



# Mikroschadstoffe aus Abwasser entfernen

## Mit neuen Konzepten zu wirksamen Lösungen

Katrin Schuhen<sup>1</sup>, Michael Sturm<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Wasser 3.0 / abcr GmbH,

<sup>2</sup>Karlsruher Institut für Technologie, Engler-Bunte-Institut (EBI), Chair of Water Chemistry and Water Technology,

Deutschland ist das europäische Land, in dem am meisten Abwasser wiederaufbereitet wird. Über 96 Prozent des Abwassers aus privaten Haushalten und öffentlichen Einrichtungen wird in nahe gelegene Kläranlagen geleitet und gereinigt. Doch was passiert, wenn die Belastungen durch Mikroschadstoffe stetig zunehmen, komplexer werden, wissenschaftlicher Anspruch hinter den Lösungen zu Verschmutzungssituationen hinterherhinkt und Innovationen am Markt blockiert werden oder erst gar nicht den Markt erreichen?

### Bekommen wir in naher Zukunft ein Problem mit der Wasserqualität?

Trinkwasser ist unser wichtigstes Lebensmittel und nach der Atemluft das wichtigste Stoffgemisch. Ohne die in Deutschland nahezu flächendeckende kommunale und industrielle Abwasserentsorgung würde es uns nicht in konstant guter Qualität zur Verfügung stehen. Auch stellt die Abwasserentsorgung in Deutschland einen wichtigen Wirtschaftszweig dar, der sich, mit einem stets hohen Investitionsvolumen ausgestattet, in einem permanenten Modernisierungsprozess befindet. Die Wasserwirtschaft ist ein Beschäftigungsmotor im Bereich des Mittelstandes und des Anlagenbaus und trägt zur Stabilisierung der Arbeitsmarktsituation bei. Maßgeblich trägt sie zu einer Verbesserung des Umwelt- und Naturschutzes bei. [1]

Seit Jahren wird die Abwasserwirtschaft mit der kontinuierlichen Veränderung in den Konzentrationen von Mikroverunreinigungen in Wässern konfrontiert. Be-



Abb. 1: Kennzahlen der Wasserwirtschaft [2–6].

reits jetzt werden in Gewässern die gesetzlich vorgegebenen Umweltqualitätsnormen immer wieder überschritten. Zur Reduzierung der Einträge reichen die derzeit möglichen Vermeidungsmaßnahmen wie Anwendungsbeschränkungen oder -verbote über Stoffrecht, Produktrecht und Verminderung von Emissionen nicht aus. Maßnahmen zur Abwasserbehandlung unterliegen dem gesellschaftlichen Druck, Lösungen finden zu müssen, um langfristig die hohe Wasserqualität bereitstellen zu können. Erfolgsversprechend sind eine nachgeschaltete Abwasserbehandlungstechnik oder eine gezieltere Vermeidungsstrategie am Entstehungs- und Eintragsort von Mikroschadstoffen. Hierbei liegt der Fokus auch auf Strategien, um die Mikroschadstoffe in ihrer Gesamtheit (organisch, anorganisch, gelöst, suspendiert), Komplexität (verschiedene Stoffgemische zu unterschiedlichen Zeiten und Mengen) und auch in hohen Konzentrationen (z.B. im industriellen Umfeld oder in Sickerwässern) aus dem Wasser zu entfernen.

Innovative Ansätze lassen sich bereits heute im Rahmen der nachgeschalteten vierten Reinigungsstufe in kommunalen Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 oder bei kleineren Kläranlagen, die in sensitive Gewässer einleiten, jedoch nicht flächendeckend, finden. Ebenso ist die kontinuierliche Verbesserung der Detektion von Mikroschadstoffen und der daraus abgeleiteten variablen Handlungsoptionen in einem modular adaptiven Prozess ein Thema. Hier ergeben sich gänzlich neue Möglichkeiten, unmittelbar auf diverse Verschmutzungsszenarien zu reagieren und Prozesse durch den Einsatz variabler Material-Verfahrens-Kombinationen passgenau und gezielt zu steuern.

**Lösungsorientierte Handlungsfähigkeit und -schnelligkeit sind die Kernthemen einer innovativen Wasserwirtschaft.**

Ozonierung und Aktivkohleadsorption durch Pulveraktivkohle oder granuliert Aktivkohlen sind aktuell die Verfahren der vierten Reinigungsstufe mit der höchsten Sichtbarkeit. Hinsichtlich ihrer

Wirksamkeit sowie Energie- und Kosteneffizienz liegen unterschiedliche Meinungen und Einschätzungen vor. Aufgrund der beschränkten Möglichkeiten für Prozessadaptionen und -optimierungen weisen beide Verfahren sehr starke Limitierungen hinsichtlich ihrer tatsächlichen Entfernung von Mikroschadstoffen auf [7]. Ein Beispiel für ein gravierendes Defizit liegt bei den durch Ozon induzierten Radikalkettenreaktionen von Mikroschadstoffen [8]. Die Ozonierung führt zwar zu einem Abbau von chemischen Verbindungen. Es ist jedoch nahezu unmöglich, einen Radikalkettenmechanismus innerhalb eines komplexen Gemisches unterschiedlicher Stoffe zu steuern. Weder eine Reproduzierbarkeit noch eine zeitnahe, analytische Abbaukontrolle oder chemisch eindeutige Identifikation der entstandenen Produkte sind hierbei gegeben. Insgesamt gesehen, ist es ein wenig effizienter Gesamtprozess.

Hinzu kommen die mangelnden Erkenntnisse über die (Öko-)Toxizität der Abbauprodukte innerhalb der Ozonierung. Nur weil (öko-)toxische Ausgangsverbindungen wie z.B. Medikamente oder Medikamentenrückstände nicht mehr im Ablauf detektiert werden, heißt es nicht, dass die durch die Ozonierung entstandenen Abbauprodukte nicht weniger giftig sind, oder dass der Abbau der Mikroschadstoffe im (Ab-)Wasser zu einer verbesserten Wasserqualität führt.

Hinsichtlich der adsorptiven Verfahren ist zu berücksichtigen, dass es auf der Oberfläche auch zu Desorptionsprozessen und Konkurrenzreaktionen kommt. Die rein physikalischen Prozesse sind in einem hydrophilen Medium wie Wasser nicht steuerbar. Die eingesetzten Aktivkohlen können nicht allein auf Mikroschadstoffe adaptiert werden, sondern reagieren mehr oder weniger nach „Lust und Laune“. Es bleibt auch hier ein nicht reproduzier- und regelbarer physikalischer Anhaftungsprozess. Dieser liefert in bestimmten Zeitfenstern zwar gute Werte für die Elimination bestimmter gelöster organisch-chemischer Mikroschadstoffe im wässrigen Milieu.

Durch die genannten Konkurrenzreaktionen kommt es jedoch oftmals zu einer Elimination von meist weniger toxischen, weniger mobilen oder Aktivkohle-zugeneigten Substanzen. Folglich ist auch dieser Prozess, bezogen auf das Ziel der Verbesserung der Wasserqualität, aufgrund seiner Starrheit und dem fehlenden Adaptionsvermögen des Prozesses sowie der Tatsache, dass auch in diesem Verfahren die analytischen Kontrollen (Einzel- und Summenparameter-Vergleich) der Adsorptionsleistungen der eingesetzten Materialien hinter dem Wasserreinigungsprozess zeitlich hinterherhinken, gründlich zu hinterfragen [7].

**Für neue Entwicklungen der Abwasserbehandlung gilt es verfahrenstechnische Grenzen zu berücksichtigen, diese jedoch nicht als reines Hindernis zu betrachten (rethink-Konzept).**

Die industrielle und kommunale Abwasserreinigung kann dort wirken, wo andere Vermeidungs- bzw. Verminderungsstrategien nicht ausreichen bzw. ausgereicht haben und die Belastungen mit Mikroschadstoffen zum Teil sehr hoch sind. Hier finden sich Mikroschadstoffe in Form einer unspezifischen und meist sehr komplexen Abwassermatrix oder in hohen Konzentrationen als Einzel- oder Mischverbindungen [9–12]. Durch die Modifikation bestehender oder durch Neubau zusätzlicher Reinigungsstufen können Prozesse hinsichtlich der Belastungen mit Mikroschadstoffen optimiert und effizienter gestaltet werden.

Die technologisch effizienteste Lösung richtet sich nach der jeweils vorliegenden Wasserzusammensetzung und Belastung mit Mikroschadstoffen. Vor dem eigentlichen Implementierungsschritt einer dauerbetriebenen Anlage ist es entscheidend, die Effizienz in vorge-schalteten Pilotierungsphasen zu testen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Der Reinigungserfolg ist in jedem Einzelfall gegenüber den Zielen des Ressourcen- und Klimaschutzes abzuwägen. Maßnahmen zur Entfernung von Mikroschadstoffen erfordern in der Regel Investitionen und hohe Betriebs-

aufwände (Energie-, Sach- und Personalkosten), die sich auf die Abwassergebühren der Bürger auswirken.

### **Das rethink-Konzept – Schritt für Schritt zur Lösung**

Eine integrierende Perspektive auf die diversen Herausforderungen der Abwasserreinigung liefert das rethink-Konzept. Es beschreibt die passgenaue Abstimmung von Verfahren, Methoden, Prozessen und Anwendungen vor Start der Entwicklungsarbeiten. Expertenwissen neu zu denken bildet den Kernpunkt des Konzepts. Experten werden interdisziplinär eingesetzt, um übergreifend zu hinterfragen sowie hands-on und zielorientiert innovative Lösungen zu entwickeln. Deren Umsetzung unterliegt den Anforderungen, effizient, nachhaltig und ressourcenschonend zu sein.

Das rethink-Konzept basiert auf den Grundlagen des „cradle-to-cradle (c2c) Prinzips“ (von der Wiege in die Wiege). Nach den Vorbildern der Natur geht es um die Verwirklichung des perfekten Kreislaufs mit dem Ziel bestenfalls keine Abfälle zurückzulassen.

### **cradle-to-cradle (c2c) – Exkurs**

Die Vision und das Ziel von c2c gehen auf Michael Braungart, einen Chemiker, zurück, der dieses zusammen mit dem US-amerikanischen Architekten William McDonough im Jahr 2002 entwickelte. Es beinhaltet das stete Denken in Kreisläufen. Der Name entstand in Abgrenzung zum momentan gelebten, linearen Prinzip der Produktion „von der Wiege zur Bahre“ („cradle-to-grave“). Der Weg eines Rohstoffs endet mit seiner Vernichtung in der Müllverbrennung oder auf der Deponie. c2c sieht neben dem ersten Nutzen eines Rohstoffs auch dessen Verwendung nach der Nutzung vor. Kostbare Ressourcen werden nicht verschwendet, sondern wiederverwendet. Der c2c-Ansatz schließt die umweltfreundliche Produktion und die Nutzung von erneuerbaren Energien mit ein. So werden der biologische und der technische Kreislauf mit einbezogen. Jeder Part des Kreislaufs sollte ein in sich geschlossener Prozess sein. Konsequenz umgesetzt bedeutet die Vision von

Michael Braungart nichts anderes als eine Revolution unserer Produkte und Verfahren – vom Produktdesign, der Herstellung und der Nutzung bis hin zur Rücknahme. Das Resultat wäre ein – zumindest weitestgehend – perfekter Kreislauf.

### **rethink und c2c – wenn aus Wünschen und Erwartungen, Lösungen entstehen**

Das rethink-Konzept auf die Entfernung von Mikroschadstoffen in der Wasserwirtschaft anzuwenden, bedeutet Material- und Verfahrens-Lösungen mit folgenden Charakteristika zu entwickeln: wissenschaftlich fundierte Erhebung von Statusdaten (IST-Analyse), Experten-Diskurs, übergreifende Perspektive auf die Wertschöpfungskette, Technologie-Unabhängigkeit, Pilotierung in Anlagen direkt am Ort der Wirkungsentfaltung, Adaptierbarkeit aller Verfahrensschritte.

Durch modulare Bausteine können passgenaue Lösungen erarbeitet werden, um die Wasserqualität wieder herzustellen und zu optimieren. Die Materialien basieren auf Mischkomponenten, deren Hauptbestandteil Silizium-organische Verbindungen sind. Die Technologie wird in mobilen Container-Lösungen verbaut, was die Handlungsschnelligkeit, die einfache Logistik und die schnelle Ermöglichung von Testläufen mit sich bringt. Das zu behandelnde Wasser wird vor und nach der Behandlung detailliert analysiert, danach eine Materiallösung konstruiert, das Wasser in Pilotanlagen behandelt und eine IST-SOLL-Analyse durchgeführt. Auf der Basis der Daten werden die ersten Lösungstests erarbeitet und in einer Testanlage mit dem zu reinigenden Ausgangswasser aus dem Prozess (z.B. kommunal oder industriell) evaluiert. In einer Anschlussphase wird der Gesamtprozess bis hin zum Dauerbetrieb optimiert und abschließend in den Dauerbetrieb überführt. Die gesamte Evaluations-Feedback-Kette bei rethink ist kurz, die Zeitschienen überschaubar, die Ergebnisse umfassend und die Kosten gering.

### **rethink am Beispiel der Entstehung und Entfernung von Mikroplastik in der Textilindustrie**

Das Problem der Umweltverschmutzung durch die Textilindustrie hat viele Entstehungspunkte entlang der gesamten Lieferketten, einschließlich Stoffdesign und Produktionsmethoden. Analysiert man den wissenschaftlichen Stand zur Bedeutung von Textilien als Mikroplastik-Quelle, erkennt man eine gewisse Uneindeutigkeit in den Daten. Die Angaben variieren beispielweise von Textilien als wichtigste Quelle, die für Emissionen von 0,5 Millionen Tonnen Mikroplastik pro Jahr verantwortlich sind, bis hin zu Textilien, die nur einen geringen Beitrag leisten [13–18]. Ebenso liefern verschiedene analytische Methode zur Detektion von Mikroplastik kaum reproduzierbare Ergebnisse. Sie zeigen Ergebnisse bezüglich der Menge an Abriebpartikeln und -fasern von 120 bis 728.289 Partikeln aus ähnlichen Kleidungsstücken in jüngsten Studien. Da bisher keine der in der Literatur beschriebenen Methoden zur Bewertung der Entstehung von Mikroplastik aus Textilien verwendet werden konnte, arbeiten Wissenschaftler intensiv an der Minimierung von Fehlerquellen und folglich der Standardabweichung der Ergebnisse durch Auswahl von Materialproben, Ausrüstung und Verfahren für die Probenvorbereitung, das Waschen, das Filtern des Waschwassers und das Analysieren der Mikroplastikpartikel. Starke Varianzen in den Studienergebnissen liefern somit derzeit eine Reihe von Handlungsoptionen, Maßnahmen und Zielen.

### **rethink bedeutet den Stand der Technik und der Wissenschaft zu hinterfragen**

Die Quellen für Mikroplastik in aquatischen Ökosystemen sind hauptsächlich an Land und werden üblicherweise in Primärquellen (Emissionen von Polymerpartikeln in Mikrogröße) und Sekundärquellen (größere Polymergegenstände, die in der Umwelt zu Mikroplastik zersetzt werden) unterteilt [19]. 65% der 2016 weltweit produzierten 100 Millionen Tonnen Textilien bestehen zu Teilen aus synthetischen Polymeren,



wovon allein die Verwendung von Polyester (hauptsächlich Polyethylenterephthalat (PET)) 53,4 Millionen Tonnen ausmacht [20]. Die bei der Herstellung und Verwendung von Kleidungsstücken und anderen textilen Endprodukten verursachte Mikroplastik-Belastung der Ökosysteme erfordert effiziente und ressourcenschonende Maßnahmen für die tatsächliche Vermeidung und Entfernung von Mikroplastik. Diese Mikroplastik-Quellen entstehen aufgrund mechanischer Beanspruchung beim Tragen und Waschen der Textilien, da sich Textilfasern ablösen und in das Abwasser und in aquatische Systeme gelangen [21,22]. Demnach rückt die Berücksichtigung von Umweltaspekten im Zusammenhang mit der Textilherstellung und Textilverwendung vermehrt auch in den Fokus der Politik, ist teilweise bereits in Gesetzgebungen verankert und wird als Baustein im rethink-Konzept betrachtet [23]. Auch die von den Vereinten Nationen definierten Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDG) beziehen diese Aspekte mit ein.

**Bei rethink zählt jede Information und wird in den Prozess des „Neu Denkens“ einbezogen und evaluiert.**

Für die Anwendung des rethink-Konzepts in Industriezweigen ergeben sich verschiedene Anknüpfungspunkte und Potentiale. Zentraler Ansatzpunkt ist, neben der Analyse von Einzelprozessen, den gesamten Kreislauf (c2c) zu beleuchten und Ziele über diesen zu definieren. Die oftmals in der Industrie existierende Ineffizienz im Projekt und Change Management wird durch die übergeordnete und spezifische IST-SOLL-Analyse optimiert. Der Prozess wird unter Berücksichtigung aller fachlicher und fachfremder Informationen und Ideen in verschiedenen Ebenen und Ebenen übergreifend gedacht. Durch die Hinzuziehung interdisziplinärer Meinungen ergeben sich neue Potentiale und Maßnahmen. Kommunikation und der Einbezug des Personals spielen eine wichtige Rolle, um den innovativen Ansatz im System zu fördern.

Anknüpfungspunkte für Handlungen und Maßnahmen sind sowohl auf der vertikalen als auch auf der horizontalen Strukturebene zu finden. Dies bedeutet konkret, dass sich die Handlungsoptionen entlang der Wertschöpfungskette

und / oder durch eine IST-SOLL-Vergleichsanalyse ergeben. Das prozessuale „Neu Denken“ beginnt auf allen Ebenen einzeln und Ebenen übergreifend.

In Bezug auf die Mikroplastikthematik in der Textilindustrie sind weitere rethink-Anknüpfungsfelder Material- und Prozessänderungen in vier verschiedene Stadien: Faser, Garn, Gewebe und Kleidungsstück (Produktion und Verarbeitung, hier: Synthefaserhersteller und Textilhilfsmittelhersteller). Zusätzlich können einige Kriterien des Herstellungsprozesses von synthetischen Fasern und die daraus resultierenden Eigenschaften der Fasern dafür verantwortlich sein, dass beim Waschen mehr Mikrofasern freigesetzt werden. Hier greift ebenfalls rethink mit Maßnahmen und Verbesserungen für die Optimierung des Prozessablaufs (Bereich Nutzung und Verwertung, siehe Abbildung 3). Das Ziel ist es, zusammen mit den Textilproduzenten und -verarbeitern bereits innerhalb ihrer Herstellungsprozesse Mikroplastik-reduzierende Maßnahmen zu ergreifen, in denen die Anforderungen an das Endprodukt vereinbar mit den Veränderungen am Prozess sein sollten.

**Analyse der Einzelkreisläufe und des Gesamtkreislaufs (IST)**

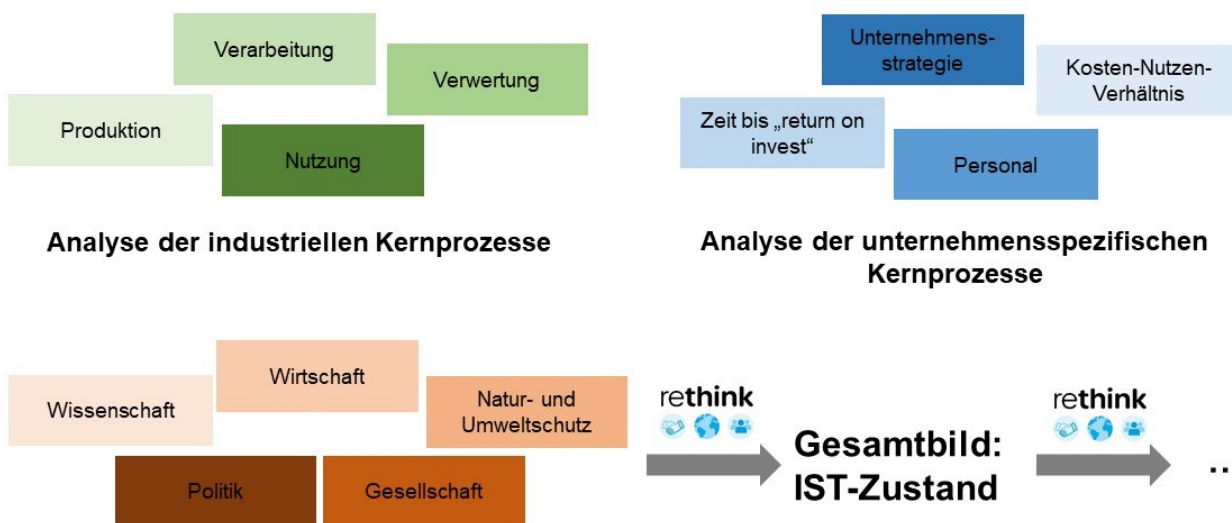


Abb. 2: Auszug aus den Einzelkreisläufen, die während des rethink-Prozesses für die Ermittlung des IST Zustands herangezogen werden (© Wasser 3.0).

**rethink** Nach der detaillierten Analyse des IST-Zustand werden Handlungsoptionen, Maßnahmen und Ziele festgelegt.

### Handlungsoptionen

- Herstellungs- / Verarbeitungsprozesse neu denken
- Prozessabläufe optimieren (Analytik, Prozessual)
- Effizienzsteigerung durch innovative Verfahrensansätze
- Kreislaufführung
- Reduktion von Chemikalien innerhalb des Prozesses
- Reduktion von Chemikalienausträgen aus dem Prozess

### Maßnahmen

- Detaillierte IST Analyse (Zahlen, Daten, Fakten, Personen)
- Abstimmung von Einzelarbeiten und der Netzwerkzusammenarbeit (wissenschaftlich, wirtschaftlich, ökologisch, personell)
- Festlegung der Entwicklungsschwerpunkte auf der Basis reproduzierbarer wissenschaftlicher Ergebnisse
- Ableitung des Dauerbetriebs aus Ergebnissen von Pilotierungen
- Nachgeschaltete, wiederkehrende Prozessevaluation, Validierung, Datenkonsolidierung
- Ermittlung und Ausschöpfung der Innovationspotentiale (ökonomisch, ökologisch, personell)
- Segmentbetrachtung der Einzelbereiche des Kreislaufs im Kontext des Gesamtkreislaufs



### Definition der Ziele

Prozessoptimierung

Effizienzsteigerung

Umwelt-und Naturschutz

Kosteneinsparung

Reduktion von Prozess-chemikalien

Senkung der Wartungszyklen

Schließen von Stoffkreisläufen

Handlungsschnelligkeit

Innovatives Personal

Abb. 3: Beispiel für rethink im Bereich Prozesse und Verfahren – Die nächsten Schritte nach der IST-Analyse liegen in der Definition von Zielen und Ermittlung der Handlungsoptionen. Die Festlegung der Maßnahmen rundet das Gesamtbild ab (© Wasser 3.0).

Zusätzlich ist es wichtig, wenn eine verfahrenstechnische Implementierung der Mikroplastik-Eliminationsstufe angestrebt wird, dass zuerst die IST-Analyse der Belastungssituation erfolgt.

Zusätzlich zu Ansatzpunkten innerhalb der Wertschöpfungskette sind „end-of-pipe“ Lösungen möglich, die die angrenzenden Stoffkreisläufe vor Mikroplastik schützen. Bezogen auf den Wasserkreislauf bedeutet dies, dass der Mikroplastikeintrag nach dessen Entstehung und Transport, also beispielsweise am Ort der Abwasserreinigung reduziert wird. In diesem Anwendungsbereich, wie auch in prozessintegrierten Add-on-Lösungen, kann beispielsweise Wasser 3.0 PE-X® eingesetzt werden. In Verbindung mit dem rethink-Konzept und neuesten wissenschaftlichen Ergebnissen entstehen modulare, passgenaue Lösungen, um den Mikroplastik-Eintrag im Bereich der Ab- und Prozesswasser zu reduzieren und die Eliminationseffizienzen direkt im Abwasserreinigungs- oder -aufbereitungsprozess zu ermitteln [24–27].

### Ausblick

Im zweiten Teil beschreiben wir das Verfahren Wasser 3.0 PE-X®. Es ist in der Lage, Mikroplastik durch den Einsatz „flüssiger Partikelsammler“ aus Wasserkreisläufen zu eliminieren.

### Danksagung

Die Forschungsprojekte von **Wasser 3.0** werden durch die finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durch die Bereitstellung von ZIM-Fördermitteln (Zentrales Innovationsprogramm für KMU) durchgeführt. Michael Sturm dankt an dieser Stelle zusätzlich der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für den Erhalt eines Promotionsstipendiums.

# rethink



create innovation



protect the environment



increase quality of life

Abb. 4: Kernziele von rethink: Umdenken zulassen, Innovationen kreieren und unterstützen, Umwelt schützen und Lebensqualität erhöhen (© Wasser 3.0).

**Literaturverzeichnis**

- [1] UBA, Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern – Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015.
- [2] BMU/ UBA, Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen., Dessau-Roßlau, 2017.
- [3] ATT, BDEW, DBVW, DVGW, DWA, VKU, Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2015, 2015th ed., Wirtschafts- u. Verlagsges. Gas u. Wasser, Bonn, 2015.
- [4] DWA, DWA-Politikmemorandum – Positionen zur Umweltpolitik, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, Hennef, 2018.
- [5] Destatis, **Umwelt - Wasserwirtschaft**, 2019, Zugriff 29. August 2019.
- [6] Statista, **Höhe der Investitionen in die öffentliche Wasserversorgung in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2017 und Prognose bis 2020**, 2019.
- [7] M. Rudloff, A. Herbort, P. Bimmler, C. Hiller, N. Poppelreiter, K. Schuhen, **Quo vadis Spurenstoffelimination mittels Aktivkohlen** Laborpraxis Teil 1-3., 2018, Zugriff 3. Juni 2019.
- [8] U. Hübner, U. von Gunten, M. Jekel, Evaluation of the persistence of transformation products from ozonation of trace organic compounds - a critical review, *Water Research* 68 (2015) 150–170.
- [9] DWA-Ad-hoc-Arbeitsgruppe Organische Schadstoffe in Klärschlämmen und anderen Düngemitteln, Organische Schadstoffe in Klärschlämmen und anderen Düngemitteln, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, Hennef, Deutschland, 2008.
- [10] DWA-Arbeitsgruppe KA-8.1, Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf – Arzneistoffe, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, Hennef, Deutschland, 2014.
- [11] DWA-Arbeitsgruppe KA-8.1, Bedeutung von Transformationsprodukten für den Wasserkreislauf, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, Hennef, Deutschland, 2014.
- [12] DWA-Fachausschuss KA-8, Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, Hennef, Deutschland, 2015.
- [13] J. Boucher, D. Friot, Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources (2017).
- [14] I.E. Napper, R.C. Thompson, Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions, *Marine Pollution Bulletin* (2016).
- [15] International Organization for Standardization, ISO 9073-10:2003 Textiles – Test Methods for Nonwovens – Part 10: Lint and Other Particles Generation in the Dry State, International Organization for Standardization, Genf, 2018.
- [16] U. Pirc, M. Vidmar, A. Mozer, A. Kržan, Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing, *Environmental Science and Pollution Research* 23 (2016) 22206–22211.
- [17] Petersson, H. Roslund, S. Tvättemission, En Undersökning av Polyesterplaggs Fiberutsläpp vid Hushållstvätning. Bachelor's Thesis, Borås, Sweden, 2015.
- [18] L. Åström, Shedding of Synthetic Microfibers from Textiles, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [19] C. Völker, J. Kramm, H. Kerber, E. Schramm, M. Winker, M. Zimmermann, More Than a Potential Hazard – Approaching Risks from a Social-Ecological Perspective, *Sustainability* 9 (2017) 1039.
- [20] The Fiber Year Consultants, The Fiber Year 2017- World Survey on Textile & Nonwovens, The Fiber Year GmbH, Speicher, Schweiz, 2018.
- [21] P. Mellin, C. Jönsson, M. Åkermo, P. Fernberg, E. Nordenberg, H. Brodin, A. Strondl, Nano-sized by-products from metal 3D printing, composite manufacturing and fabric production, *Journal of Cleaner Production* 139 (2016) 1224–1233.
- [22] C. Jönsson, O. Levenstam Arturin, A.-C. Hanning, R. Landin, E. Holmström, S. Roos, Microplastics Shedding from Textiles—Developing Analytical Method for Measurement of Shed Material Representing Release during Domestic Washing, *Sustainability* 10 (2018) 2457.
- [23] R. Bloom, G. Fletcher, M. Stone, **California's Assembly Bill AB-2379; Waste management: plastic microfiber**, 2018.
- [24] A.F. Herbort, M.T. Sturm, C. Hiller, K. Schuhen, Nano- und Mikroplastik – Braucht es eine komplizierte Einzelstoffdetektion bei der Gewässeranalytik? Umdenken mit dem Wasser 3.0 – PEI?!, *GIT Labor-Fachzeitschrift* (2017) 32–35.
- [25] A.F. Herbort, K. Schuhen, **Mikroplastik in kommunalen Kläranlagen nachhaltig entfernen**, 2017.
- [26] M.T. Sturm, A. Wilde, S. Kluczka, K. Schuhen, **Detektion von Mikroplastik im (Ab-)Wasser – Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen?**, *Analytik NEWS* (2018).
- [27] M. Sturm, M. Rudloff, P. Bimmler, A. Herbort, B. Ney, N. Poppelreiter, K. Schuhen, Neue Ansätze zur Reduktion anthropogener Stressoren aus dem aquatischen Umfeld, *WWT* (2018).