruhrgebiet sicher. Aufgrund der starken Besiedlung des landwirtschaftlich und industriell genutzten Einzugsgebiets ist die Ruhr mit anthropogenen Stoffen und Krankheitserregern aus diffusen Quellen, der Siedlungsentwässerung und industriellen sowie kommunalen Abwässern belastet (siehe Abb. 1).

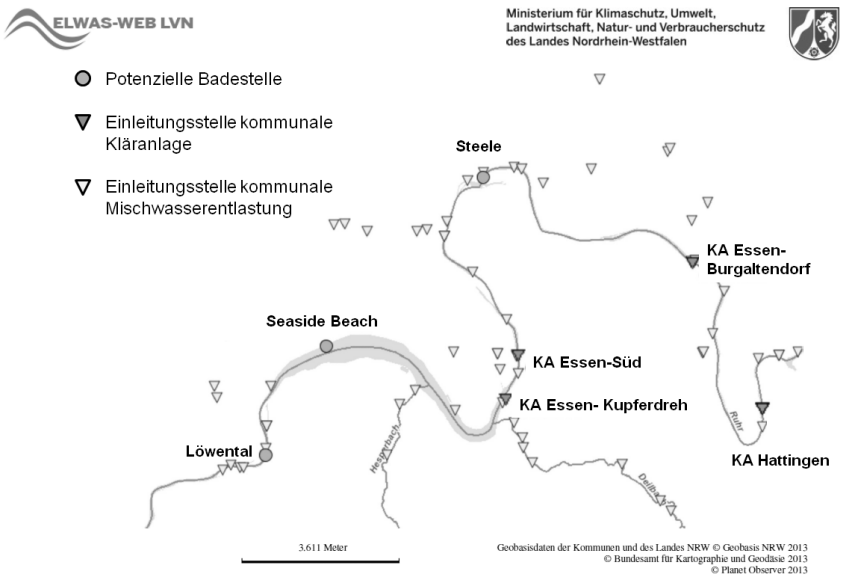
Die Bemühungen der vergangenen Jahrzehnte im vorsorgenden Gewässerschutz haben zwar zu erheblichen Erfolgen in Form einer deutlichen Verbesserung der Ruhrwasserqualität geführt, was den Gesundheitsschutz der mit Trinkwasser aus der Ruhr versorgten Einwohner und die Freizeitnutzung der Ruhr für verschiedene Wassersportarten verbessert hat. Dennoch war die Ruhr aber nicht als Badegewässer ausgewiesen und im Stadtgebiet Essen mit einem Badeverbot

belegt. Gleichwohl wurde die Ruhr vielerorts im Sommer allen gesundheitlichen Risiken zum Trotz als Badegewässer genutzt, mit der Folge, dass sich die Badenden bewusst oder unbewusst dem Risiko einer Infektion mit wasserassoziierten Mikroorganismen und Parasiten aussetzten.

Der Baldeneysee ist der größte von insgesamt fünf Stauseen, die der Ruhrverband an der Ruhr betreibt. Im betrachteten Ruhrabschnitt befinden sich darüber hinaus insbesondere zwischen Hattingen und Essen naturnahe Flussabschnitte, die im Sommer trotz offiziellem Badeverbot regelmäßig und zum Teil intensiv zum Baden genutzt werden. Der Baldeneysee, als eines der beliebtesten Ausflugsziele für Bürger*innen aus dem südlichen Ruhrgebiet, wird derzeit zwar nicht in nennenswertem Maße zum Flussbaden genutzt, wohl aber intensiv mit Segelbooten, Kanus und Surfbrettern befahren.

Baden am Baldeneysee hat allerdings eine lange Tradition: 1938 wurde das Freibad Baldeney direkt am Baldeneysee eröffnet. Es fungierte über 40 Jahre lang – von 1938 bis 1984 – als Freibad mit einem im Baldeneysee abgegrenzten Becken mit Sprungturm. Heute befindet sich an dieser Stelle das privat bewirtschaftete Freizeitgelände „Seaside Beach Baldeney“, das sich gerade in den Sommermonaten größter Beliebtheit erfreut. Ein Badeverbot für dieses künstliche Gewässer galt seit 1971 gemäß der „Ordnungsbehördlichen Verordnung zur Aufrechterhaltung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung im Stadtgebiet Essen“.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde die Ruhr, insbesondere im Bereich der großen Städte Duisburg, Mülheim, Essen, Bochum und Witten, intensiv auch zum Baden genutzt. An zahlreichen Stellen gab es in diesem Zeitraum offizielle und inoffizielle Bademöglichkeiten. Die zunehmende Besiedlung des Ruhrgebiets und die damit einhergehende höhere hygienische Belastung der Ruhr durch Abwassereinleitungen führte schließlich dazu, dass die Bezirksregierung Düsseldorf per Polizeiverordnung mit Wirkung zum 1. November 1952 das Baden in der Ruhr von der Mülheimer Schleuse bis zur Grenze des Regierungsbezirks bei Essen-Steele wegen der potentiellen Gefahr an Poliomyelitis zu erkranken, verboten hat. Bis zum Jahr 2017 gab es an der Ruhr in den Stadtgebieten Essen und Mülheim keine offizielle Badestelle mehr [1].



(1) Ruhr im Raum Essen mit Baldeneysee, potenziellen Badestellen, kommunalen Kläranlagen und Einleitungsstellen von kommunalen Mischwasserentlastungen.
Quelle: Merkel et al., 2016 (Kartengrundlage: ELWAS-WEB, http://www.elwasweb.nrw.de)

Das Forschungsvorhaben
Der Förderschwerpunkt RiSKWa

(„Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf“) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) bot hier die einzigartige Untersuchungsmöglichkeit, ob und unter welchen Bedingungen das Baden in der Ruhr in absehbarer Zeit zugelassen werden kann. Begleitend wurden Optimierungsmöglichkeiten zur Sicherheit der Trinkwassergewinnung und -aufbereitung aus der Ruhr erarbeitet. Das Forschungsvorhaben (Förderkennzeichen 02WRS183A bis J) wurde im Zeitraum vom 1. Januar 2012 bis zum 31. Dezember 2015 von einem Konsortium unter der Leitung des IWW bearbeitet. Als Projektpartner waren folgende Universitäten, Forschungsinstitute und Firmen beteiligt:

- IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH
- Ruhrverband
- Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit der Universität Bonn
- Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
- Abteilung für Hygiene, Sozial- und Umweltmedizin der Ruhr-Universität Bochum
- RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH
- Universität Duisburg-Essen
- Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
- aquatune – Dr. Gebhardt & Co. GmbH
- Xylem Water Solutions Herford GmbH

Die übergreifenden Projektziele waren:

- die Entwicklung der Ruhr als temporär nutzbares Badegewässer für die Region, wozu verschiedene

Elemente eines integrierten Risikomanagements für Krankheitserreger und Schadstoffe zu entwickeln und aufzubauen waren und
- die Verbesserung der Sicherheit der Trinkwassergewinnung und -aufbereitung aus der Ruhr hinsichtlich der Rückhaltung von Krankheitserregern.

Neben den Untersuchungen zur Ruhr als Badegewässer wurde auch die Trinkwasseraufbereitung aus Ruhrwasser umfänglich hygienisch bewertet. Als wesentliche Erkenntnis aus diesen Untersuchungen kann festgehalten werden, dass bereits der erste, naturnahe Schritt des Reinigungsprozesses – die Filterwirkung der Bodenpassage – die in der Ruhr vorkommenden Krankheitserreger weitestgehend zurückhält. Die weiteren Aufbereitungsschritte im Trinkwasserwerk sorgen schließlich dafür, dass die Erreger in dem gewählten Untersuchungsvolumen nicht mehr nachweisbar waren. Der folgende Beitrag konzentriert sich deshalb auf die Aspekte der möglichen Badenutzung der Ruhr.

Um die Nutzung der Ruhr als Badegewässer und Rohwasserressource für die Trinkwasserversorgung des Ballungsraums Ruhrgebiet vorzubereiten beziehungsweise langfristig zu sichern, wurden innovative Ansätze zur regionalen Gefährdungsbeurteilung, Technologien zur Risikominderung, zu Monitoring- und Frühwarnansätzen sowie zur Risikokommunikation für die Bevölkerung entwickelt und in einem integrierten System zur Umsetzung vorbereitet [2].

Gesetzlicher Rahmen

Für die Projektbearbeitung und insbesondere für eine mögliche Umsetzung des Badens in der Ruhr war zunächst die Frage zu klären, auf welcher rechtlichen Basis eine Badenutzung der Ruhr möglich werden könnte, sofern die hygienischen Verhältnisse dies überhaupt zulassen. Die denkbaren Vorstellungen eines geeigneten Rechtsrahmens reichen hierbei von einer teilweisen Ausnahmeregelung des Badeverbots, wie dies beispielsweise an der Isar in München umgesetzt ist, bis hin zu einer allen Anforderungen der Badegewässerverordnung NRW (NRW 2007) genügenden Ausweisung offizieller Badegewässer.

Neben der rechtlichen Legitimation, an einer bestimmten Stelle in der Ruhr baden zu können, standen bei dem juristischen Exkurs zur möglichen Badenutzung der Ruhr natürlich auch Haftungsfragen und Aspekte der Verkehrssicherungspflicht im Vordergrund. Im Ergebnis einer umfassenden Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen haben die Projektbeteiligten für eine mögliche Badenutzung der Ruhr eine sehr eindeutige Empfehlung abgeleitet. Demnach scheint die einzig sinnvolle und durchführbare Form einer möglichen Badenutzung die vollständige Anwendung der Anforderungen der Badegewässerverordnung NRW. Andere Formen einer Badenutzung, wie beispielsweise über Duldungstatbestände oder in einer Satzung verankerte Ausnahmen von einem generellen Badeverbot, sind entweder für den Verkehrssicherungspflichtigen mit großen Haftungsrisiken verbunden oder entsprechen nicht dem europäischen Rechtsrahmen für das Baden in Fließgewässern, so dass sie grundsätzlich für die Wiedereinrichtung eines Badebetriebs in der Ruhr nicht infrage kommen.

Die Anwendung der Badegewässerverordnung NRW würde an der Ruhr natürlich nicht bedeuten, dass die gesamte Ruhr einer Badenutzung zugänglich gemacht werden muss, sondern dass einzelne abgegrenzte Badestellen als sogenannte ausgewiesene Badegewässer definiert werden könnten. Eine wesentliche Voraussetzung zur zukünftigen Badenutzung an der Ruhr wäre allerdings die zielgerichtete Bewirtschaftung der Badestellen bei kurzzeitigen Verschmutzungen. Wie bereits aus Voruntersuchungen bekannt war, haben die hygienischen Untersuchungen sehr deutlich bestätigt, dass es insbesondere bei starken Regenfällen mit entsprechenden Entlastungen aus der Mischwasserkanalisation und bei Hochwässern zu einer signifikanten Verschlechterung der hygienischen Qualität der Ruhr kommt, die bei Trockenwetterverhältnissen durchaus den Anforderungen der Badegewässerverordnung entspricht. Nach der Badegewässerverordnung stellen solche Ereignisse kurzzeitige Verschmutzungen dar und die entsprechenden Regularien zum Umgang mit derartigen Störungen sind anzuwenden. Insbesondere sind allgemeine Informationen über die Ursachen derartiger kurzzeitiger Verschmutzungen und deren Dauer den Badenden zur Verfügung zu stellen und diese, beispielsweise durch ein kurzzeitiges Badeverbot, vor einer Exposition gegenüber diesen Verschmutzungen zu schützen [3].

Die Badegewässerverordnung definiert dabei eine kurzzeitige Verschmutzung als eine mikrobiologische Verunreinigung, die eindeutig feststellbare Ursachen hat, bei der normalerweise nicht damit gerechnet wird, dass sie die Qualität der Badegewässer mehr als ungefähr 72 Stunden beeinträchtigt, und für die die zuständige Behörde, Verfahren zur Vorhersage und entsprechende Abhilfemaßnahmen festgelegt hat. Wird bei der Badegewässerüberwachung für den Parameter „*Escherichia coli*“ ein Einzelwert von mehr als 1.800 KBE/100 ml oder für den Parameter „Intestinale Enterokokken“ ein Einzelwert von mehr als 700 KBE/100 ml festgestellt, so ist eine sofortige Nachkontrolle durchzuführen. Liegen bei dieser Nachkontrolle die Messergebnisse wieder über diesen Werten, ist ein zeitweiliges Badeverbot zu erlassen. Das Verbot ist aufzuheben, wenn durch Messungen festgestellt wurde, dass zumindest wieder eine ausreichende Badegewässerqualität erreicht ist.

Die Badegewässerqualität selber wird über eine statistische Auswertung der Messergebnisse der Parameter „*Escherichia coli*“ und „Intestinale Enterokokken“ ermittelt, wobei

der Mindestumfang der Probenahmen in der Badegewässerverordnung festgelegt ist. Je nach Ergebnis der statistischen Auswertung wird die Badegewässerqualität als ausgezeichnet, gut, ausreichend oder mangelhaft eingestuft.

Messungen

Als Grundlage für die Untersuchungen der Wasserqualität wurden in den Jahren 2012 und 2013 über einen Zeitraum von 18 Monaten alle zwei Wochen an sieben verschiedenen Stellen zwischen Essen-Steele und Mülheim-Styrum Wasserproben der Ruhr entnommen. Diese Proben wurden im Anschluss auf verschiedene Krankheitserreger hin untersucht. Im Detail wurden Bakterien, Viren und Protozoen untersucht. Zusätzlich wurde das Vorkommen von weiteren Parasiten (Vogelschistosomen, Trichobilharzia spp. – von Vögeln ausgeschiedene Parasiten) erfasst. Diese können bei Badenden die sogenannte Badedermatitis, einen juckenden, jedoch ungefährlichen Hautausschlag, verursachen.

Bei allen untersuchten Mikroorganismen wurden Schwankungen in Abhängigkeit von Jahreszeit und Regenintensität festgestellt. Unterschiede in den Messwerten der einzelnen Probenahmestellen waren nicht erkennbar. Eine Ausnahme stellen hier die Badedermatitiserreger dar, die nur vereinzelt an einigen Stellen nachgewiesen wurden.

Zur weiteren Vertiefung der hygienischen Informationsbasis wurde in den Jahren 2014 und 2015 ein intensives Untersuchungsprogramm auf Basis der Anforderungen der Badegewässerverordnung NRW initiiert. Hierbei wurden an ausgewählten Messstellen im Baldeneysee (Seaside Beach) sowie im Zulauf und im Ablauf des Sees während der Badesaison (Mai/Juni bis September) jeweils von Montag bis Donnerstag tägliche Wasserproben entnommen und auf *E. coli* sowie intestinale Enterokokken analysiert. Hierbei zeigte sich, dass die Höchstwerte nach Badegewässerverordnung im Mittel etwa sechs- bis achtmal während der Badesaison überschritten wurden. Lediglich eine Probenahmestelle zeigte eine deutlich höhere Anzahl an Überschreitungen, was auf die Lage im unmittelbaren Abstrom einer Mischwasserentlastung zurückgeführt werden konnten. Selbst die geringe Anzahl der Überschreitungen der zulässigen Höchstkonzentration an *E. coli* und Intestinalen Enterokokken führte jedoch dazu, dass die Badegewässerqualität als unzureichend einzustufen war. Wird jedoch die Forderung der Badegewässerverordnung nach der Installation eines Frühwarnsystems von kurzzeitigen Verschmutzungen umgesetzt, so besteht die Möglichkeit, die Badenden vor kurzzeitigen Verschmutzungen zu warnen und ein zeitweiliges Badeverbot auszusprechen sowie auf Probenahmen zur Ermittlung der Badegewässerqualität während des Zeitraums von kurzzeitigen Verschmutzungen gezielt zu verzichten.

Gruppe	Parameter	Hygienische Bedeutung
Bakterien	Gesamtzellzahl	allg. bakterielle Belastung
	Gesamtkoloniezahl (HPC)	allg. bakterielle Belastung
	E. coli	Indikatorparameter
	coliforme Bakterien	Indikatorparameter
	intestinale Enterokokken	Indikatorparameter
	C. perfringens	Indikatorparameter
	P. aeruginosa	Umweltkeim (fakultativ pathogen)
	Legionella sp. und L. pneumophila	Umweltkeim (fakultativ pathogen)
	Aeromonaden	Umweltkeim (fakultativ pathogen)
	Campylobacter	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
	Salmonellen	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
Viren	Adenoviren	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
	Polyomaviren	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
	Rotaviren	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
	Noroviren GI/GII	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
	Enteroviren	obligat pathogen (fäkaler Herkunft)
Protozoen	*Cryptosporidium spp.*	obligat pathogen
	Giardia lamblia	obligat pathogen
Invertebraten	*Trichobilharzia spp.*	obligat pathogen
chem./phys. Begleitparameter	pH-Wert	
	Temperatur (Wasser)	
	elektr. Leitfähigkeit	
	Sauerstoff	
	Trübung	
	SAK/SSK	
	DOC/TOC	
	NH4+, NO2-, NO3	
	P-ges, ortho-PO43	
Meteorologische Daten	Temperatur (Luft), Niederschlag, etc.	
Hydraulische Daten	Abfluss	

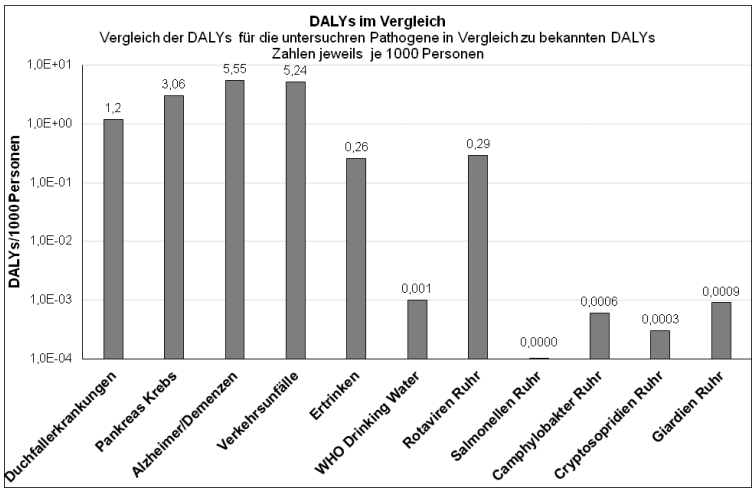
(T1) Untersuchungsparameter des Messprogramms an der unteren Ruhr.
Quelle: Merkel et al. 2015

In diesen Fällen wäre an einigen Messstellen die Badegewässerqualität durchaus als gut einzustufen, was den Betrieb einer Badstelle ermöglichen würde.

Im Projekt wurden auch weitere Mikroorganismen betrachtet, die von der EU-Badegewässerrichtlinie nicht als Indikatorparameter für die Badegewässerqualität berücksichtigt sind, aber ernstzunehmende Pathogene darstellen (s. Tab. 1). Hier sind insbesondere die verschiedenen Viren zu nennen, deren Infektiösität hoch und das Infektionsrisiko schon bei geringen Dosen erheblich ist. Für alle Parameter gilt: Die Belastungen traten im Jahresverlauf leicht uneinheitlich auf. Für die Badenden können sie verschiedene Risiken wie etwa Durchfallerkrankungen nach sich ziehen.

Risikoabschätzungen

Um das Ausmaß der Risiken für die Badenden einstufen zu können, wurde im Rahmen des Projekts für die untersuchten Parameter eine Risikobewertung durchgeführt. Die Bewertung im Projekt ging über die in der EU-Badegewässerrichtlinie geforderten Parameter hinaus, wobei pathogene Mikroorganismen wie Rotaviren, Salmonellen, Campylobakter, Cryptosporidien und Giardien betrachtet wurden. Um die Wahrscheinlichkeit einer Infektion zu berechnen, wurde in einem ersten Schritt ein QMRA (quantitative microbial risk assessment) durchgeführt. Dabei wurde das Risiko, beim Baden zu erkranken, anhand von Literaturwerten und abschätzenden Berechnungen zur Aufnahme von Krankheitserregern beim Baden und anhand von Literaturwerten zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen ermittelt. Das gesellschaftlich akzeptierte Risiko, welches nach Anwendung der Badegewässerverordnung zutrifft, liegt rein rechnerisch im Akzeptanzbereich von drei bis fünf Prozent. Werden die Werte aus „Sichere Ruhr“ damit verglichen, so ist das Baden in der Ruhr aus hygienisch-medizinischer Sicht vertretbar, zumal sich die Risiken durch gezielte Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie zum Beispiel dem Aussprechen ein Badeverbots während kurzzeitiger Verschmutzungsereignisse oder die Umsetzung von technischen Maßnahmen zur Verringerung der Eintragsmenge und Häufigkeit pathogener Mikroorganismen weiter senken lassen.



(2) DALYs für die untersuchten Pathogene im Vergleich zu bekannten DALY-Werten für verschiedene Lebensrisiken.
Quelle: Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit der Universität Bonn, Abteilung für Hygiene, Sozial- und Umweltmedizin der Ruhr-Universität Bochum, Merkel et al. 2015

Anschließend wurde durch die Anwendung des DALY-Konzepts (DALY: disability-adjusted life years) das Schadensausmaß dieser Erkrankungen charakterisiert. Ein DALY sagt aus, inwieweit eine Erkrankung zum Verlust von gesunden und beschwerdefreien Lebensjahren führt. Das DALY-Konzept ist von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) akzeptiert und zur Ableitung von gesundheitsbezogenen Grenzwerten etabliert.

Es zeigte sich, dass die höchsten Gesundheitseinschränkungen beim Baden von der Belastung des Wassers mit Rotaviren ausgehen. Sie liegt jedoch in derselben Größenordnung wie etwa die Gefahr durch Ertrinken, aber deutlich niedriger als beispielsweise die Teilnahme am Straßenverkehr (siehe Abb. 2).

Das Bewertungskonzept und die erarbeitete hygienische Datenbasis für ein Fließgewässer erlauben so eine in dieser Tiefe bislang nicht mögliche risikobasierte Bewertung der Gesundheitsgefährdung beim Baden. Anhand der vorliegenden Daten zeigt sich jedoch auch, dass *E. coli* und Enterokokken nur bedingt als Indikatorparameter der Badegewässerqualität geeignet sind [4].

Die Badedermatitis ruft beim Menschen einen juckenden, weitgehend ungefährlichen mehrtägigen Ausschlag hervor. Ursache ist das Eindringen von freischwimmenden Larven der Vogelschistosomen der Arten *Trichobilharzia franki* und *Trichobilharzia szidati*, sogenannter Zerkarien, in die Haut. Zerkarien befallen als Endwirt normalerweise Wasservögel, um zu Trematoden heranzuwachsen. Als Zwischenwirte fungieren die Wasserschnecken, welche die Zerkarien in großen Mengen ins Gewässer ausstoßen, die dann an der Oberfläche schwimmen. Befinden sich Menschen in dem von Zerkarien befallenen Gewässer, so dringen diese in die Haut ein, sterben dort ab und rufen unangenehme Hautrötungen hervor, die nach einigen Tagen abklingen. Weiterentwickeln können sich die Parasiten allerdings nur, wenn der Lebenszyklus geschlossen ist, also der Endwirt

„Wasservogel“ anwesend ist. Daher ist es ratsam, zu beobachten, ob sich viele Wasservögel an der Badestelle aufhalten. Der beste Schutz, eine Infektion mit Zerkarien zu vermeiden, ist es also, das Flachwasser zu meiden und zum Beispiel eine Steganlage zu nutzen, um direkt ins tiefere Wasser zu gelangen [5].

Modellrechnungen

Zur Ermittlung der Herkunft der hygienischen Belastungen in der Ruhr wurde eine Bilanzierung der Eintragspfade am Beispiel von *E. coli* vorgenommen. Dabei wurde zwischen den Einträgen aus Nebengewässern, diffusen Einträgen, Einträgen aus Kläranlagenabläufen und aus Mischwasserentlastungen unterschieden. Für diese Frachtbilanzierung wurde als Bilanzraum die untere Ruhr von Hattingen bis Mülheim-Styrum betrachtet. Die Abgrenzung des Projektraumes bei Hattingen war insofern von Bedeutung, da frühere Untersuchungen des Ruhrverbandes zur hygienischen Situation der Ruhr gezeigt hatten, dass mit Ausnahme von Hochwasserabflusssituationen der oberhalb liegende Kemnader Stausee eine deutliche Senke der hygienisch relevanten Organismenkonzentration in der Ruhr darstellt.

Zur Abschätzung des Eintrags hygienisch relevanter Frachten über diffuse Quellen wurde zunächst eine differenzierte Flächenbilanzierung für den gesamten Projektraum vorgenommen und anschließend auf Basis bestehender Erkenntnisse zum Eintrag aus diffusen Quellen eine Abschätzung über den diffusen Oberflächenabfluss in Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse vorgenommen. Bei der Bilanzierung wurde zwischen Trockenwetter- und Regenwetterverhältnissen unterschieden. Es zeigte sich, dass die Frachteinträge bei Regenwetter angesichts der intensiven Siedlungsnutzung im Projektgebiet durch die Mischwasserentlastungen (ca. 60–70 % der Gesamtfracht) dominiert werden, während bei Trockenwetter der wesentliche Frachteintrag im Projektgebiet über die Kläranlagenabläufe (ca. 60–90 % der Gesamtfracht) erfolgt. Trotz des hohen Anteils an Kläranlagenabläufen an der Gesamtfracht bei Trockenwetter war jedoch die Konzentration an *E. coli* wesentlich geringer als bei Regenwettersituationen. Auf der Basis der gemessenen Konzentrationen wurde offensichtlich, dass die hygienische Qualität des Ruhrwassers in Trockenperioden durchaus in der Größenordnung des von der Badegewässerrichtlinie angestrebten Schutzniveaus für Badende liegt, bei Regenwetter und Hochwasser die Infektionsrisiken jedoch deutlich höher sind. Diese Beobachtung wurde bei der Entwicklung eines Frühwarnsystems zur Erkennung von kurzzeitigen Verschmutzungen weiter genutzt [6].

Da die Einleitung von gereinigtem Abwasser und Regenüberläufen in die Ruhr längerfristig alternativlos sein wird, wurde ein Frühwarnsystem zur kurzfristigen, ereignisgesteuerten Freigabe beziehungsweise Sperrung des Badebetriebs erprobt. Da Online-Messungen der Bakterienkonzentrationen zu ungenau sind und labortechnische Analysen nur zeitverzögerte Ergebnisse liefern, wurden für die Erstellung eines Frühwarnsystems verschiedene Methoden untersucht und anhand von historischen Daten und den in der Projektarbeit erhobenen Messdaten überprüft: Korrelationsanalysen, Künstliche Neuronale Netze (KNN), Bilanz- und Niederschlagsmodelle sowie ein dynamisches Simulationsmodell. Die genauesten Aussagen konnten mit den KNN erzielt werden, wobei jedoch auch der Bedarf an Eingangsdaten am höchsten war. Mithilfe des Trockentagemodells waren nur Aussagen möglich, ob gewisse Schwellwerte überschritten werden [7]. Dabei ergaben sich je nach Messstelle eine Anzahl von ein bis drei Tagen, an denen im näheren Einzugsgebiet keine größeren Niederschläge auftreten dürfen, um eine Unterschreitung der Grenzwerte von 1.800 KBE/100 ml für *E. coli* und 700 KBE/100 ml für intestinale Enterokokken zu gewährleisten, die nach Badegewässerverordnung ein Badeverbot auslösen. Diese „Karenzzeit“ ist spezifisch für jede einzelne Badestelle, so dass ein darauf basierendes Schutzkonzept für jede Badestelle einzeln zu bewerten ist. Das dynamische Simulationsmodell konnte wegen unzureichenden Informationen zu Randbedingungen (Mischwasserentlastungen) nicht angewendet werden [8]. Weiterhin wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Mechanik und Robotik der Universität Duisburg-Essen dreidimensionale Berechnungen der Strömungs- und Transportvorgänge im Baldeneysee durchgeführt, die grundlegende Erkenntnisse über die zu erwartenden Konzentrationsverteilungen nach Einleitungsereignissen lieferten.

Frühwarnsystem Seaside Beach

Im Juni 2015 gründete sich die „Interessengemeinschaft Baden in der Ruhr“ im Stadtgebiet Essen (IG Baden) mit dem Ziel, an ein bis drei beispielhaften Stellen an der Ruhr einen Badebetrieb zu ermöglichen. Mitglieder der IG Baden waren Vertreter von Behörden, städtischen Institutionen, Verbänden und Parteien, interessierte Bürger*innen der Region Essen sowie Projektpartner aus den Forschungsvorhaben (IWW und Ruhrverband). Unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse sowie der bereits bestehenden lokalen und technischen Voraussetzungen wurde das potenzielle Badegewässer „Seaside Beach“ ausgewählt, an dem exemplarisch die Einrichtung einer ersten Badestelle umgesetzt werden sollte.

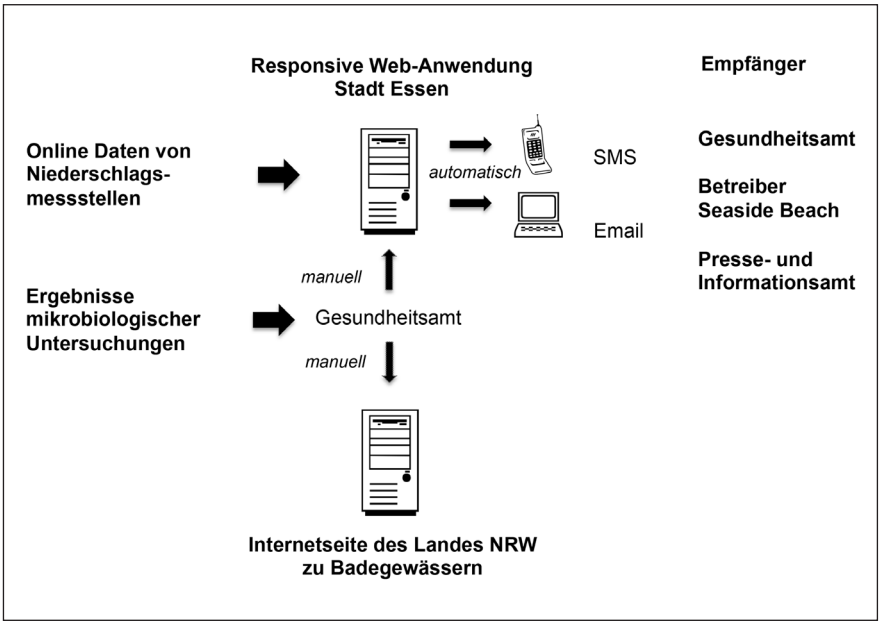
Aktuell ist bei stärkeren Niederschlägen das Badegewässer „Seaside Beach“ durch Einleitungen anfällig gegen kurzzeitige Verschmutzungen. Gemäß der Badegewässerverordnung wurde daher als Bewirtschaftungsmaßnahme ein

Frühwarnsystem entwickelt, dass die Bevölkerung vor kurzzeitigen Verschmutzungen warnt.

Das Frühwarnsystem beruht auf der Beobachtung, dass erhöhte Konzentrationen an *E. coli* und intestinalen Enterokokken nach Regenereignissen am Badegewässer „Seaside Beach“ auftreten. Die Konzentrationen können dabei Werte von 1.800 KBE/100 ml für *E. coli* beziehungsweise 700 KBE/100 ml für intestinale Enterokokken überschreiten, was das Aussprechen eines zeitweisen Badeverbots zu Folge haben muss. Da das Ergebnis einer mikrobiologischen Analyse erst mit der Verzögerung von mindestens einem Tag vorliegt, wird ein Frühwarnsystem benötigt, das die Badenden unmittelbar vor zu erwartenden kurzzeitigen Verschmutzungen warnt. Hierzu werden stündlich die Tagesniederschlagssummen an sechs Niederschlagsmessstationen im Umfeld des „Seaside Beach“ ermittelt, die die Messwerte online zur Verfügung stellen.

In Absprache mit der IG Baden wurde das Niederschlagsmodell als Grundlage für das Frühwarnsystem ausgewählt, das über eine sehr hohe Prognosegenauigkeit für Überschreitungen der Grenzwerte nach Badegewässerverordnung verfügt und lediglich mit Niederschlagsdaten aus dem Umland der Badestelle „Seaside Beach“ betrieben werden kann, die online von bereits bestehenden Messstationen bezogen werden können. Zur praktischen Anwendung des Frühwarnsystems wurde vom Essener Systemhaus im Auftrag der Stadt Essen eine responsive Web-Anwendung programmiert (s. Abb. 3).

Die Niederschlagswerte werden an einen Server der Stadt Essen übertragen auf dem die responsive Web-Anwendung installiert ist, die stündlich überprüft, ob an einer der Messstellen ein maximal zulässiger Niederschlagswert von 5 mm/d an den vorangegangenen zwei Tagen sowie am Bewertungstag selber überschritten wurde. In diesem



(3) Funktionsweise des Frühwarnsystems.
Quelle: IWW

Fall ist mit der Überschreitung der Grenzwerte für ein Badeverbot zu rechnen. Der maximale Niederschlagswert sowie der Bewertungszeitraum von drei Tagen (einschließlich des Bewertungstags) war anhand der Auswertung von umfangreichen Messungen aus den Jahren 2012 bis 2016 ermittelt worden.

Bei Überschreitung des maximal zulässigen Niederschlags erfolgt eine automatische Benachrichtigung des Gesundheitsamts der Stadt Essen, des Presse- und Informationsamts der Stadt Essen und des Betreibers des Badegewässers „Seaside Beach“ wahlweise per SMS und/oder E-Mail. Diese Benachrichtigung ist mit der Aussprache eines Badeverbotes verbunden. Der Betreiber des Badegewässers „Seaside Beach“ hat daraufhin unverzüglich die Badestelle zu schließen und die Bevölkerung über das Badeverbot zu informieren. Hierzu wird der Zugang zum Badesteg geschlossen und die anwesenden Besucher*innen des „Seaside Beach“ durch ein Informationszeichen „Baden verboten“ auf das Badeverbot aufmerksam gemacht. Außerdem wird auf der Internetseite des „Seaside Beach“ und über Facebook die Bevölkerung darüber informiert, dass die Badestelle derzeit geschlossen ist. Weiterhin nimmt das Gesundheitsamt manuell die Änderung des Badestatus auf der Informationsseite des Landes NRW über die Badegewässer in NRW vor (http://www.badegewaesser.nrw.de).

Zeigen die Niederschlagsdaten an, dass die kurzzeitige Verschmutzung beendet ist, so erfolgt eine automatische Benachrichtigung des Gesundheitsamts, das eine Beprobung und mikrobiologische Untersuchung der Badestelle auf die Konzentrationen an *E. coli* und intestinale Enterokokken veranlasst. Liegt dem Gesundheitsamt der Untersuchungsbefund vor, kann das Gesundheitsamt bei entsprechender Befundlage (*E. coli* ≤ 1.800 KBE/100 ml, intestinale Enterokokken ≤ 700 KBE/100 ml) das Badeverbot aufheben, indem es sich per Internet mit der Web-Anwendung der Stadt Essen verbindet und dort manuell einen entsprechenden Eintrag vornimmt. Lässt der Befund das Aufheben des Badeverbots nicht zu, so bleibt das Badeverbot so lange bestehen, bis es nach weiteren mikrobiologischen Untersuchungen wieder aufgehoben werden kann. Bei Aufhebung des Badeverbots erfolgt eine

(4) Badespaß am „Seaside Beach“.
Quelle: Peter Prengel, Stadt Essen, 23. Mai 2017

automatische Benachrichtigung des Presse- und Informationsamts der Stadt Essen und des Betreibers des „Seaside Beach“ wiederum wahlweise per SMS und/oder E-Mail. Der Betreiber des Badegewässers „Seaside Beach“ kann daraufhin das Badegewässer wieder öffnen und die Bevölkerung über die ihm zugänglichen Informationsmedien (Internetseite des „Seaside Beach“ und Facebook) darüber informieren. Weiterhin nimmt das Gesundheitsamt manuell die Änderung des Badestatus auf der Informationsseite des Landes NRW über die Badegewässer in NRW vor (http://www.badegewaesser.nrw.de).

Das Land NRW sowie das Presse- und Informationsamt der Stadt Essen verweisen auf ihren Internetseiten auf die Internetseite des Betreibers des „Seaside Beach“.

Baden im Baldeneysee

Kaum ein Wasser-Forschungsprojekt der letzten Jahre hat von Projektbeginn an so viel Aufmerksamkeit und Interesse von Öffentlichkeit, Politik und Medien bekommen. Neben der wissenschaftlichen Arbeit lag eine besondere Herausforderung darin, auf die Erwartungen der Bevölkerung bis zum Vorliegen der Ergebnisse mit dem wissenschaftlichen Vorbehalt der ergebnisoffenen Forschung zu reagieren. Als nach etwa zwei Jahren Arbeit die Hoffnung auf eine mögliche Realisierung des Badebetriebs zunehmend mit Fakten unterlegt werden konnte, kam zur stringenten Fortsetzung der wissenschaftlichen Arbeit die besondere Herausforderung, die im Forschungsprojekt begonnenen Vorbereitungen für einen realen Badebetrieb im Stadtgebiet Essen an eine kommunal ermächtigte Organisation zu übergeben. All diese Bemühungen haben am 12. Juni 2015 zur Gründung der „Interessengemeinschaft Baden in der Ruhr“ im Stadtgebiet Essen geführt [9]. Auch bei der Bewerbung und der Ernennung der Stadt Essen zu Grünen Hauptstadt Europas des Jahres 2017 spielte die Aussicht auf die Nutzung des Baldeneysees als Badegewässer eine wichtige Rolle und das Ziel der Einrichtung und des Betriebs einer Badestelle für die badelustige Bevölkerung in Essen rückte in greifbare Nähe. Am 23. Mai 2017 war es dann endlich soweit. Nach mehreren Jahrzehnten des Badeverbots an der Ruhr wurde die Badestelle am „Seaside Beach“ am Baldeneysee offiziell eröffnet. Die Stadt Essen hatte hierzu drei Badestege in den

See bauen lassen, zwischen denen das Baden nun offiziell erlaubt ist – vorausgesetzt es liegt keine kurzzeitige Verschmutzung vor, die durch das Frühwarnsystem angezeigt wird. Der Betrieb der Badestelle erfolgt durch den Betreiber des Freizeitgeländes „Seaside Beach“, der auch für die Bereitstellung der Bademeister und der Umsetzung von Badeverboten bei kurzzeitigen Verschmutzungen zuständig ist. In den ersten drei Monaten der Badesaison 2017 sprang das Frühwarnsystem zehnmal an und es konnte an insgesamt 36 Tagen gebadet werden – ein Angebot, das von vielen Besucher*innen des „Seaside Beach“ mit Freude in Anspruch genommen wurde (s. Abb. 4).

Auf zu neuen Ufern

Nachdem es am „Seaside Beach“ gelungen war, die Einrichtung eines offiziellen Badegewässers zu demonstrieren, wurden bereits während der Badesaison 2017 auch von anderen Städten an der Ruhr Interessen geäußert, ebenfalls Badestellen einzurichten.

Einige Fragen blieben jedoch aus dem Forschungsvorhaben offen, wie zum Beispiel detaillierte Untersuchungen zur Herkunft der mikrobiologischen Belastungen und deren Modellierung. Auch stellen sich bei der Übertragung der an der Ruhr gewonnenen Forschungsergebnisse auf andere Flüsse ganz spezifische Fragestellungen, die zur Fortsetzung der Untersuchungen im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens „Flusshygiene“ (Förderkennzeichen: FKZ 02WRM1364A, Laufzeit: 1. Juni 2015 bis 31. Mai 2018) geführt haben. An diesem Forschungsvorgaben, das vom der Kompetenzzentrum Wasser gGmbH koordiniert wird, sind mehrere Projektpartner beteiligt, unter anderen auch IWW und der Ruhrverband. Im Vorhaben werden sieben Flüsse untersucht, die im Projekt in vier Modellregionen unterteilt sind und sich hinsichtlich Gewässertyp, Gewässerstruktur, Gewässergüte und Nutzungsarten stark unterscheiden: das Spree-Havel System in Berlin, die Isar und Ilz in Bayern, Rhein und Mosel bei Koblenz in Rheinland-Pfalz und die Ruhr in Nordrhein-Westfalen. Ziel des Verbundprojekts ist die Entwicklung von Instrumenten, die es ermöglichen, komplexe, multifunktionale Fließgewässer so zu bewirtschaften, dass ohne Einschränkung ihrer ökonomischen Funktionen ein höchstmöglicher Gesundheitsschutz gewährleistet werden kann. Dazu wollen die Verbundprojektpartner die dafür nötigen Wissens-, Informations- und Entscheidungsgrundlagen erarbeiten. Weiter sollen Leitfäden und Modelle für die Entwicklung risikobasierter Vorhersageinstrumente und langfristiger Bewirtschaftungsstrategien hinsichtlich hygienischer Belastungen in Fließgewässern entwickelt werden. Mit diesen Erfahrungen erstellen die Verbundprojektpartner anschließend einen Leitfaden und eine Checkliste für die zuständigen Behörden und die wasserwirtschaftliche Praxis (https://bmbf.nawam-rewam.de/projekt/flusshygiene/).

Summary

Between 2012 and 2015, the collaborative research project “Sichere Ruhr” (Safe Ruhr), funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), was conducted. It was dedicated to establishing whether the quality of Ruhr River water had improved to an extent that an existing bathing ban, issued on account of poor microbial water quality around the year 1970, could be lifted. This would meet an obvious increase in demand among a considerable proportion of the adjacent population, who already noticed the improvements in the river water quality and, in spite of the legal situation, occasionally went for a swim. Against this background and in order to investigate opportunities, perspectives and obstacles to re-opening official bathing sites along the Ruhr River, “Safe Ruhr” addressed a broad spectrum of research issues. Both microbial and parasitological pollution of the Ruhr River have been monitored extensively. Furthermore, contamination with trematodes causing “swimmers itch” has been evaluated. The main sources for microbial pollution in the river were identified as being combined sewer overflows (CSOs), sewage water treatment effluents and agricultural runoff. Models to assess the variable impact of these pathogen pathways as well as early warning systems for hygienic quality have been developed and evaluated. Microbial health impacts and the health risk of river bathing have been assessed by use of quantitative microbial risk assessment (QMRA) and the concept of disability-adjusted life years (DALY). Different technologies to reduce pathogens in CSO effluents have been implemented and tested. In order to facilitate the re-establishment of Ruhr River bathing sites, a cost-benefit analysis for bathing in the Ruhr River was performed, a regional stakeholder analysis has been conducted, a communication strategy has been developed and a comprehensive practical guideline for bathing in natural watercourses has been published.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeiter*innen des interdisziplinären Projektverbunds „Sichere Ruhr“. Unser besonderer Dank geht an die fachliche Projektbegleitung durch Frau Dr. Regine Szewzyk (Umweltbundesamt), an die engagierten Vertreter von Behörden, Verbänden und Parteien sowie an die „Interessengemeinschaft Baden in der Ruhr“ der Stadt Essen.
Die dargestellten Ergebnisse wurden im BMBF-geförderten Verbundvorhaben

„Sichere Ruhr“ im Rahmen der Fördermaßnahme „Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf“ (RiSKWa) erarbeitet. Für die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschung für Nachhaltigkeit (FoNa) im Förderschwerpunkt Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM) bedanken sich die Autoren im Namen des gesamten Projektkonsortiums. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Weitere Informationen zur Projektarbeit, sowie Abschlussberichte und Veröffentlichungen finden sich auf der Projekthomepage www.sichere-ruhr.de.

Anmerkungen

1) Merkel et al. 2016
2) Merkel et al. 2015
3) Merkel et al. 2015
4) Merkel et al. 2015
5) Schoenemann und Jardin, 2015
6) Merkel et al. 2015
7) Mälzer et al. 2016
8) Merkel et al. 2015
9) Merkel et al. 2016

Literatur

– Mälzer, Hans-Joachim; aus der Beek, Tim; Müller, Silke; Gebhardt, Jörg: Comparison of different model approaches for a hygiene early warning system at the lower Ruhr River, Germany. International Journal of Hygiene and Environmental Health. Volume 219, Issue 7, Part B, 2016, 671-680.
– Merkel,Wolf; Strathmann, Martin; Tondera, Katharina; Klaer, Kassandra; Schoenemann, Britta; Jardin, Norbert: Sichere Ruhr - Stand und Perspektiven einer zukünftigen Badenutzung. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Band 236, 2015, 32.1-32.17.
– Merkel, Wolf; Strathmann, Martin; Hein, Andreas; Neskovic, Marina; Mälzer, Hans-Joachim; aus der Beek, Tim; Jardin, Norbert; Schoenemann, Britta; Kistemann, Christian; Timm, Thomas; Luther, Stephan; Koch, Christoph; Tondera, Katharina; Klaer, Kassandra; Pinnekamp, Johannes; Jurzik, Lars; Ewess, Ibrahim Hamza; Wilhelm, Michael; Donner, Christoph; Heyer, Anne; Schöpel, Mathias; Wingender, Jost; Horstkott, Marina; Flemming, Hans-Curt; Sures, Bernd; Selbach, Christian; Lahdo, Rania; Debo, Lisa; Reichertz, Jo; Wiedemann, Peter; Boerner, Franziska; Gebhardt, Jörg; Gebhardt, Jens; Vogt, Jürgen: Sichere Ruhr. Gemeinsamer Abschlussbericht aller Verbundprojektpartner Förderkennzeichen 02WRS1283A bis J inkl. Ergänzungen zur Weiterförderung 2015, 2016, (http://www.sichere-ruhr.de/wp-content/uploads/2016/11/Abschlussbericht_Sichere-Ruhr_Gesamtv-erbund_%C3%9Cberarbeitung-2016-final.pdf)
– Schoenemann, Britta; Jardin, Norbert: Baden in Fließgewässern. Ein Handlungsleitfaden am Beispiel des Baldeneysees & der Unteren Ruhr im Rahmen des BMBF-Projekts Sichere Ruhr, Essen, 2015 (http://www.sichere-ruhr.de/wp-content/uploads/2014/01/sichere_ruhr_handlungsleitfaden_final.pdf).
– NRW: Verordnung über die Qualität und die Bewirtschaftung der Badegewässer (Badegewässerverordnung) vom 11. Dezember 2007. GV NRW. 2008 S. 138.

Die Autoren

Hans-Joachim Mälzer studierte Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe. Nach seinem Studium war er ab 1986 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe im Bereich Wasserchemie tätig. 1988 wechselte er an das Rheinisch-Westfälische Institut für Wasserchemie und Wassertechnologie GmbH (IWW), Institut der damaligen Gerhard-Mercator-Universität-GH Duisburg und promovierte 1993 am Fachbereich Maschinenbau der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg zum Thema „Untersuchungen zu Transport und Abbauvorgängen bei der Uferfiltration im Hinblick auf die Auswirkungen von Stoßbelastungen“. In seiner beruflichen Tätigkeit blieb er weiterhin dem IWW Zentrum Wasser verbunden, wo er die Abteilung Gewässergüte/Schadstofftransport leitete und derzeit als Leiter des Geschäftsfelds Systemsimulation fungiert. Im Rahmen von nationalen und internationalen Beratungs- und Forschungsprojekten hat er sich eine breite Wissensbasis in den Bereichen Uferfiltration, Grundwasseranreicherung, Langsamfiltration, Trinkwasseraufbereitung von Oberflächenwässern, Transportprozesse von Schadstoffen in Gewässern, Modellierung von Transport- und Aufbereitungsprozessen, Trinkwassersicherheitskonzepte (Water Safety Plans), Wasserversorgungskonzepte sowie Anpassungsstrategien der Wasserversorgung an den Klimawandel erarbeitet.

Wolf Merkel hat nach dem Studium der Verfahrenstechnik an der Universität Karlsruhe mit den Schwerpunkten „Wasserchemie“ und „Stofftransport“ sowie einer Promotion zur anaeroben Reinigung von industriellen Abwässern an der Universität Stuttgart im IWW Zentrum Wasser zunächst Planungs- und Optimierungsprojekte der Wasserversorgung betreut. Das IWW gehört zu den führenden Forschungs- und Beratungsinstituten der deutschen Wasserversorgung mit Sitz in Mülheim an der Ruhr, Biebesheim am Rhein und Diepholz. Seit 2002 ist er dort als technischer Geschäftsführer für die Entwicklungs- und Beratungsaktivitäten verantwortlich.
Seine Forschungsschwerpunkte lagen unter anderem im Bereich „Kennzahlen und Benchmarking für die Wasserversorgung“ und im Bereich „Entwicklung von Asset Management Strategien für Wasserversorgungsunternehmen“. Als Projektleiter des BMBF-Vorhabens „Sichere Ruhr“ entwickelte er den Projektansatz und betreut bis heute die erfolgreiche Implementierung an den Badestellen an der Ruhr.

Wolf Merkel. Foto: Vladimir Unkovic

Mit dem Auslaufen des Steinkohlenbergbaus im Jahre 2018 hinterlässt der Bergbau eine umfangreiche Infrastruktur. Schachttiefen von bis zu 1.200 Metern, zahlreiche Ausbauten in der Tiefe und eine großräumige Wasserhaltung eröffnen Perspektiven für Folgenutzungen. Mit untertägigen Pumpspeicherwerken könnte an den heutigen Bergbaustandorten ein Beitrag zur Energiespeicherproblematik verfolgt werden. Ein aktuell laufendes Verbundvorhaben widmet sich ergebnisoffen der Ermittlung dabei zu berücksichtigender Aspekte am Beispiel des Bergwerkes Prosper-Haniel, der letzten verbliebenen Zeche im Ruhrrevier. Es geht 2018 außer Betrieb und bietet damit Perspektiven für eine Folgenutzung am Ende von mehr als 200 Jahren Bergbautradition im Ruhrrevier.

Raus aus der Grube – rein in die Grube

Ein untertägiges Pumpspeicherwerk als Bergbaunachfolge im Ruhrrevier

Von André Niemann

Der politisch gewollte Ausbau der Kapazitäten regenerativer Energien und deren verstärkte Integration in die Energieversorgung Deutschlands ist aktuell eine vorrangige Aufgabe der Energiewirtschaft. Das Problem der Energiespeicherung selbst ist dabei jedoch ungelöst. Die vorhandenen Speicherkapazitäten reichen zum Auffangen von resultierenden Energiefluktuationen nicht aus. Gleichzeitig ist die Projektierung von neuen Pumpspeicherwerken aktuell aufgrund der bestehenden Marktbedingungen nahezu zum Stillstand gekommen. So lassen sich die Projekte oft nicht wirtschaftlich darstellen [1]. Neben dem Einsatz und der Entwicklung neuer Speichertechnologien stellt die Nutzung neuer Standorte mit bewährter und etablierter Technik eine weitere Komponente beim erforderlichen Speicherausbau dar. Untertägige Pumpspeicherwerke (UPSW) folgen diesem Grundgedanken. Der vorliegende Beitrag widmet sich der Diskussion der grundsätzlichen Möglichkeiten und Anforderungen, die sich aus einem solchen Ansatz ergeben.

Die Folgenutzung der umfassenden bergbaulichen Infrastruktur über und unter Tage

Der Steinkohlebergbau in Nordrhein-Westfalen hinterlässt eine umfangreiche Infrastruktur. Schachtanlagen mit Tiefen von bis zu 1.200 Metern und ein noch aktives untertägiges Streckennetz von mehreren hundert Kilometern verdeutlichen die noch aktuelle Dimension der vorhandenen bergbaulichen Infrastruktur im Ruhrrevier. Über- und Unter Tage existieren umfassende

André Niemann. Foto: Vladimir Unkovic

Flächen und Infrastrukturelemente mit außerordentlichen Eigenschaften. So ist zum Beispiel neben den Bergwerken auch die Wasserhaltung im Ruhrrevier – und damit direkt unter dem gesamten Ruhrgebiet – ein besonders bedeutender Teil dieser Infrastruktur. So ergab sich aufgrund des umfassenden Kohle-Abbaus unter den Einzugsgebieten von Ruhr, Emscher, Lippe und Rhein bereits früh die Notwendigkeit einer gebietsübergreifenden Wasserhaltung für alle Bergwerkstandorte im Ruhrrevier. Das so über fast Jahrhunderte entstandene großflächig vernetzte System reicht in seiner Dimension von Kamp-Lintfort bis nach Hamm beziehungsweise Bergkamen [2].
Es wurde im Zuge der Bergbauaktivitäten grundsätzlich planmäßig wasserwegig gehalten, so dass auch heute noch Übertritte zwischen den einzelnen Wasserhaltungsstandorten möglich sind. Um einen unerwünschten schadhaften Anstieg des Grundwasserspiegels im Karbongebirge zu verhindern, muss diese Wasserhaltung auch nach 2018 bis in die Ewigkeit betrieben werden. Dies dient dem Trinkwasserschutz und auch der Vermeidung einer dauerhaften Vernässung an der Oberfläche. Dieser Sachverhalt wird auch als Teil der Ewigkeitslast bezeichnet. Genau hieraus ergeben sich Perspektiven für eine Folgenutzung dieser historisch gewachsenen Infrastruktur hin zu einem untertägigen Pumpspeicherwerk. Aktuell verbleibt jedoch nur noch ein aktives Bergwerk im Ruhrrevier. Das Bergwerk Prosper-Haniel in Bottrop. Es steht damit im Zentrum der Betrachtung.

Und dieser ewige Grubenwasserstrom bietet auch noch weitere Optionen. So ist das Grubenwasser rund 25 bis 35 Grad Celsius warm. Bei 80 Millionen m^3/a ein stetiger Wärmestrom, der dort, wo er gehoben wird, zur nachhaltigen Energieversorgung genutzt werden könnte. So widmen sich weitere Vorhaben wie zum Beispiel aktuell am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) der Ruhr-Universität Bochum diesen Möglichkeiten. Und es gibt zahlreiche weitere Vorhaben zur Nutzung von Geothermie aus unter Tage. Es bleibt offen, was davon dann tatsächlich realisiert werden kann. Gut ist, dass dies sehr strukturiert in verschiedenen Vorhaben geprüft wird.

Insgesamt sind die Überlegungen zur übertägigen oder untertägigen Folgenutzung bergbaulicher Flächen und Infrastruktur somit vielfältig. Diese werden aktuell auf zahlreichen Handlungsfeldern in der Region forciert. Eine gute Zusammenstellung zu den Ansätzen einer energetischen Folgenutzung findet sich bei Fischer [3].

Ein Pumpspeicher unter Tage – Geht das?

Das Funktionsprinzip von Pumpspeicheranlagen kann vereinfacht als Speicherung durch Umwandlung von elektrischer Energie in Lageenergie (potentielle Energie) beschrieben werden. Wasser wird mithilfe einer Pumpe (Energiezugabe) von einem niedrigen zu einem höher gelegenen Niveau transportiert. Der Speicher wird aufgeladen. Die so gespeicherte Lageenergie wird zurückgewonnen, indem das Wasser vom hohen Niveau ausgehend durch die Turbine läuft. Die Turbine wandelt die kinetische Energie über einen Generator in elektrische Energie um und gibt sie an das Netz weiter. Insgesamt wird mehr Energie verbraucht als gewonnen wird. Der Wirkungsgrad solcher Anlagen liegt bei bis zu 80 Prozent, was im Vergleich zu weiteren Speichersystemen recht hoch ist. Hinzu kommt der mehr als 100 Jahre bewährte technische Einsatz solcher Systeme.

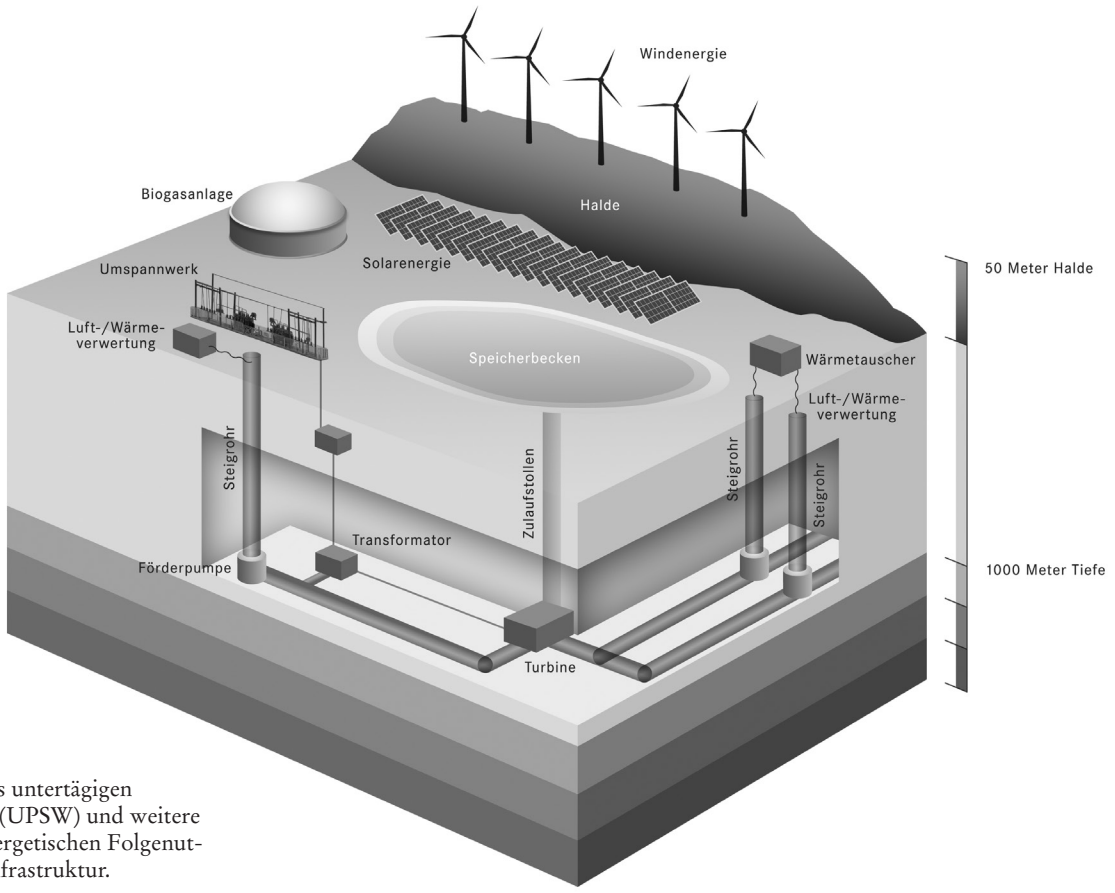
Bewährt haben sich Pumpspeicherwerke in Regionen mit ausreichenden Höhenunterschieden. Topographisch begründet existieren in Deutschland nur wenige Standorte mit diesem Potenzial. Die erforderlichen Speicherseen (oberer und ggf. auch unterer Speicher) haben oftmals einen hohen Landschafts- und Flächenbedarf, was häufig zu einer erheblichen Akzeptanzproblematik in der Gesellschaft führt.

Abbildung (1) zeigt beispielhaft das Prinzip eines untertägigen Pumpspeicherwerkes. Der Großteil der technischen Anlagen und der untere Speicherraum befinden sich dabei unter Tage. An der Oberfläche wäre das obere Speicherbecken zwar sichtbar, allerdings würde dieses auf den Flächen des Bergwerks platziert werden können. Weitere energetische Nutzungen auf den bergbaulichen Anlagen ergänzen die Folgenutzung.

Von der Idee zum Standort – Aber wie?

Vor einer Realisierung untertägiger Pumpspeicherwerke in den Anlagen des Steinkohlebergbaus sind noch eine Vielzahl von Fragestellungen zu beantworten. So ist vor allem die Beurteilung der technischen Machbarkeit im Untergrund sowie weiterer maßgeblicher umweltrelevanter, wirtschaftlicher, rechtlicher und sozialwissenschaftlicher Einflussfaktoren von maßgeblichem Einfluss. Infolgedessen wurden die Untersuchungen am Bergwerk Prosper-Haniel wie folgt angegangen:

- Konkretisierung der technischen Anforderung für die Realisierung eines möglichst leistungsstarken Pumpspeicherkraftwerkes im Bergwerk Prosper-Haniel im Ruhrrevier
- Beurteilung der Wirtschaftlichkeit vor dem Hintergrund der Marktdynamik im Energiesektor inklusive einer Beitragsbewertung zur Reduzierung der Ewigkeitslast aus dem Bergbaufolgebetrieb
- Abschätzung und Quantifizierung umweltrelevanter und energiepolitischer Auswirkungen
- Entwicklung von Konzepten zur Sicherstellung der Arbeits- und Betriebssicherheit
- Ermittlung der gesellschaftlichen und politischen Akzeptanz im Untersuchungsgebiet inklusive eines Stakeholderdialogs zu den regionalwirtschaftlichen und strukturpolitischen Chancen



(1) Prinzipskizze eines untertägigen Pumpspeicherwerkes (UPSW) und weitere Komponenten der energetischen Folgenutzung bergbaulicher Infrastruktur.
Quelle: Katrin Schmuck

• Ermittlung von Maßnahmen und Kosten zur Optionssicherung inklusive der rechtlichen Rahmenbedingungen und einer Bewertung des Rechtsrahmens
• Industriebeteiligung und Betreibermodelle

Für die Bearbeitung der vielfältigen Fragestellungen des Verbundvorhabens hat sich ein Konsortium von elf Partnern aus fünf Einrichtungen zusammengeschlossen, dies getreu dem Motto „aus der Region für die Region". Beteiligt sind die Ruhrgebietsuniversitäten aus Duisburg-Essen und Bochum, der Bergbaubetreiber RAG AG, der Bergbauconsultant und -spezialist DMT GmbH und Co. KG sowie in Fragen der Akzeptanz beziehungsweise der Politikberatung das Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung e.V. (RISP), einem An-Institut der Universität Duisburg-Essen. Insgesamt arbeiteten rund 50 Expert*innen gemeinsam an der Bewertung. Die Bergaufsicht, die Projektgruppe „Erneuerbare Energien", die Energieagentur sowie die zuständigen Referate der beteiligten Ministerien waren projektbegleitend eingebunden. Nachstehend erfolgt eine deutlich verkürzte Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse.

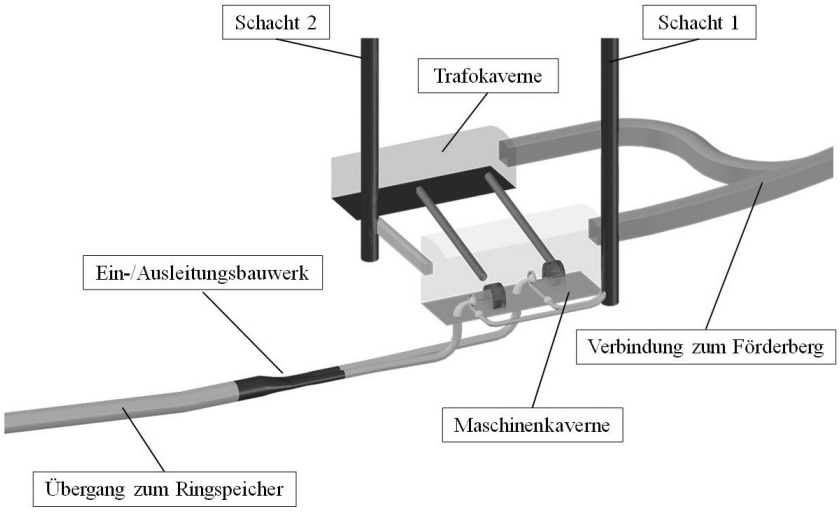
Die Ergebnisse – Was geht? Was geht nicht? Und was ist sonst noch wichtig?

Für die Erarbeitung des technischen Konzepts für ein untertägiges UPSW erfolgte vorlaufend eine Bewertung sämtlicher Anlagen in den beiden Bergwerken Auguste Victoria (Marl) sowie Prosper-Haniel (Bottrop). Bereits stillgelegte bergbauliche Anlagen sind nicht für ein UPSW geeignet. In den aktiven Bergwerken ist der Zustand noch bis zum Auslaufen des Bergbaus im Jahre 2018 zuzüglich der benötigen Rückbau- und Schließungszeit von drei bis vier Jahren gemäß Rahmen-/Abschluss betriebsplan exakt bekannt. Dies ist für die Speicherkonzeption besonders bedeutend. Mit diesem bestehenden Wissen des Bergbaus zur Lagerstätte wurden dauerhaft standsichere und verfügbare/nutzbare Komponenten für eine Folgenutzung durch ein UPSW ermittelt.

Es wurden zunächst verschiedene Konzepte untersucht. Grundsätzlich waren dabei zu unterscheiden:
• Geschlossenes System (definiertes Ober- und Unterbecken)
• Offenes System unter Nutzung der Grubenwasserhaltung (Bedarf an Laufwasser beziehungsweise Anbindung an ein Gewässer, Hebung und Einleitung des eingespeicherten Wassers an anderer Stelle)

In der Gesamtbewertung ist das geschlossene System zu bevorzugen. Das offene System enthält Unwägbarkeiten.

Für die Prüfung der technischen Machbarkeit wurde im Weiteren ein Beispielkonzept aufgestellt und technisch bewertet. So wurde am Standort Prosper-Haniel eine



(2) Konzept zur Anordnung der untertägigen Anlagen des UPSW Prosper-Haniel.
Quelle: André Niemann, Jan Balmes

200 MW-Anlage mit 835 MWh Kapazität (4h) verortet und konzipiert. Die Anlage nutzt vier bestehende Schachtanlagen als Zugang zur Tiefe. Der erforderliche untere Speicher wird als langgesteckter Ringspeicher oberhalb der zukünftig angeordneten Grubenwasserhaltung kontrolliert neu aufgefahren. Eine Nutzung bestehender Strecken scheidet aus, da die Ertüchtigung derartiger Strecken aufwändiger wäre als die kontrollierte neue Herstellung. Insgesamt wurde die grundsätzliche Machbarkeit einer solchen Anlage bestätigt. Aufgrund der geologischen Rahmenbedingungen im Ruhrrevier mit Störzonen und stark wechselhafter Lagerung bestehen Limitierungen in der Anlagengröße.

Die erforderlichen Investitionen wurden in ihrer Bandbreite ermittelt. Dem gegenübergestellt wurde die Erlössituation bei unterschiedlichen Marktteilnahmen. Im Ergebnis wurde nachgewiesen, dass ein untertägiges PSW aktuell nicht wirtschaftlich ist. Dies gilt jedoch aktuell für alle PSW. Dennoch sind Speicher erforderlich und somit Marktänderungen oder energiepolitische Anpassungen notwendig. Die Investitionskosten hängen maßgeblich vom Ausbau des unteren Speichers ab.

Der rechtliche Rahmen für ein untertägiges UPSW wurde bewertet. Es ergibt sich im Grundsatz kein gesetzgeberischer Handlungsbedarf. Die Anlage könnte aller Voraussicht nach in der Kombination Bergrecht und Wasserrecht auf Basis des bestehenden Rechtsrahmens genehmigt werden. Bedeutend ist dabei unter anderem der Bergbauabschluss mit eigener vorlaufender Planfeststellung.

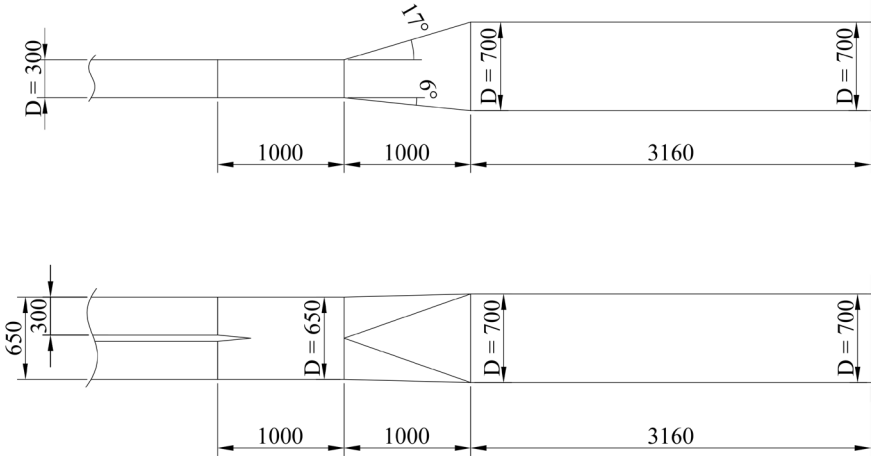
Die bestehenden Kompetenzen der obersten Bergbehörde könnten ebenfalls zielführend eingebunden werden.

Mittels einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage wurde eine erhöhte grundsätzliche Akzeptanz für eine derartige Gestaltung der Bergbaufolge festgestellt. Dieser Aspekt ist ausdrücklich hervorzuheben, da dies in klassischen PSW-Projekten oftmals nicht der Fall ist. Es ist zu vermuten, dass insbesondere die bereits vorhandene Erschließung der Standorte und der damit einhergehende geringe Landschafts- und Flächenverbrauch Gründe für diese Akzeptanz liefert. Eine erhöhte Akzeptanz im Vergleich zu konventionellen Energieanlagen ist ebenfalls festzustellen. Dabei wurde bei der Bevölkerungsumfrage das geschlossene System gegenüber dem offenen System präferiert.

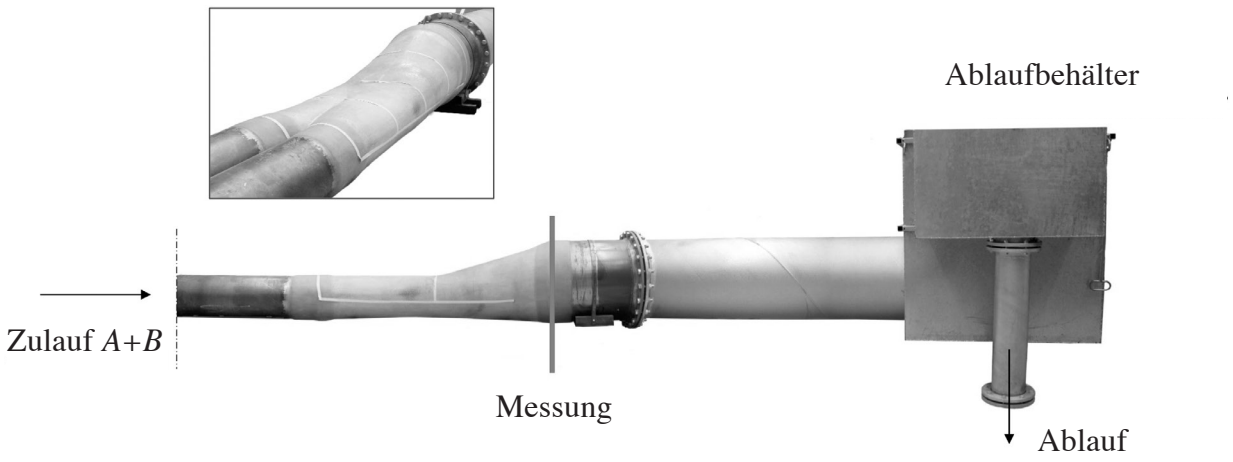
Die Anbindung des UPSW an das Übertragungsnetz kann aufgrund der hohen Netzdichte in NRW und insbesondere im Ruhrgebiet über kurze Distanzen erfolgen. Die erforderlichen Trassen befinden sich im Nahbereich am Standort. Auch dies wird im Hinblick auf eine mögliche Realisierung als Vorteil gewertet.

Wasser hat Kraft – Nachweis mittels Strömungssimulation

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden umfangreiche Detailbetrachtungen einer technischen Realisierung durchgeführt. Dies insbeson-



(3) Seitenansicht der Modellgeometrie, in Millimetern.
Quelle: André Niemann, Jan Balmes



(4) Gestreckte Seitenansicht des physikalischen Modellversuchs.
Quelle: André Niemann, Jan Balmes

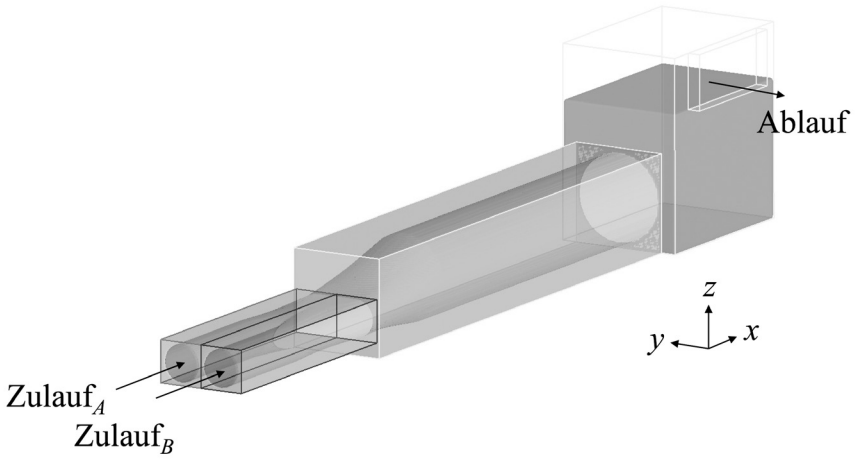
dere bei der Geologie und Gebirgsmechanik, aber auch im technischen Konzept und den hydraulischen Grundfunktionen. Nachstehend werden nun beispielhaft einige vertiefte Betrachtungen zur Hydraulik erläutert.

So ist das untertägige Ein- und Ausleitungsbauwerk ein für die Arbeiten unter Tage maßgebliches Bauteil. Es ist im Konzept in der Abbildung (2) dargestellt. Die untersuchte Geometrie befindet sich zwischen der Maschinenkaverne, die über zwei Maschinensätze verfügt, und dem unteren Ringspeicher. Für die Analyse der hydraulischen Situation und für die Ermittlung der baulichen Rahmenbedingungen wurden ein physikalisches und ein numerisches Modell im Maßstab 1:10 erstellt. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die numerische Simulation mit Hilfe von gemessenen Geschwindigkeitsprofilen zu validieren. Diese Vorgehensweise wird auch hybride Simulation genannt. Hierzu wurde zunächst die Modellgeometrie mittels durchgeführter Untersuchungen mit Betrachtung der Rohrdurchmesser und des Öffnungswinkels der Rohraufweitung bestimmt. Das Ergebnis zeigt Abbildung (3). Bei einem Maßstab von 1:10 hat das Bauteil, beginnend beim Hosenrohr und endend am Ablauf, eine Gesamtlänge von 5,16 Metern. Die beiden Zulaufrohre haben einen inneren Durchmesser von d_{Zulauf} = 300 mm und werden zu einem Rohr mit $d_{Ringspeicher}$ = 700 mm, dem Durchmesser des Ringspeichers, zusammengeführt. Die Aufweitung hat auf der oberen Seite einen Öffnungswinkel von 17 °, an der unteren Seite von 6 ° und an beiden Flanken von 1,4 °.

Die Abbildung (4) zeigt eine verzerrte, gestreckte Fotografie des physikalischen Modellversuchs in der Versuchshalle des Instituts. Der Durchfluss in den zwei Zulaufrohrleitungen kann im Versuchsaufbau mit Hilfe von magnetisch-induktiven Durchflussmessungen eindeutig definiert werden. Diese sind im Vorlauf der Rohre installiert. Für die Fließgeschwindigkeitsmessungen innerhalb des Prototyps wird der Vectrino von NORTEK AS verwendet. Hierbei handelt es sich um einen hochauflösenden akustischen Doppler, der es erlaubt, Geschwindigkeiten in allen drei Dimensionen aufzunehmen.

Für die dreidimensionale numerische Strömungssimulation wurde die Software FLOW-3D von Flow Science Inc. verwendet. Die Geometrie wird mit dem Programm Autodesk Inventor erstellt und in FLOW-3D importiert. Abbildung (5) zeigt das mit der FAVOR-Methode gerenderte Modell, inklusive des initialen Wasserkörpers. Für die Berechnungen werden drei hydraulische Randbedingungen vergeben. Zwei beschreiben mittels Durchflussganglinien die Zuflüsse der Zulaufrohrleitungen A und B, während die dritte Randbedingung einen freien Ausfluss am Ablauf festlegt. Um akkurate Resultate zu erzielen, beträgt die Zellgröße des Rechennetzes d_{xyz} = 1 cm. So können Geometrie und Strömungsprozesse bei einer adäquaten Rechendauer gut abgebildet werden. Die Anzahl der fluidgefüllten Zellen beträgt rund 2,3 Millionen. Der Turbulenzberechnung liegt das RNG-k-epsilon-Modell zu Grunde.

Die Untersuchungen am physikalischen Modellaufbau beschränken sich auf den Turbinenvorgang. In einem ersten Schritt werden zwei Regellastfälle unter stationären Bedingungen analysiert. Der Lastfall 100/100 beschreibt den maximalen Durchfluss, wobei jeder Zulauf auf 100 Prozent Durchfluss eingestellt wird, was einem Q_{A+B} = 126,6 l/s entspricht. Für den Lastfall 100/50 wird der Durchfluss des Zulaufs B auf 50 Prozent reduziert (Q_A = 63,3 l/s, Q_B = 31,2 l/s). Um die Fließge-



(5) Numerische Modellgeometrie, gerenderte Darstellung (FAVOR-Methode).
Quelle: André Niemann, Jan Balmes

schwindigkeitsprofile aufzunehmen, wird der Vectrino unmittelbar nach der Aufweitung bei x = 2,05 m eingeführt. Mit einem Intervall von 5 cm werden Werte vom oberen Rand (z = 0,65 m) bis zum unteren Rand (z = 0,05 m) des Rohres gemessen. Die zu vergleichenden Geschwindigkeiten werden aus FLOW-3D mit einem Intervall von 1 cm exportiert.

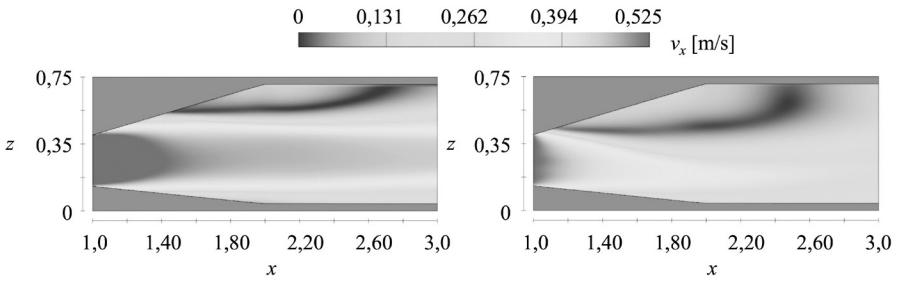
Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind in Abbildung (6) dargestellt. Der Längsschnitt durch die Mitte des Modells zeigt die Aufweitung und den folgenden Meter des Rohrs mit vollem Durchmesser. Die Strömungsfelder beider Lastfälle beschreiben signifikante Rückströmungen im oberen Bereich der Aufweitung. Wegen des Öffnungswinkels von 17 ° kann das Fluid der Wandung nicht folgen, was zu Druckverlust führt.

Die Diagramme in Abbildung (7) stellen die ersten Vergleiche der Geschwindigkeitsprofile bei x = 2,05 m dar. Das Ergebnis zeigt, dass der Hauptverlauf der Geschwindigkeitsverteilung für beide Lastfälle übereinstimmt. Im oberen Bereich des Rohrs kommt es zu Rückströmungen oder Geschwindigkeiten, die gegen Null laufen. Die höchsten Werte treten, wie zu erwarten, auf Höhe der Zulaufrohre auf. Hier liegen die Geschwindigkeiten zwischen 0,3 und 0,5 m/s. Während die dargestellten Kurven der numerischen Simulation glatt verlaufen, zeigen die Kurven der Labormessungen diskontinuierliche Verläufe. Als Ursache hierfür kann angenommen werden, dass die Strömung im physikalischen Modell nicht gänzlich stationär ist.

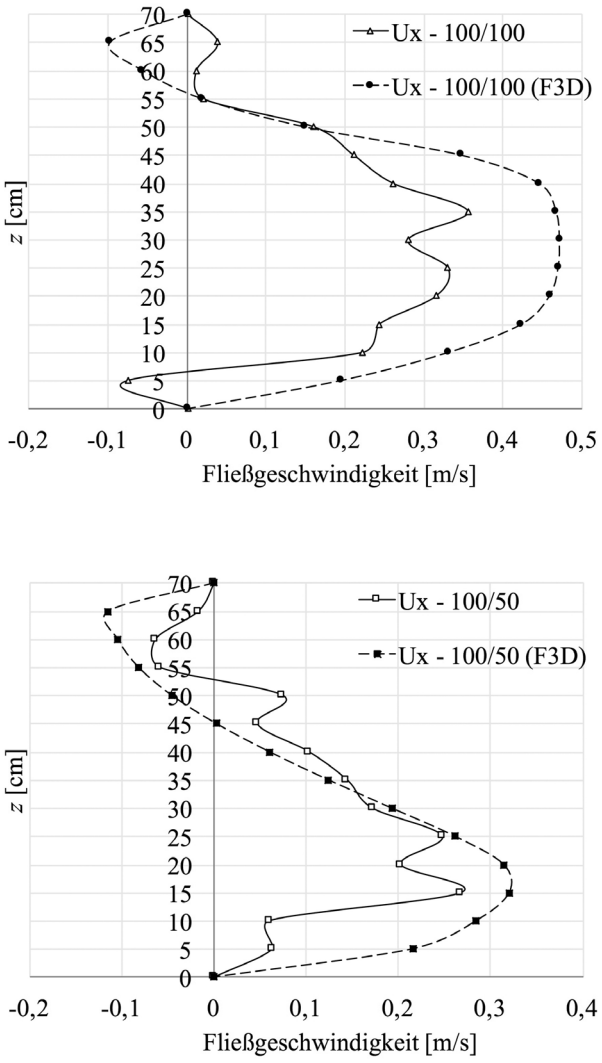
Ein Vergleich zwischen physikalischem und numerischen Modell gibt Erkenntnisse über das Strömungsbild innerhalb des Einlaufbauwerks. Für die Validierung der hydrodynamischen Computersimulation sind weitere Messungen an zusätzlichen Profilen nötig. Diese werden aktuell durchgeführt. Im Anschluss daran sind weitere Untersuchungen mit Hilfe der Numerik anzustellen, wie zum Beispiel ausgewählte Betriebszustände, wie zum Beispiel der simultane Pump- und Turbinenvorgang, wie auch weitere instationäre Prozesse. Mittels der Auswertung der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeiten können die Druckverhältnisse und Turbulenzen in den jeweiligen Betriebszuständen analysiert werden. So können letztlich Empfehlungen für das Implementieren des Bauteils in ein untertägiges Pumpspeicherwerk gegeben werden. Ziel ist es, ein hydrodynamisch und wirtschaftlich optimiertes Bauteil abzuleiten, das eine hohe Effizienz und einen sicheren Betrieb garantiert.

Akzeptanz und Region

Die gesellschaftliche Akzeptanz von Großprojekten hat einen wesentlichen Einfluss auf die Realisierbarkeit. Projekte, die ohne Zustimmung oder gegen den Willen der Öffentlichkeit durchgeführt werden, sehen sich zumeist massivem Widerstand ausgesetzt. Im Zuge einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung hat das Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung das Vorhaben zu untertägiges Pumpspeicherwerk hinterfragt. Hierzu hat es mittels einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung den Informationsstand und die Akzeptanz in der Region abgefragt [4]. Ergebnis dieser Befragung war, dass der Projektansatz bereits bei knapp 40 Prozent der Bevölkerung bekannt war. Hier zeigt sich im Allgemeinen bereits das verstärkte Interesse der Bevölkerung zum Thema Folgenutzung des Bergbaus. In der gleichen Befragung wurde zudem abgefragt,



(6) Ergebnisse der numerischen Simulationen, Fall 100/100 (links) und Fall 100/50 (rechts).
Quelle: André Niemann, Jan Balmes



(7) Vergleich der Fließgeschwindigkeitsprofile in x-Richtung, Fall 100/100 (oben) und Fall 100/50 (unten).
Quelle: André Niemann, Jan Balmes

ob untertägiges Pumpspeicherwerk als sinnvoll erachtet werden. So bewerteten mehr als 80 Prozent der Befragten das Projekt als sinnvoll. Dies ist ausdrücklich hervorzuheben, da diese Akzeptanz in klassischen PSW-Projekten oftmals nicht mehr gegeben ist. Als Begründung für diese erhöhte Akzeptanz können unter anderem die bereits erschlossenen Standorte und der geringe Landschafts- und Flächenverbrauch angeführt werden. Dieses Ergebnis bezeugt die zu erwartende hohe Akzeptanz in der Bevölkerung für eine sinnvolle Folgenutzung der bestehenden Infrastruktur des Steinkohlebergbaus in der Region. Aktuell erfolgt eine Befragung der Akteure der Region (Stakeholder-Analyse) und eine Diskussion mit der Politik, der Fachöffentlichkeit sowie potentiellen Betreibern. Der Arbeitsprozess ist nach wie vor offen angelegt und gibt stets Raum für Ideen Dritter. Die positive Haltung gegenüber Pumpspeicherwerken und insbesondere auch gegenüber der untertägigen Variante zeigt sich auch in einer Reihe von Gesprächen mit Politiker*innen sowohl auf der Landes- als auch auf der kommunalen Ebene. Über die verschiedenen Fraktionen und politischen Ebenen hinweg wurde die Machbarkeitsstudie zu unterirdischen Pumpspeicherwerken positiv und als innovativer Weg bewertet. Gleichermaßen wird die Realisierung eines unterirdischen Pumpspeichers nicht nur bedeutend für das Gelingen der Energiewende bewertet, sondern auch für die Region als Standort der Umweltwirtschaft.

Ausblick und internationale Dimension

Nie waren fossile Ressourcen so nachgefragt wie heute. Der Bergbau fördert in globaler Dimension Kohle, Erze oder seltene Erden mehr als je zuvor in der Erdgeschichte. Aber es ist auch eine Trendumkehr zu beobachten. Weg von der fossilen Energieerzeugung, hin zu emissionsarmen Lebensstilen, wobei hier insbesondere das Thema Luftverschmutzung und Gesundheitsprävention mehr und mehr Treiber für diese Entwicklung werden. International kommen in zunehmendem Maße ehemals kohlebasierte Regionen in den Strukturwandel und so ist es folgerichtig, dass das Thema „post-mining landscapes“ sich zu einer eigenen auch wissenschaftlichen Disziplin entwickelt. Die Europäische Union hat jüngst 41 Regionen in Europa identifiziert, die diesen Status in den nächsten 15 Jahren erreichen werden. Hier kann insbesondere das Ruhrrevier mit dem langen Abschied von der Kohle und den zahlreichen Erfahrungen und Pilotprojekten mit reichlich Know-how beitragen. Und so ist das auch bei einer Folgenutzung als untertägiges Pumpspeicherkraftwerk einzuordnen. Aus der andauernden und umfassenden medialen Berichterstattung resultierte ein breites nationales und internationales Interesse. So begleiteten Delegationen aus Kohleländern Europas wie Polen, der Slowakei, Belgien und Frankreich das Vorhaben. International waren Delegationen aus China,

Südkorea, Australien und den USA vor Ort. Die Gründe sind offensichtlich. Der Ausstieg aus der Kohleförderung ist global von Interesse: Weltweit existiert keine derartige Anlage. Die Anlage hätte somit eine weitreichende Sichtbarkeit im Kontext einer aktiven Gestaltung einer Bergbaufolge – unabhängig von der Region, die sich der Bergbaufolge widmet.

Summary

The implementation of renewable energies and their increasing integration into the power supply of Germany is currently a primary task of the country's energy policy. However, the problem of energy storage itself has not yet been solved. Besides new energy storage technologies like wind energy-based hydrogen production or new batteries or even conventional Pumped Hydro Storage (PHS) facilities, the Underground Pumped Hydro Storage (UPHS) concept represents another possibility for energy storage.
Due to the coal mining history of the Ruhr area in Germany, the last mine in the Ruhr area, Prosper-Haniel, will stop its black coal mining in 2018. 200 years of mining activities will then become history in this region. In general, this mining infrastructure may feasibly be used for energy storage concepts. Thus, the mine Prosper-Haniel has been analyzed for becoming a follow-up facility as an underground pumped-hydro electrical storage project. The developed concept is based on newly introduced storage tunnels deep in the earth which can hold approximately 600,000 m³. The conditions make it a suitable location for storing large amounts of energy for short periods of time, which contributes to the balance of the regional energy grid. Despite the potential of this existing network of tunnels, the future post-mining underground water levels will compromise its use, and therefore alternative options to create a new storage structure have been proposed.
There is also an enormous energy potential since the vertical hydraulic head could be up to 600m inside the existing shafts and their surrounding infrastructure. This head is sufficient to operate the pumped hydro storage with small to medium volumes of water. Facilities of this type have not yet been developed or realized, therefore an assessment of feasibility and economic viability needs to be carried out.
The new storage ring structure (underground reservoir), which consists of drilling 15.5 km of new tunnels, takes advantage of existing shaft infrastructure. It offers about 835 MWh for each production cycle (4h) in the system with a total power capacity of 200 MW.
The ongoing research describes the most relevant aspects for developing the project, considering construction, geotechnical, geological, and energy market restrictions. For the evaluation of feasibility and the identification of requirements, an interdisciplinary research group has been formed. This group consists of expert researchers from the areas of hydraulic engineering, geology, geotechnical engineering, energy economics and social science. Such a group works in close cooperation with the coal mine owner RAG AG. Besides the RAG AG, there are further departments of the University of Duisburg-Essen, departments of the Ruhr-University of Bochum, the mining consultancy DMT GmbH and the social research institute RISP involved.
The main results concern the technical and economic feasibility of using the existing mine infrastructure for the potential development of an underground pumped-hydro storage facility. The assessment of the Prosper-Haniel mine is a pilot study which could be used for future assessments of intended underground pumped-storage facilities in post mining situations. For further information please visit: www.upsw.de

Danksagung

Unser Dank gilt ausdrücklich den zahlreichen beteiligten Einrichtungen, Fördergeber*innen und Unterstützer*innen, welche die Bearbeitung dieses interessanten und perspektivischen Projektes erst ermöglicht haben. So arbeiteten zeitweilig mehr als 50 Expert*innen, Wissenschaftler*innen und projektbegleitende Institutionen an der Konkretisierung dieser faszinierenden Vision. Ohne deren Engagement und deren Einsatz würden diese Ergebnisse so nicht vorliegen. Nachstehend finden sich eine Zusammenstellung der besonderes hervorzuhebenden Einrichtungen sowie die Vorhabensnummern, unter denen auch die Gesamtergebnisse dokumentiert wurden/werden.

• Projekt „Unterflur-Pumpspeicherwerke – Nutzung von Anlagen des Bergbaus zur Speicherung regenerativer Energien"; Stiftung Mercator, MERCUR, Förderkennzeichen: Pr-2011-0022
• Projekt „Entwicklung eines Realisierungskonzeptes für die Nutzung von Anlagen des Steinkohlebaus als unterirdische Pumpspeicherkraftwerke"; MKULNV NRW, Projektträger ETN, Förderkennzeichen: PRO 0039, NRW-EU Ziel 2-Programm 2007–2013
• Projekt „Machbarkeit eines untertägigen PSW am Bergwerk Prosper-Haniel in Bottrop in der Bergbaufolge"; MKULNV NRW, Projektträger ETN, Förderkennzeichen: PRO 0063, BMWi, Projektträger Jülich, Förderkennzeichen 03E T6100

Projektbegleitende Institutionen:
• Energie.Agentur NRW, Bezirksregierung Arnsberg, zahlreiche Beteiligte aus der Wirtschaft

Aktuelle Projektpartner:
• Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Duisburg-Essen, Universitätsstr. 15, 45141 Essen, Prof. Dr.-Ing. André Niemann (Projektleitung)
• Fachgebiet Geologie, Universität Duisburg-Essen, Universitätsstr. 5, 45141 Essen, Prof. Dr. Ulrich Schreiber
• Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung e.V., Universität Duisburg-Essen, Heinrich-Lersch-Str. 15, 47057 Duisburg, Joachim Liesenfeld
• Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE), Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner
• RAG Aktiengesellschaft, Im Welterbe 10, 45141 Essen, Robin Ballewski
• DMT GmbH & Co. KG, Am Technologiepark 1, 45307 Essen, Tobias Friedrich

Anmerkungen/Literatur

1) Dymek, T.: Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen des Betriebs von Pumpspeicherkraftwerken. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (2013), Nr. 5, S. 270–275.
2) Eckart, M. et al.: Prognose der Flutungsauswirkungen im Steinkohlenbergbau. In: Glückauf 142 (2006), Nr. 6.
3) Fischer, P.: Erneuerbare Energien dank Bergbauressourcen. In: Steinkohle 2011 – Energie für neue Wege. Gesamtverband Steinkohle e.V., VGE Verlag GmbH (2013) ISSN 0343-7981, S. 52–56.
4) Grunow, D.; Liesenfeld, J.; Stachowiak, J.: Die Bevölkerung des Ruhrgebietes und der Emscher-Lippe Region im Klimawandel – Ergebnisse der repräsentativen Bevölkerungsbefragung 2012. Dynaklim-Kompakt (2012), Nr. 11.
5) J. Binias, Dreidimensionale Strömungssimulation und Optimierung der Geometrie eines Ein-/Ausleitungsbauwerkes für den Unterwasserspeicher eines Unterflurpumpspeicherwerkes, in: 16. JUWI-Treffen: Fachbeiträge zur Tagung vom 30. Juli - 1. August 2014/Dittrich, A. (Hrsg.), Braunschweig, 2014, pp. 91–98.

Der Autor

André Niemann studierte zunächst Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft an der Technischen Universität Hannover, von wo er dann als Promotionsstipendiat im DFG-Graduiertenkolleg „Urbaner Wasserkreislauf“ an die damalige Gesamthochschule Essen wechselte. Dort promovierte er im Jahre 2000 am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft zu Fragen der Schädigung des hyporheischen Interstitials (Lückensystem an der Gewässersohle) kleiner Fließgewässer durch Einleitungen aus der Siedlungsentwässerung. Im Anschluss daran wechselte er in die Privatwirtschaft, wo er beim Ingenieurbüro Dahlem Beratende Ingenieure, Essen, zunächst als Projektingenieur und -leiter, dann als Geschäftsbereichsleiter und schließlich als Prokurist bundesweit wasserwirtschaftliche Großprojekte plante und umsetzte. Im Jahre 2010 wurde er auf die Professur „Wasserbau und Wasserwirtschaft“ an die Universität Duisburg-Essen berufen. Dort widmet er sich im Schwerpunkt den Fragen zur nachhaltigen gewässerverträglichen Wasserkrafterzeugung, der Entwicklung urbaner Gewässer unter besonderer Berücksichtigung von Morphodynamik und ökologischer Durchgängigkeit sowie des Gewässergütemanagements. International arbeitet er an Fragen zur globalen Wasserkrise und dem nachhaltigen Wasserressourcenmanagement. André Niemann ist Vorstandsmitglied im Zentrum für Wasser- und Umweltforschung (ZWU) der UDE und in zahlreichen Fachgremien der Dachverbände DWA und BWK tätig. Seit 2013 ist er Nachhaltigkeitsbeauftragter der UDE. In dieser Funktion koordiniert er im Rahmen des Nachhaltigkeitsprozesses (NaPro) die Ausrichtung von Forschung, Lehre und Betrieb der Universität Duisburg-Essen hin zu mehr gesellschaftlicher Verantwortung.

Ulrich Schreiber. Foto: Vladimir Unkovic

Kein Mensch kann die unendlich erscheinende Zeitspanne ermessen, die das biologische Leben auf unserem Planeten umfasst. Dennoch ist es möglich, fast von Beginn an die Auswirkungen des letzten gemeinsamen Vorfahrens aller Lebewesen zu verstehen. Allein es fehlt die Kenntnis seines Ursprungs.

Der Ursprung des Lebens

„Die“ Herausforderung der Wissenschaft

Von Ulrich Schreiber, Oliver J. Schmitz und Christian Mayer

Eine der kompliziertesten Fragen der Wissenschaft lautet, wie ist das Leben entstanden. Die Kompliziertheit erklärt sich sehr schnell. Das Leben umfasst unser gesamtes irdisches Weltbild, welches in seiner Komplexität so weit entwickelt ist, dass einfache Betrachtungen fast unmöglich scheinen. Für die Entwicklung bis zum Jetzt war Zeit notwendig, eine Zeit, die jeden menschlichen Erfahrungshorizont unendlich weit übersteigt. Vielleicht 3,5 bis 3,8 Milliarden Jahre oder mehr. Dieser erforderliche Zeitraum, notwendig für die Entwicklung eines biologischen, denkenden Wesens, macht den Zugang zum Verständnis über die ersten Schritte bis zum Heute so schwer verständlich. Wenig ist bekannt über die Bedingungen der frühen Erde. Wie war die Atmosphäre zusammengesetzt, wann gab es wieviel Wasser, Berge, Seen? Welchen Einfluss hatte der Mond nach seiner Bildung? Nicht ohne Grund klingt in vielen Äußerungen früherer Forscher zu diesem Thema die resignierende Aussage an, dass es vermutlich nie gelingen wird, die zum Leben führenden Prozesse jemals zu erkennen.

Lange bevor es LUCA gab (Last Universal Common Ancestor), der letzte gemeinsame Vorfahre aller lebenden Einzeller, Pflanzen, Pilze und Tiere, inklusive Menschen, muss es eine fortwährende Produktion von Molekülen gegeben haben, die die notwendigen Bausteine für das Experiment Leben bereitstellten. Bausteine allein reichen aber nicht. Benötigt wurden Räume, in denen die Versuche zum Zusammenbau komplexerer Verbindungen ablaufen konnten. Räume, in denen die Konzentration der Moleküle so hoch war, dass sie sich überhaupt treffen und miteinander reagieren konnten, eine große Anzahl von kleinsten Laboratorien, untereinander verknüpft, mit wechselnden Bedingungen, Materialnachschub und Müllabfuhr für nicht brauchbare

Bestandteile. Unter solchen Bedingungen muss sich die biologische Zelle LUCA gebildet haben, das erfolgreichste System, das jemals auf der Erde entstanden ist. Von ihr ausgehend wurde fortan die Erde in eine einzigartige Entwicklung geführt. Angefangen von der Atmosphäre, Verwitterung, Erosion und Sedimentation, über Bodenbildung, Bewuchs und tierischen Aktivitäten bis schließlich zu allem, was der Mensch verändert und geschaffen hat. Alles was wir heute auf der festen Erdoberfläche sehen, ist letztlich das Ergebnis der erfolgreichen Vermehrung von LUCA.

Warum forschen wir an einem so weit zurück liegenden Ereignis?

Neugier ist eine wesentliche Eigenschaft des Menschen, die eine der Hauptursachen für die dynamische Entwicklung der Spezies ist. Wenn sich der Nebel, der über dem Ursprung liegt, lichtet, bleibt weniger Raum für Spekulationen über die Bedeutung des Lebens und letztlich die des Menschen. Seit der Mensch abstrakt denken kann, beschäftigt ihn die Frage des „Woher" und des „Wohin". Erst wenn das „Woher kommen wir?" verstanden ist, lassen sich Fragen wie das „Wohin gehen wir?" oder „Warum existieren wir?" fundierter diskutieren. Aber neben der mehr philosophischen Sichtweise gibt es grundlegende Interessen von Seiten der Biochemie, Pharmazie und Medizin, die mit der Kenntnis der ersten Schritte des Lebens einen völlig neuen Zugang für das Erkennen heute stattfindender Prozesse in den Zellen bekommen werden.

Werden die Vorgänge in lebenden Körpern betrachtet, tut sich eine extrem komplizierte, auf das feinste abgestimmte Welt chemischer und physikochemischer Prozesse auf, die noch weit davon entfernt ist in ihrer Gesamtheit aufgeschlüsselt zu werden. Nur wenige Spezialist*innen sind in der Lage, einzelne Schritte in der Vielfalt der Reaktionen zu verstehen. Dennoch lassen sich Grundprinzipien mit Modellen aus der technischen uns vertrauten Welt erkennen. Alles was in einer Zelle an Reaktionsschritten abläuft, ist eingebunden in zwangsläufig aufeinander folgende Reaktionen, die jeweils die nächsten Schritte vorgeben. Als Vergleich kann ein Spielzeug dienen, bei dem eine Kugel an der höchsten Stelle einer Rollbahn eingesetzt wird und die vorgegebene Bahn in zahlreichen Windungen durchläuft. Hierbei stößt sie andere Kugeln an, die wiederum zur Seite in eigenen Bahnen rollen und dort weitere Kugeln mit jeweils zugehörigen Rohrleitungen, Kanälen oder Rinnen in Gang setzen. Unterwegs werden Schalter und Mechanismen passiert, die spezielle Funktionen starten. Das Ganze wird jeweils beendet, wenn die Kugeln ihr tiefstes Niveau erreicht haben. An dieser Stelle ist Energie von außen nötig, um sie wieder in ihre Ausgangsposition zu bringen. Jede Aktion an einer der Kontaktstellen oder Schalter kann nur dann stattfinden, wenn vorher genau die Abfolge der Kugelbewegungen erfolgt ist, die zur weiteren Reaktion notwendig ist. Was in dem komplizierten Spielkasten mechanisch abläuft, erfolgt in der Zelle nacheinander durch chemische Reaktionen. Fällt eine Reaktion aus, das würde dem Verklemmen einer Kugel auf ihrem Weg nach unten entsprechen, bricht die Folge ab und das System stirbt. Was wir heute sehen, ist in Anlehnung an dieses Rollbahnmodell eine unendliche Anzahl verzweigter Bahnen, auf denen ständig Bewegung durch rollende Kugeln stattfindet. Die Energie, die notwendig ist, um die Kugeln immer wieder in ihre höchsten Positionen zu bekommen, wird durch gezielte Aufnahme von außen in Form von Nahrung gedeckt.

Aus der heutigen Anzahl an Rollbahnen und deren Abhängigkeiten zueinander auf die Anfänge dieses System zu schließen, ist bisher nicht gelungen und erscheint unmöglich. Gesucht wird die erste Bahn mit der ersten Kugel, nach der sich alle weiteren Bahnen entwickelten. Hierbei muss es nicht in Zahlen zu beziffernde Versuche gegeben haben, diese erste Bahn mit immer neuen Varianten zu kombinieren. Nur die einzelne Kombination, die eine Fortschreibung des Prinzips erlaubte, blieb erhalten. Alle anderen Ansätze wurden zwangsläufig abgebrochen.

Die Rohstoffe

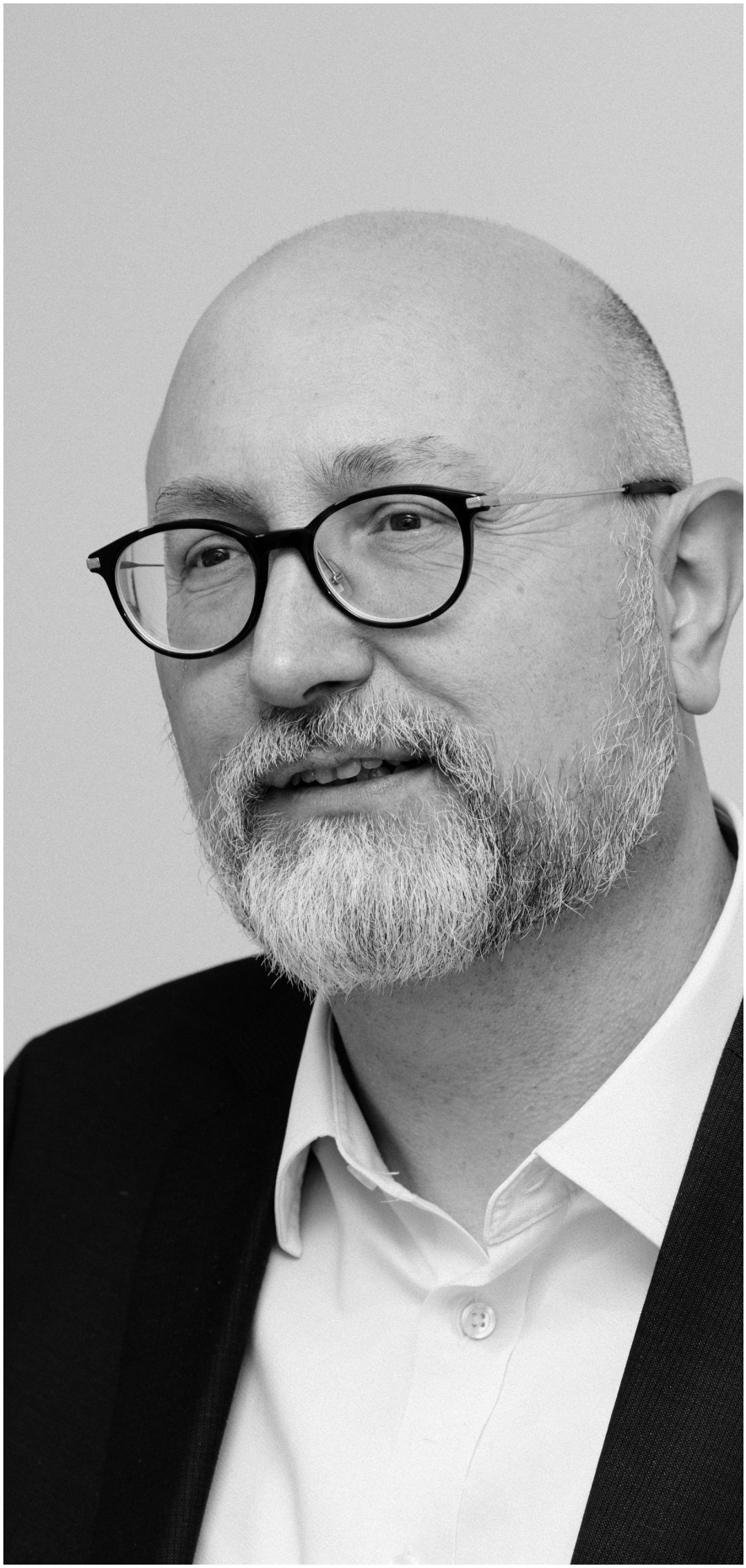
Das Verständnis zum Entstehen des Lebens lässt sich am leichtesten gewinnen, wenn Beispiele aus der uns bekannten technischen Welt herangezogen werden. Am ehesten bietet sich hierfür die Entwicklung der Fortbewegungsmittel an. Lange bevor es das erste Auto gab, wurden in verschiedenen Teilen der Welt Erfahrungen mit Werkstoffen, speziell dem Eisen oder auch mit Substanzen wie Erdöl und später Gummi arabicum gewonnen. Das Rad als technisches Hilfsmittel, Kabel für Elektrizität, Blech- und Glastechnik für Gehäuse und Scheiben, die Kenntnisse zu all diesen Komponenten waren erforderlich, um das erste Auto zu bauen. Material und Kenntnisse mussten an einer Stelle konzentriert zur gleichen Zeit zusammengeführt werden. Schnell mutierten die primitiven ersten Fahrzeuge zu leistungsfähigen Autos. Parallel drängten die Motoren in andere Transportmittel, in Schiffe, Flugzeuge, U-Boote oder Motorräder. Die Evolution in der Technik, gesteuert unter anderem durch das Kaufverhalten und politische Vorgaben, führte zu immer diffizileren Produkten. Die, die nicht mithalten konnten, wurden vom Markt genommen. Die Evolution der Tierwelt führte in ähnlicher Weise zur Inbesitznahme der Räume Wasser, Land und Luft.

Das Analogon aus der Technik zeigt auf, dass die für eine Zelle notwenigen Moleküle nicht an der Stelle gebildet werden mussten, an der sie für komplexere größere Komponenten gebraucht wurden. Notwendig waren das Zusammenführen in einem Reaktionsraum und

das Ansammeln zu einer Konzentration, die überhaupt erst notwendige Reaktionen ermöglichte. Es ist nicht vorstellbar, wieviel Reaktionsversuche notwendig waren, um die ersten funktionsfähigen Teile der „biologischen Rollbahn“ zu erhalten. Sicher ist jedoch, dass es eine ständige Zufuhr von Komponenten gegeben haben muss, mit denen experimentiert werden konnte, ohne ein Defizit zu erzeugen. Andererseits entstanden aus den Fehlversuchen nahezu zu 100 Prozent Abfallprodukte, die beseitigt werden mussten. Eine zu hohe Konzentration organischer Moleküle führt zu einem Ersticken der Reaktionsprozesse. Dieser Vorgang wurde erst in jüngster Zeit erkannt und wird als Teerproblem bezeichnet [1].

Die Historie

Die bis hier aufgezeigten Aspekte sind das Ergebnis vorangegangener Forschungen zum Thema Entstehung des Lebens. Während die älteren Arbeiten eher theoretische Ansätze verfolgten, gab es mit einem der bekanntesten Experimente der Wissenschaft einen ersten Hinweis auf die Möglichkeit, unter den Bedingungen der frühen Erde tatsächlich Bausteine des Lebens zu erhalten. Durchgeführt wurde das Experiment von den Chemikern Stanley Miller und Harold C. Urey. In einer Versuchsanordnung, bei der eine angenommene Uratmosphäre elektrischen Entladungen ausgesetzt worden war, gelang es ihnen, aus Methan und anorganischen Verbindungen Aminosäuren und einfache Fettsäuren zu gewinnen [2]. Für eine weiterführende Betrachtung gab es viele Probleme, die unter anderem mit der Unsicherheit der Zusammensetzung der Atmosphäre und den viel zu geringen Konzentrationen der entstandenen Moleküle in einem Urozean zusammen hingen. Aus diesen Gründen wurden zahlreiche weitere Möglichkeiten für die Herkunft organischer Moleküle gesucht und unterschiedlichste



Oliver J. Schmitz. Foto: Vladimir Unkovic

Ansätze hierzu veröffentlicht. Prominente Beispiele sind die Entstehung organischer Moleküle im Weltall und deren Transport zur Erde durch Meteoriten [3], ihre Bildung in heißen Tümpeln oberhalb des Meeresspiegels [4] oder im Umfeld von Weißen oder Schwarzen Rauchern [5]. Dabei handelt es sich um erst seit einigen Jahrzehnten bekannte hydrothermale, metallsulfidbeladene Quellen auf dem Grund der Ozeane. Zahlreiche Reaktionen in Verbindung mit mineralischen Oberflächen von Tonen oder Eisensulfiden (Pyrit) wurden untersucht. Sie alle brachten interessante Teilergebnisse, die zeigten, dass auf der Ur-Erde eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Entwicklung organischer Verbindungen bestand. Allerdings waren es bisher immer singuläre Ansätze, denen eine Anbindung an das Gesamtprojekt Zelle fehlte. So wurde zum Beispiel das Problem der Molekülkonzentration unter dem Aspekt der Eisbildung untersucht. Kleinste Flüssigkeitsreste können während des Gefrierprozesses in die aus Süßwasser bestehenden Eiskristalle eingeschlossen werden und hohe Konzentrationen der im Ausgangswasser vorhandener Substanzen erreichen. Allerdings fehlt auch hier die Antwort auf die Frage, wo und wie die notwendigen Moleküle entstanden und ob sie überhaupt im Wasser vorlagen.

Die Forschung an der Universität Duisburg-Essen

Die Probleme und Fragezeichen, die sich aus den bisherigen Modellvorstellungen zur Entstehung des Lebens ergeben haben, führten zu Überlegungen, einen bisher völlig außer Acht gelassenen Raum für diese Thematik zu betrachten: tiefreichende, wassergefüllte Bruchzonen der kontinentalen Erdkruste. Auslöser waren Untersuchungen zu speziellen tektonischen Strukturen in der Eifel in den Jahren nach der Jahrtausendwende. Dort wurden Seitenverschiebungen gefunden, die senkrechte, bis in den Erdmantel reichende Bruchzonen darstellen. Sie bilden vielerorts Kanäle zur Tiefe, aus denen auch heute noch Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoff (N_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Spurengase (Ammoniak, NH_3, Wasserstoff, H_2, Edelgase) austreten. An ihnen stiegen Magmen auf, die an der Oberfläche als Laven ausflossen und die quartären Vulkane der West- und Osteifel speisten. Die Bruchzonen sind mit Fluiden, mineralisierten Wässern und Gasen gefüllt. Sie stellen hydrothermale Systeme mit deutlich zunehmenden Temperaturen und Drucken zur Tiefe dar. In ihnen kristallisieren Minerale wie Quarz oder Kalzit, die die Öffnungen einengen oder ganz verschließen. Erdbebenaktivitäten mit geringsten Stärken halten diese Bahnen offen, sodass über Zeiträume von zehn oder hunderter Millionen Jahre ein ständiger Stoffaustausch gegeben ist.

Irgendwann kam die Frage auf, ob die heutigen Verhältnisse nicht teilweise auch auf die junge Erde mit bereits ersten gebildeten kleineren Kontinenten übertragen werden kann. Die kontinentale Kruste ist von besonderer Bedeutung. Sie ist heute im Durchschnitt 30 Kilometer mächtig, sehr inhomogen aus einer großen Vielfalt an Gesteinstypen aufgebaut und kühler als die ozeanische Kruste. Bei letzterer liegen die Mächtigkeiten von wenigen Kilometern nahe der ozeanischen Rücken bis etwas über zehn Kilometer in den alten Krustenteilen nahe der Subduktionszonen. Eine plausible Abschätzung der kontinentalen Krustenentwicklung zeigt, dass vor vier Milliarden Jahren bereits 25 Prozent der heutigen kontinentalen Kruste vorhanden war [6]. Die restliche äußere Hülle der Erde bestand aus einer wenige Kilometer mächtigen ozeanischen Kruste. Das heißt, sie war ausschließlich aus basaltischem Gestein zusammengesetzt und wesentlich heißer als die kontinentale Kruste. Diese hatte im betrachteten Zeitraum allerdings einen höheren geothermischen Gradienten, der vielleicht doppelt so hoch war wie der heutige. Auf jeden Fall gab es einen ausreichend hohen Anteil kontinentaler Kruste, die aus tektonischen Gründen Bruchzonen besessen haben musste. Sie wurden

(1) Hochdruckanlage zur Simulation von Verhältnissen innerhalb der Erdkruste bis 10 km Tiefe. Die eigentliche Hochdruckzelle befindet sich in dem schwarzen Zylinder links von der Bildmitte. Sie erlaubt die kontinuierliche Beobachtung von Reaktionen sowie die Zugabe und Entnahme von Substanzen bei einem konstanten Druck von bis zu 1.000 bar. Quelle: Ulrich Schreiber, auf dem Bild zu sehen ist Dr. Maria Davila Garvin

wie die heutigen als Aufstiegswege für Gase und Magmen genutzt.

Die heutigen Seitenverschiebungen zeichnen nur ein schwaches Abbild der Situation, wie sie bei Bruchzonen der jungen kontinentalen Kruste vorhanden gewesen sein musste. Ein wesentlicher Anteil der atmosphärischen Gase wurde von Beginn an durch diese Störungszonen aus dem Mantel abgegeben. Sie waren die Ausgangssubstanzen der organischen Chemie. Das bedeutet, dass die Rohstoffe für die biologische Entwicklung in einer unbegrenzten Menge zur Verfügung standen. Hierzu gehören Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoff, Wasserstoff, Ammoniak oder auch Schwefelverbindungen. In der technischen Chemie werden mit Hilfe der Fischer/Tropsch-Synthese unter hohen Drucken und Temperaturen aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff langkettige organische Moleküle hergestellt (z.B. für Benzin). Verschiedene metallische Katalysatoren sorgen für eine hohe Ausbeute bei der Reaktion. Gleiche Voraussetzungen sind und waren in der Erdkruste vorhanden. Die Bruchzonen sind rau und bieten eine hohe Zahl an kleinen Vorsprüngen und Taschen, in denen sich aufsteigende Gase sammeln können. Gase nehmen ab einer spezifischen Temperatur und einem spezifischen Druck einen besonderen Phasenzustand ein. Sie werden überkritisch, ihre Dichte beträgt etwa die Hälfte von der einer Flüssigkeit. Für CO_2 findet der Übergang in der Kruste ab etwa 750 Metern Tiefe statt. Darunter verhält sich das überkritische CO_2 wie ein organisches Lösungsmittel, das gleichzeitig eine sehr niedrige Oberflächenspannung besitzt. In ihm können unpolare organische Substanzen gelöst werden, die im Wasser nicht löslich sind. Da die Dichte von überkritischem CO_2 geringer ist als Wasser, steigt es aus der Tiefe in Form von Tropfen auf und transportiert Moleküle zur Oberfläche, die unter höheren Drucken und Temperaturen gebildet wurden. Sammeln sich diese Tropfen in den Taschen und Vorsprüngen der Störungszone, entstehen jedes Mal kleine Autoklaven. In ihnen und besonders an der Grenzfläche zum Wasser sind Reaktionen möglich, die im Wasser allein nicht stattfinden können. Zwischen 1.000 und 750 Metern Tiefe, je nach Dichte der überstehenden Wassersäule, werden die überkritischen CO_2-Tröpfchen unterkritisch. Es entsteht CO_2-Gas, eine neue Phase, in dem die organischen Bestandteile nicht mehr in Lösung gehalten werden können. Die Substanzen fallen aus und konzentrieren sich in der verbliebenen wässrigen Lösung und in ebenfalls vorhandenen kleinen Autoklaven an der Grenzfläche von Wasser zu Gas. In der Gasphase bilden sich kleine, durch oberflächenaktive Bestandteile stabilisierte Wassertropfen, die an der Grenze zur wässrigen Phase in zellähnliche Gebilde (Vesikel) übergehen. Diese wiederum reichern weiteres organisches Material in ihren Membranen an.

(2) Ca. 3 Mia. Jahre altes Sedimentgestein (Konglomerat) mit hydrothermalen Quarzgeröllen, Jack Hills, Australien.
Quelle: Ulrich Schreiber

Ein entscheidender Rohstoff für die Bildung der RNA oder DNA ist Phosphor beziehungsweise Phosphat. Phosphat verbindet sich an der Erdoberfläche mit Kalzium zu dem schwerlöslichen Mineral Apatit und steht möglichen organisch-chemischen Entwicklungen nicht mehr zur Verfügung. Die kontinentale Kruste ist aus verschiedensten Gesteinen aufgebaut, in denen Apatit teilweise als Hauptmineral vorkommt. Kommt Apatit mit heißen hydrothermalen Lösungen in Kontakt, löst es sich auf und liefert somit den notwendigen Rohstoff, der als Rückgrat der RNA und DNA eine Schlüsselfunktion besitzt. Somit sind in tiefreichenden, gasführenden Bruchzonen alle erforderlichen Ausgangsstoffe in großer Menge verfügbar. Sie können in unterschiedlichen Tiefen mit unterschiedlichen Druck/Temperaturbedingungen und pH-Werten zu größeren Molekülen reagieren, mit aufsteigenden Fluiden transportiert und in einer schmalen Zone aufkonzentriert werden. Dass Lipide, Aminosäuren und organische Basen unter hydrothermalen Bedingungen gebildet werden können, ist bereits durch Experimente belegt.

Versuche

Es wird deutlich, dass die Störungszonen der kontinentalen Kruste mit Kontakt zum Erdmantel ideale

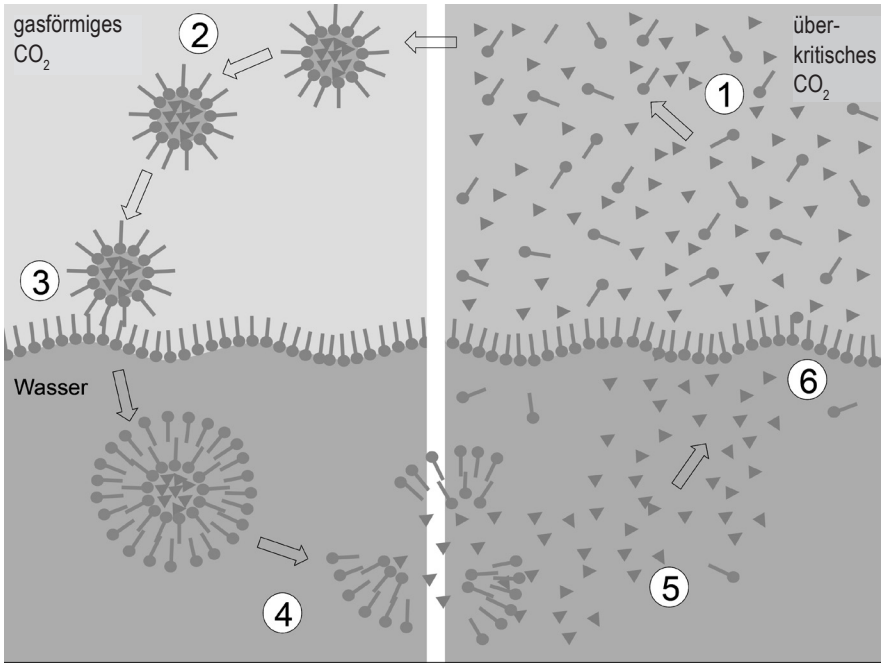
Voraussetzungen für organisch-chemische Reaktionen bieten. Von Vorteil ist weiterhin, dass die Verhältnisse über sehr lange Zeiträume, Zehner Millionen Jahre, stabil sind, keine zerstörerische UV-Strahlung auftritt und Meteoriteneinschläge geringen Einfluss haben. Bedingungen, die man an der Erdoberfläche vergeblich sucht. Es liegt nahe, dass mit der Kenntnis relativ gut definierter Rahmenbedingungen Experimente durchgeführt werden können, die Zugang zu einzelnen Entwicklungsschritten für die Entstehung des Lebens ermöglichen. Aus diesem Grund wurde an der Universität Duisburg-Essen eine Hochdruckanlage angeschafft, mit der in einer Reaktionskammer Bedingungen der Verhältnisse simuliert werden können, wie sie in den obersten zehn Kilometern der kontinentalen Kruste auftreten (Abb. 1). Die Kammer wird für die Experimente zur einen Hälfte mit Wasser befüllt, die andere Hälfte mit CO_2, das bis in den überkritischen Zustand komprimiert wird. Hineingegeben werden organische Moleküle wie Fettsäuren, Aminosäuren oder RNA-Bausteine, je nach Fragestellung und verfügbarer anschließender Analysemöglichkeit.

Die Rückkopplung

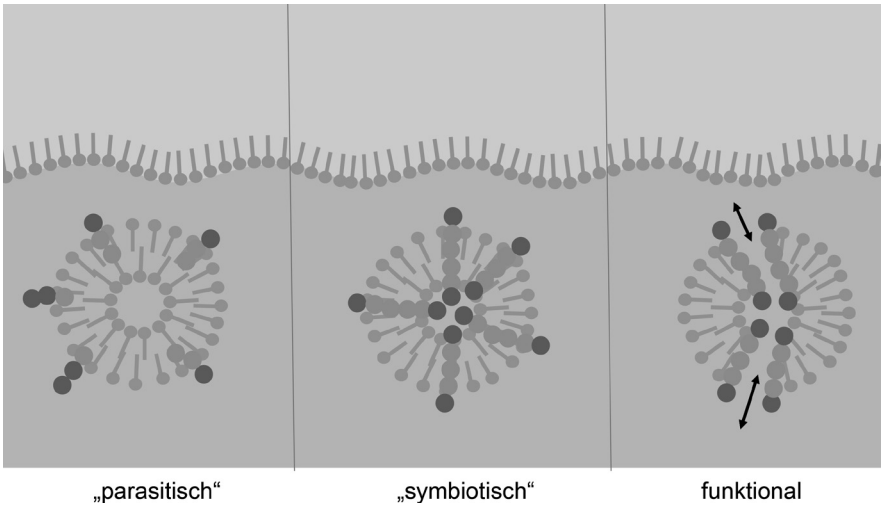
Aus hydrothermalen Lösungen kristallisieren in der Erdkruste bei Abkühlung Minerale wie zum Beispiel Quarz aus, die mit genügend Raum zum Wachsen gut ausgebildete Bergkristalle bilden. Sind sie milchig trüb, enthalten sie Flüssigkeitseinschlüsse, die aus dem Wasser-Gas-Gemisch bestehen, wie es zur Zeit des Wachstums in der Zone vorhanden war. Aus diesen Überlegungen wird deutlich, dass es „eingefrorene" Dokumente über die organische Chemie in hydrothermalen Quarzen geben muss, die aus der Zeit stammen, in der sie kristallisiert sind. Je älter die Quarze sind, desto mehr nähert man sich der Zeit, in der es noch keine biologische Aktivität an der Erdoberfläche gab. Aus diesem Ansatz heraus wurden in zwei Geländekampagnen in Australien präkambrische Quarze beprobt, um deren Flüssigkeitseinschlüsse auf organische Komponenten zu analysieren. Besonders interessant waren hierbei Quarzgerölle eines Konglomerats, das in einer drei Milliarden Jahre alten Schichtenfolge der Jack Hills in Westaustralien vorkommt (Abb. 2). In diesem Sedimentgestein wurden bereits die ältesten Zirkone der Erde mit einem Alter von 4,3 Milliarden Jahren gefunden [7]. Die Zirkone sind wie alle Komponenten eines Sediments an anderer Stelle entstanden, später durch die Erosion freigelegt und zum Ort der Sedimentation transportiert worden. Genauso wie auch die einzelnen Quarzgerölle, deren Alter nicht näher bestimmbar ist. Bei der Analyse der Quarze besteht aber die Chance, dass neben wenig mehr als drei Milliarden Jahre alten Geröllen auch solche dabei sind, die noch vor dem Auftreten von LUCA in den Spalten kristallisierten, vielleicht vor mehr als vier Milliarden Jahren, und erst später freigelegt, abgetragen und beim Transport gerundet wurden. Können nachfolgende Kontaminationen ausgeschlossen werden, was zum Beispiel durch Kontrolle der Isotopenzusammensetzung möglich ist, liegen in diesen Quarzen Dokumente der ersten Entwicklungsschritte in Richtung organischer Chemie oder größerer Moleküle vor.

Eine genaue Analyse der Einschlüsse durch Oliver Schmitz (Applied Analytical Chemistry) an der UDE lieferte den Beleg für das Vorhandensein einer reichhaltigen organischen Chemie in dem frühzeitlichen hydrothermalen System der Erdkruste. Sie enthält langkettige Moleküle mit endständigen funktionalen Gruppen ebenso wie kleinere organische Einheiten, die in ähnlicher Form auch im Metabolismus einer lebenden Zelle auftreten. Insgesamt bilden sie die perfekte Mischung, um darauf weitere Schritte der präbiotischen Chemie aufzubauen.

Vielleicht war es Zufall, dass Proben in den Jack Hills genommen wurden, die genau diese Verhältnisse anzeigen. Vielleicht sind aber auch ohnehin die meisten der Gerölle mit einer vergleichbaren Chemie



(3) Schematische Darstellung der zyklischen Entstehung von Vesikeln in einem Wasser-CO_2-System. Details zum Ablauf sind im Text beschrieben.
Quelle: Christian Mayer



(4) Mögliche Schritte einer Selektion von Peptid-Molekülen im Sinne einer molekularen Evolution: „parasitisch“ (das Peptid ist integriert und vor molekularem Abbau geschützt), „symbiotisch“ (das Peptid ist geschützt, stabilisiert aber auch gleichzeitig das Vesikel), funktional (das Peptid stabilisiert das Vesikel weiter durch Abbau von Konzentrationsgradienten, indem es Kanäle bildet).
Quelle: Christian Mayer

ausgestattet. Eine geplante weitere Probennahme wird es zeigen. Die Flüssigkeitseinschlüsse besitzen eine erstaunlich vielfältige Zusammensetzung, die zum Teil noch deutliche Fragen aufwirft [8]. Die Analysenergebnisse besitzen für weitere Überlegungen und vor allem für die Experimente im Labor einen hohen Wert. Durch sie werden bestimmte Schritte des Modells überprüfbar, eine Möglichkeit, an die in den bisherigen Modellvorstellungen nicht zu denken war.

Das Vesikel-Experiment

Eine bislang ungeklärte Frage war die Bildung der Vesikel unter präbiotischen Bedingungen, die letztlich die Grundlage einer Zelle bedeutet. Sie vereint alle Komponenten in einem Kompartiment, die zur Reproduktion erforderlich sind. Eine erstaunlich einfache Möglichkeit zeigt sich in einem Experiment in der Hochdruckkammer (Abb. 3). Eine Mischung aus langkettigen Aminen und Fettsäuren (Stecknadelform in Abb. 3), wie sie in den Flüssigkeitseinschlüssen der hydrothermalen Quarze zu erwarten sind, werden in die Reaktionskammer überführt und unter Temperaturen und Drucken der oberen Kruste gehalten. Mit einem gesteuerten Druckverlust wechselt das vorher überkritische CO_2 in den gasförmigen Zustand (Schritte 1 und 2 in Abb. 3). Sofort bildet das im überkritischen CO_2 gelöste Wasser einen Nebel aus zahllosen Wassertröpfchen und sammelt alle organischen Moleküle ein, die nicht mehr im Gas verbleiben können. Die Amine und Fettsäuren bilden eine Hülle auf der Außenhaut und sinken langsam zur Grenzfläche des unteren Wasserkörpers (Schritt 3 in Abb. 3). Auch hier haben sich Amine und Fettsäuren in einer charakteristischen Orientierung angereichert und bilden wie ein Ölfilm auf dem Wasser eine durchgehende Bedeckung der Grenzfläche. Beim Kontakt der sinkenden Wassertröpfchen mit der Grenzfläche umschließt sofort ein Teil des Lipidfilms die ankommenden Tröpfchen mit einer zweiten Hülle (Schritt 4 in Abb. 3). Fertig ist das Vesikel, das in seinem Aufbau der Membranstruktur einer Zelle ähnelt [9]. Es besteht innen aus Wasser mit geringem ionischen und erhöhtem organischen Anteil, außen aus einer Lipid-Doppelschicht, ein Aufbau der als Grundlage einer Protozelle gelten kann. Der eindeutige Nachweis des Vesikelaufbaus gelang mit Hilfe der Kernresonanzspektroskopie (NMR) [9]. Aus den ersten Messungen ergaben sich darüber hinaus Hinweise auf Konzentrationsgradienten, die in einer späteren Entwicklung der Vesikel als Energiequelle von Bedeutung sind: Die Wassertröpfchen sammeln während der Kondensation im CO_2-Gas eine Vielzahl organischer Moleküle ein. Nach dem Absinken in das Wasser ist die Konzentration dieser Moleküle im Tröpfchen gegenüber dem umgebenden Wasser um Größenordnungen höher. Auf der anderen Seite sind in dem kondensierten Wassertröpfchen keine Salze gelöst. Das Wirtswasser in den hydrothermalen Störungszonen ist hieran aber deutlich angereichert. Aus diesen Gefällen könnte eine erste Protozelle die Energie für einen einfachen Metabolismus geschöpft haben. Die Schritte 5 und 6 in Abbildung (3) kennzeichnen den Abbau der Vesikel und den Neubeginn des Lebenszyklus.

In einem weiteren Versuch kann die Bildung und Selektion von einfachen Vorstufen von Proteinen, den Peptiden gezeigt werden. Nach Zugabe von zwölf in hydrothermalen Systemen generierbaren Aminosäuren entstehen kurzkettige Peptide, die innerhalb von Tagen bis Wochen Längen von bis zu 18 Einheiten erreichen. Von besonderem Interesse ist nun die Frage nach einer möglichen Selektion von zum Membranaufbau passenden Peptiden [10]. Ein erster längerfristiger Betrieb der Versuchsanordnungen ergab erste Hinweise, dass eine wechselseitige Beeinflussung von Vesikeln und Peptiden zu einer chemischen Evolution führt, die bereits jetzt schon zu größeren Peptid-Molekülen mit möglichen Funktionen geführt hat (Abb. 4). Die Versuchsreihe hierzu, eine der spannendsten in der Essener Origin-of-Life-Forschung, wird derzeit intensiv weiterbetrieben.

Christian Mayer. Foto: Vladimir Unkovic

Aussicht

Die begonnenen Experimente in Verbindung mit Analysen präkambrischer Quarzeinschlüsse zeigen sehr vielversprechend, dass fluidführende Bruchzonen der kontinentalen Erdkruste beste Voraussetzungen für das Experiment „Leben“ geliefert haben. Ergänzende Untersuchungen australischer Quarze können weitere Hinweise auf organisch-chemische Ausgangsstoffe liefern, die eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung des Lebens gespielt haben. Erste Hinweise auf die Existenz komplexerer Moleküle sind in den bislang untersuchten Proben bereits gefunden worden. Darauf aufbauend werden die Laborversuche gezielt auf die Fragestellung der chemischen Evolution ausgerichtet. Neben Experimenten zur Vesikel- und Peptidentstehung wird eine Versuchsreihe zur Verknüpfung von RNA-Bausteinen größeren Raum einnehmen. Hier stellt sich sofort die Frage, wie das Problem der gegenseitigen Abhängigkeit von Funktion der Enzyme und Information der Speicher (RNA, DNA) gelöst werden kann. Mit der Kenntnis der ersten grundlegenden Schritte zur Entstehung des Lebens bietet sich die Chance, schlüssige Vorstellungen zu entwickeln, die letztlich den komplexen Weg bis zum letzten gemeinsamen Vorfahren allen Lebens aufzeigen.

Summary

Research on the origin of life presents a unique challenge as it deals with a singular and possibly unique event which occurred approximately four billion years ago. Not only the processes leading to the first living cells, but even the conditions under which they evolved are inaccessible to scientific observation and therefore highly speculative. However, a single terrestrial environment is more open to detailed consideration:

the early Earth's crust. In this most outer layer of the planetary body, tectonic fault zones – systems of interconnected cracks and cavities which were filled with volatile media like water and carbon dioxide – must have existed. These systems offered large temperature and pressure gradients, a constant supply of hydrothermally formed organic compounds, and efficient protection against destructive external influences. All in all, they may have presented the ideal environment for the formation of protocells and the early stages of life. In a recent research project at the UDE, an analysis of inclusions in quartz crystals which formed in this environment exhibited a large variety of organic compounds which could have formed the basis for prebiotic chemistry. In connection with these results, experiments were performed which prove the formation of key cellular ingredients and of primitive cell-like structures under the conditions of fault zones. Moreover, the most recent experiments prove a beginning molecular evolution which can lead to stabilizing and potentially functional units in the "cell" membranes.

Anmerkungen/Literatur

1) S.A. Benner, H.J. Kim, M.A. Carrigan, „Asphalt, water, and the prebiotic synthesis of ribose, ribonucleotides and RNA. Acc. Chem. Res. 45, 2025 (2011).
2) S.L. Miller, "A production of amino acids under possible primitive earth conditions", Science 117, 528 (1953).
3) J.G. Lawless, "Amino acids in the Murchison meteorite", Geochim. Cosmochim. Acta37, 2207 (1973).
4) B.R.T. Simoneit, "Prebiotic organic synthesis under hydrothermal conditions: an overview", Adv. Space Res. 33, 88 (2004).
5) W. Martin, J. Baross, D. Kelley, M.J. Russell, "Hydrothermal vents and the origin of life", Nature Rev. Microbiol. 6, 805 (2008).
6) T.M. Harrison, A.K. Schmitt, M.T. McCulloch, O.M. Lovera, "Early (≥4.5 Ga) formation of terrestrial crust: Lu-Hf, δ18O, and Ti thermometry results for Hadean zircons", Earth Planet Sci Lett 268:476–486 (2008).
7) A.J. Cavosie, S.A. Wilde, D. Liu, P.W. Weiblen, J.W. Valley, "Internal zoning and U–Th–Pb chemistry of Jack Hills detrital zircons: a mineral record of early Archean to Mesoproterozoic (4348–1576 Ma) magmatism", Precambrian Res. 135:251–279 (2004).
8) U. Schreiber, C. Mayer, O.J. Schmitz, P. Rosendahl, A. Bronja, M. Greule, F. Keppler, I. Mulder, T. Sattler, H.F. Schöler, „Organic compounds in fluid inclusions of Archean quartz – analogues of prebiotic chemistry on early Earth", PLOS ONE 12(6): e0177570
9) C. Mayer, U. Schreiber, M.J. Dávila, „Periodic vesicle formation in tectonic fault zones – an ideal scenario for molecular evolution", Origins of Life and Evolution of Biospheres 45, 139 (2015).
10) C. Mayer, U. Schreiber, M. Dávila, "Selection of prebiotic molecules in amphiphilic environments", Life 7 (1), 3 (2017).

Die Autoren

Ulrich Schreiber studierte Geologie an der Technischen Universität Clausthal, wo er nach ergänzenden Semestern Chemie 1987 auch seine Promotion über geochemisch/vulkanologische Fragestellungen der Puna Nordwest Argentiniens abschloss. Anschließend war er Assistent und Oberassistent am Geologischen Institut der Universität Bonn. Seine Habilitation galt der Erforschung magmatotektonischer Zusammenhänge des vulkanischen Westerwaldes. 1996 wurde er zum Professor für Allgemeine Geologie an der damaligen Gesamthochschule Essen berufen. Hier übernahm er zwei Mal das Amt des Dekans im Fachbereich 9 vor, bzw. in der Fakultät für Biologie nach der Fusion sowie das des Prorektors in der finalen Phase der Fusion. Schwerpunkte seiner Forschung umfassen neben Untersuchungen zu rezenten Gasaufstiegsprozessen in der Eifel die Standorterfassung von Waldameisen auf gaspermeablen Störungszonen, die Energiespeicherung in stillgelegten Kohlebergwerken (Untertägiges Pumpspeicherwerk) sowie die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Sein besonderes Interesse liegt darüber hinaus an der Erforschung der Entstehung des Lebens.

Christian Mayer studierte Chemie an der Universität Stuttgart und der University of Cincinnati, Ohio, USA. Er promovierte im Jahr 1990 am Institut von Prof. Gerd Kothe über die Anwendung von Kernresonanz-Methoden auf biologische Membranen. Nach seiner Promotion arbeitete er abwechselnd in der Zentralen Forschungsabteilung der Fa. Hoechst AG (Frankfurt) sowie im Forschungslabor von Polymer Composites Inc. (Winona, USA). Im Jahr 1996 folgte er einem Ruf an die damalige Gerhard-Mercator-Universität Duisburg. Mit der Fusion der Universitäten Duisburg und Essen wechselte er an den Standort Essen. Als Professor für Physikalische Chemie beschäftigt er sich unter anderem mit der Anwendung von Methoden der Kernmagnetischen Resonanzspektroskopie auf Kapseln und Vesikel und seit einigen Jahren auch mit Forschung zur Entstehung des Lebens.

Oliver J. Schmitz studierte Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) und promovierte im Jahr 1997 in der Analytischen Chemie bei Prof. Siegmar Gäb. Nach seiner Promotion arbeitete er insgesamt drei Jahre an der LMU München und im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg, bevor er als wissenschaftlicher Assistent zurück an die BUW ging. Dort erhielt er 2009 einen Ruf auf eine W2-Professur für Analytische Chemie und gründete zusammen mit zwei Kollegen die Firma iGenTraX UG. 2011 wurde er einer der zwei Gründungsdirektoren des interdisziplinären Zentrums für Reine und Angewandte Massenspektrometrie bevor er dann 2012 den Ruf auf eine W3-Professur für Angewandte Analytische Chemie an der Universität Duisburg-Essen annahm. 2013 erhielt er den Gerhard-Hesse Preis für Chromatographie und beschäftigt sich in Essen mit der Analyse von komplexen Proben und der Entwicklung von Ionenquellen für die Massenspektrometrie.

ERSCHIENEN

UNIKATE-Ausgaben seit 1992

1 Medizin
Krebsforschung (1992). Federführung: Manfred F. Rajewsky. ISBN 3-934359-01-9

2/3 Kommunikation
Design (1993). Federführung: Vilim Vasata. ISBN 3-934359-02-7

4/5 Naturwissenschaft
Umweltforschung: Globale Risiken (1994). Federführung: Günter Schmid. ISBN 3-934359-04-3

6/7 Geisteswissenschaft
Fremdsein: Historische Erfahrungen (1995). Federführung: Paul Münch. ISBN 3-934359-06-X

8 Geisteswissenschaft
20 Jahre "poet in residence" (1996). Federführung: Jürgen Manthey. ISBN 3-934359-08-6

9 Bildung durch Wissenschaft?
Ein Kolloquium (1997). Federführung: Justus Cobet, Klaus Klemm. ISBN 3-934359-09-4

10 Medizin
25 Jahre Transplantationsmedizin in Essen (1998). Federführung: Friedrich W. Eigler. ISBN 3-934359-10-8

11 Naturwissenschaften
Physik: Unordnung und Selbstähnlichkeit (1999). Federführung: Fritz Haake. ISBN 3-934359-11-6

12 Wirtschaft
Die Europäische Union im Zeichen des Euro (1999). Federführung: Dieter Schmitt. ISBN 3-934359-12-4

13 Materialwissenschaft
Grundlagen für die Technik der Zukunft (2000). Federführung: Günter Schmid. ISBN 3-934359-13-2

14 Europäische Gesellschaft
Annäherung an einen Begriff (2000). Federführung: Wilfried Loth. ISBN 3-934359-14-0

15 Klinische Onkologie
Fortschritte in der Tumorbekämpfung (2001). Federführung: Herbert Rübben. ISBN 3-934359-15-9

16 Erfahrung
Über den wissenschaftlichen Umgang mit einem Begriff (2001). Federführung: Paul Münch. ISBN 3-934359-16-7

17 Design & Neue Medien
Kommunikationsgestaltung für eine global vernetzte Gesellschaft (2002). Federführung: Norbert Bolz. ISBN 3-934359-17-5

18 Wirtschaftsinformatik
Wissensmanagement und E-Services (2002). Federführung: Heimo H. Adelsberger. ISBN 3-934359-18-3

19 Umwelt Ruhr
Vitalität einer Region I (2002). Federführung: Wilfried Loth. ISBN 3-934359-19-1

20 Herz-Kreislaufmedizin
Experimentelle und klinische Kardiologie (2003). Federführung: Gerd Heusch. ISBN 3-934359-20-5

21 Geisteswissenschaften
Religion und Gewalt (2003). Federführung: Hubertus Lutterbach. ISBN 3-934359-21-3

22 Medizin
Neurowissenschaften (2003). Federführung: Dietmar Stolke. ISBN 3-934359-22-1

23 Ingenieurwissenschaft
Bauwesen - Ein Leistungsspektrum (2004). Federführung: Jörg Schröder. ISBN 3-934359-23-X

24 Bildungswissenschaften
Bildungsforschung nach PISA (2004). Federführung: Klaus Klemm. ISBN 3-934359-24-8

25 Medizin
Unsere Hormone (2005). Federführung: Klaus Mann. ISBN 3-934359-25-6

26 Germanistik
Arbeit an/in der Kultur (2005). Federführung: Rüdiger Brandt. ISBN 3-934359-26-4

27 Medizin: Immunologie
Das Immunsystem - Freund oder Feind? (2006). Federführung: C. Hardt, H. Grosse-Wilde. ISBN 3-934359-27-2

28 Neue Medien
Interaktivität und Ubiquität (2006). Federführung: Edgar Heineken. ISBN 3-934359-28-0

29 Wirtschaftswissenschaften
Empirische Wirtschaftsforschung (2007). Federführung: Walter Assenmacher. ISBN 978-3-934359-29-1

30 Essen im Blick
Ein interdisziplinärer Streifzug (2007). Federführung: Heiko Schulz. ISBN 978-3-934359-30-7

31 Ingenieurwissenschaften
Computersimulationen: Von Nano bis Giga (2007). Federführung: Dieter Hänel, Andrés Kecskeméthy. ISBN 978-3-934359-31-4

32 Naturwissenschaften
Physik: Energieumwandlungen an Oberflächen. Federführung: Dietrich von der Linde. ISBN 978-3-934359-32-1

33 Mathematik
Eine lebendige Wissenschaft (2008). Federführung: Axel Klawonn. ISBN 978-3-934359-33-8

34 Geschichtswissenschaft
Europa: Geschichte und Kultur (2009). Federführung: Wilfried Loth. ISBN 978-3-934359-34-5

35 Natur-/Geisteswissenschaften
Sterben, Tod – und dann? (2009). Federführung: Dieter Bingmann, Hubertus Lutterbach. ISBN 978-3-934359-35-2

36 Naturwissenschaften/Medizin
Kernmagnetische Resonanz (2009). Federführung: Christian Mayer. ISBN 978-3-934359-36-9

37 Naturwissenschaften/Medizin
Nano meets Bio (2010). Federführung: Günter Schmid. ISBN 978-3-934359-37-6

38 Geistes-/Gesellschaftwissenschaften
Beiträge zur „Ruhr 2010" (2010). Federführung: Jörg Engelbrecht. ISBN 978-3-934359-38-3

39 Ingenieurwissenschaften
Herausforderung Elektromobilität (2011). Federführung: Ferdinand Dudenhöffer. ISBN 978-3-934359-39-0

40 Social Sciences
Comparative, International, Transnational (2011). Federführung: Karen Shire. ISBN 978-3-934359-40-6

41 Geschlechterforschung
Blick hinter die Kulissen (2012). Federführung: Maren A. Jochimsen. ISBN 978-3-934359-41-3

42 Translationale Krebsforschung
Auf dem Weg zu neuen Therapien (2012). Federführung: Angelika Eggert. ISBN 978-3-934359-42-0

43 NanoEnergie
Materialentwicklung für eine nachhhaltige Energieversorgung (2013). Federführung: Christof Schulz, Marion Franke. ISBN 978-3-934359-43-7

44 Medizin
50 Jahre Universitätsklinikum: Highlights aus der Forschung (2013). Federführung: Gerd Heusch, Raimund Erbel. ISBN 978-3-934359-44-4

45 Fusionen
Was sagen die Fakultäten? (2014). Federführung: Ursula Renner-Henke, Patrick Eiden-Offe. ISBN 978-3-934359-45-1

46 Patente
Motivation für die Wissenschaft? (2014). Federführung: Stefanie Peschel, Oliver Locker-Grütjen. ISBN 978-3-934359-46-8

47 Globale Kooperationsforschung
Transdisziplinäre und transkulturelle Perspektiven (2015). Federführung: Tobias Debiel. ISBN 978-3-934359-47-5

48 Materials Chain
Forschung aus dem UA Ruhr-Profilschwerpunkt (2016). Federführung: Jörg Schröder, Ralf Drautz, Wolfgang Tillmann. ISBN 978-3-934359-48-2

49 Mehrsprachigkeit im Ruhrgebiet
Vielfältig und doch individuell (2016). Federführung: Katja Cantone, Anastasia Moraitis. ISBN 978-3-934359-49-9

50 Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften
High-Performance und Cloud Computing (2017). Federführung: Andreas M. Kempf, Ludwig Mochty. ISBN 978-3-934359-50-5

---

in Vorbereitung:

52 Risikoforschung
Federführung: Renate Martinsen, Andreas Niederberger

ABONNEMENT

Die UNIKATE im Abonnement

Ob im Bereich der Kommunikation, der Wirtschaft, der Medizin, der Ökonomie oder der Ökologie – im Zeitalter globaler Vernetzung sind wissenschaftliche Erkenntnisse zur entscheidenden Zukunftsinvestition geworden. Gleichzeitig führte der weltweite Zuwachs an Wissen zu immer feiner differenzierten Fächern, Disziplinen und Fachsprachen: die Wissenschaften erscheinen zunehmend unübersichtlicher und hermetischer.
Mit den UNIKATEN hat sich die Universität Duisburg-Essen die Aufgabe gestellt, Sie in verständlicher Form regelmäßig und unmittelbar aus der Forschungspraxis heraus über die aktuellen Entwicklungen in Wissenschaft und Forschung zu informieren – mit Ergebnissen und Erklärungen aus erster Hand.

ABONNEMENT

Vorname, Name _____
Straße / Postfach _____
PLZ, Ort _____
Hiermit abonniere ich die UNIKATE für 1 Jahr (2 Ausgaben) zum Preis von 12,50 € inkl. Versandkosten.
Das Abonnement verlängert sich automatisch um 1 Jahr (2 Ausgaben), wenn es nicht im laufenden Abonnementzeitraum gekündigt wird.

Bitte senden Sie mir die bereits erschienene Ausgabe
der UNIKATE zum Einzelbezugspreis von 7,50 € einschl. Porto (für Abonnenten 5,- €).

☐ Ich bin Abonnent*in.

Datum _____ Unterschrift _____

☐ Die Bestellung kann durch Mitteilung an die Heinrich-Heine Buchhandlung, Viehofer Platz 8, 45127 Essen innerhalb von 7 Tagen widerrufen werden. Es gilt das Datum des Poststempels.

☐ Datum _____ Unterschrift _____

Ich zahle per Bankeinzug zu Lasten meines Kontos Nr.

bei _____ IBAN _____

Wenn mein Konto die erforderliche Deckung nicht aufweist, besteht seitens des kontoführenden Instituts keine Verpflichtung zur Einlösung.

☐ Datum _____ Unterschrift _____

Bitte schicken Sie mir eine Rechnung. Ich überweise den Betrag. _____

Per Post oder Fax an:

Heinrich-Heine Buchhandlung · Viehofer Platz 8 · 45127 Essen · Tel.: (0201) 820700 · Fax: (0201) 8207016

☐ _____

HINWEISE

Die UNIKATE

Schon 1992 verfolgte die Universität Essen das Konzept, die Öffentlichkeit mit der Herausgabe des damals noch ESSENER UNIKATE genannten Magazins für Wissenstransfer tiefergehend über die an der Hochschule erzielten Ergebnisse in Forschung und Lehre zu informieren. In einer Zeit, in der sich Wissenschaft wie auch akademisch interessierte Leserschaft in hohem Maße ausdifferenziert haben, soll dieses Magazin für Wissenstransfer die an der Universität erarbeiteten Informationen in differenzierter Weise widerspiegeln und – klassisch aufbereitet – der Öffentlichkeit themenzentriert transparent machen.

Im Mittelpunkt jeder Ausgabe stehen die Wissenschaftler*innen der Universität Duisburg-Essen mit ihren Originalbeiträgen und -berichten. Die Ausgaben orientieren sich dabei an den Herausforderungen, vor denen einzelne Fächer gegenwärtig stehen, wie auch an aktuellen wissenschaftlichen Zeitfragen, zu denen eine Universität insgesamt und nicht zuletzt auf Grund ihres öffentlichen Auftrags Stellung beziehen sollte.

Die UNIKATE erscheinen ausschließlich in Form von Themenheften; bisher hat sich die Reihe unter anderem mit der Krebsbehandlung, der Herz-Kreislaufmedizin, den Entwicklungen im Kommunikations- und Industrial Design, den globalen ökologischen Risiken, dem Kräfteverhältnis zwischen Bildung und Wissenschaft, der Chaosphysik, den Materialwissenschaften, dem Lebensraum Ruhrgebiet, der sich herausbildenden europäischen Gesellschaft und der Bildungsforschung beschäftigt. Durch die Konzentration auf jeweils ein Fachgebiet oder ein interdisziplinär ausgeleuchtetes Thema können wissenschaftliche Sachverhalte breiter dargestellt und komplexe Zusammenhänge fächerübergreifend verständlich erläutert werden.

Die UNIKATE werden vom Rektorat der Universität Duisburg-Essen in einer Auflage von derzeit 4.500 Exemplaren herausgegeben. Ansprechpartner für alle redaktionellen Belange sowie für Vertrieb und Anzeigenverwaltung ist das SSC – Science Support Centre an der Universität Duisburg-Essen. Das Magazin ist zum Preis von 7,50 € im Buchhandel erhältlich. Im Abonnement (zwei Ausgaben pro Jahr, 12,50 €) sind die UNIKATE über die Heinrich-Heine-Buchhandlung, Viehofer Platz 8, 45127 Essen zu beziehen.

UNIKATE

IMPRESSUM

Herausgegeben mindestens zweimal jährlich vom Rektorat der Universität Duisburg-Essen, 45117 Essen.

Auflage: 4.500

Redaktions- und Verlagsanschrift:
UNIKATE
Universität Duisburg-Essen/
Wissenschaftsverlag SSC
Science Support Centre
45117 Essen
Tel.: 02 01/1 83-32 54
Fax: 02 01/1 83-46 94
E-Mail: unikate@uni-duisburg-essen.de

Wissenschaftlicher Beirat:
Prof. Dr. Eckart Hasselbrink, Prof. Dr. Jan Buer, Prof. Dr. Renate Martinsen, Prof. Dr. Christoph Marx, Prof. Dr. Ludwig Mochty, Prof. Dr.-Ing. Jörg Schröder, Prof. Dr. Astrid Westendorf

Federführung der Ausgabe 51:
Dr. Michael Eisinger, Prof. Dr. Torsten C. Schmidt, Prof. Dr. Bernd Sures
Redaktion: Dr. Barbara Bigge (verantw.)
Korrektorat: Dr. Katrin Matiss
Layout/Grafik: Paran Pour, mail@paranpour.com
Gestaltungskonzept: Prof. Vilim Vasata
Fotografie und Bildbearbeitung: Vladimir Unkovic
Druck: Pomp, Bottrop
Buchhandels- und Abonnementvertrieb: Heinrich-Heine-Buchhandlung, Viehofer Platz 8, 45127 Essen; Tel.: 02 01/820 70-0; Fax: 820 70-16; E-Mail: heine.buchhandlung@t-online.de

Einzelverkaufspreis (Buchhandel): 7,50 €
Abonnement (2 Hefte/Jahr, inkl. Versand): 12,50 €
Die UNIKATE finden Sie im Internet unter:

www.uni-duisburg-essen.de/unikate

Gedruckt auf chlorfreiem Papier.

Nachdruck und Reproduktion von Text, Fotos und Grafiken nur nach Abstimmung mit der Redaktion. Die Redaktion bemüht sich regelmäßig, die Rechteinhaber von veröffentlichten, jedoch nicht selbst erstellten Bild- und Grafikbeiträgen zu ermitteln und die Rechte abzugelten. Bei nicht zu ermittelnden oder inkorrekt angegebenen Nachweisen bitten wir um Nachsicht. Alle Rechte vorbehalten.

ISBN: 978–3–934359–51–2
ISSN: 1869–3881

© Universität Duisburg-Essen
Gerichtsstand: Essen

DuEPublico
Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN
Offen im Denken

ub | universitäts bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/70349
URN: urn:nbn:de:hbz:464-20201015-145846-3

Alle Rechte vorbehalten.