

Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik

Rohwasser – Prozess – Abwasser

**Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppe
Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik**



IMPRESSUM

Autoren

Dr. Angela Ante	SMS SIEMAG Aktiengesellschaft, Hilchenbach
Dr.-Ing. Joachim Behrendt	TU Hamburg-Harburg
Dr. Helmut Bennemann	Bayer Pharma AG, Bergkamen
Dr. Christoph Blöcher	Currenta GmbH & Co. OHG, Leverkusen
Dipl.-Ing. Peter Bolduan	atech innovations gmbh, Gladbeck
Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen	TU Berlin
Prof. Dr. Harald Horn	Karlsruher Institut für Technologie - KIT
Prof. Dr. Rainer Krull	TU Braunschweig
Prof. Dr. Peter M. Kunz	Hochschule Mannheim
Prof. Dr. Joachim M. Marzinkowski	Bergische Universität Wuppertal
Dr. Stefan Neumann	LANXESS Deutschland GmbH, Leverkusen
Dr. Volker Oles	EnviroChemie GmbH, Roßdorf
Dr. Hans-Werner Rösler	CUT Membrane Technology GmbH, Erkrath
Dr.-Ing. Elmar Rother	Evonik Industries AG, Hanau
Prof. Dr. Karl-Werner Schramm	Helmholtz Zentrum München
Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers	CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Ulrich Szewzyk	TU Berlin
Dr. Thomas Track	DECHEMA e.V., Frankfurt/Main
Dr. Ingolf Voigt	Fraunhofer- Institut für Keramische Technologien und Systeme – IKTS, Hermsdorf
Dipl.-Ing. Hubert Wienands	Wehrle-Umwelt GmbH, Emmendingen

Herausgeber

ProcessNet-Fachgruppe
„Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik“

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.
Dr. Andreas Förster
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Erschienen im März 2014

ISBN: 978-3-89746-153-6

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	2
I TRENDS UND PERSPEKTIVEN	
1 Einleitung	4
1.1 Istzustand	5
1.2 Nahe Zukunft	8
2 Vision 2030	9
2.1 Randbedingungen 2030	9
2.2 Stand der Technik 2030	10
3 Handlungsfelder und Entwicklungsbedarf	11
II WEGE ZUR REALISIERUNG	
4 Technologieübergreifende Ansätze	18
4.1 Produktionsintegrierte Maßnahmen mit dem Ziel eines energieeffizienten Wasserrecyclings	18
4.2 Rückgewinnung von Wertstoffen	21
4.3 Salze	26
5 Verfahren zur Realisierung	29
5.1 Biologische Verfahren	29
5.1.1 Allgemein	29
5.1.2 Anaerobverfahren	33
5.1.3 Aerobe Membranbioreaktoren	34
5.2 Advanced Oxidation Processes (AOP)	37
5.3 Membranen für die Wasser- und Abwasseraufbereitung	39

Zusammenfassung

Wasser ist für die Industrie sowohl auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene von entscheidender Bedeutung. Die Anforderungen an die Wassertechnik im industriellen Sektor unterscheiden sich nicht nur grundsätzlich von denen des kommunalen Sektors, sondern sind darüber hinaus branchen- und standortabhängig so verschieden, dass standardisierte Lösungen nicht möglich sind. Vielmehr erfordern die unterschiedlichen Bedürfnisse eine Kombination aus methodischem/fachlichem Know-how und maßgeschneiderter Prozesstechnik. Durch die enge Verzahnung der Produktion mit der Wassertechnik sind integrative Technologien und Managementsysteme notwendig.

Die daraus resultierende integrierte, nachhaltige Industrierewasserwirtschaft verringert die Abhängigkeit der Produktionsprozesse von externen Wasser-, Rohstoff- und Energieressourcen sowie von weiteren Einflussfaktoren wie rechtlichen Rahmenbedingungen. Sie ist nicht nur für den innerdeutschen Markt von großer Relevanz, sondern stärkt auch den Export von Technologien, Ausrüstungen, Ingenieur- und anderen Dienstleistungen und verbessert die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen in internationalen Märkten.

Aufgrund der großen Innovationspotentiale einer integrierten, nachhaltigen Industrierewasserwirtschaft hat es sich die ProcessNet-Fachgruppe „Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik“ zur Aufgabe gemacht, die Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik aufzuzeigen.

Ausgehend von dem aktuellen Istzustand werden aus den (Mega-)Trends eine Vision für die Situation im Jahr 2030

abgeleitet und Entwicklungsziele, Herausforderungen und die sich daraus ergebenden Handlungsfelder definiert. Weiter werden der für die Umsetzung der Vision notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf beschrieben und potentielle Wege zur Realisierung aufgezeigt (Abb. I).

Mit dem Blick auf den Stand der Technik im Jahr 2030 lassen sich folgende Entwicklungsziele für eine integrierte, nachhaltige Industrierewasserwirtschaft formulieren:

- » Intelligente Managementsysteme steuern die Wasserverteilung und -nutzung unter Berücksichtigung der technischen/natürlichen Wassernetzwerke und -kreisläufe (Smart Networks). Die Einspeisung von Abwässern in kommunale Kläranlagen und Oberflächengewässer erfolgt unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der vorhandenen Infrastruktur sowie unter Vermeidung von Schäden für natürliche Gewässer und von Verlagerungen in andere Umweltkompartimente. Diese Prämissen gelten auch für die Wärmeabgabe.
- » Die ständige Optimierung der Produktionsprozesse unter Nutzung produktionsintegrierter Verfahren führt zu einer zunehmenden Reduzierung des Wasserbedarfs und der Schmutzfrachten und steigert die Wirtschaftlichkeit des Recyclings von Prozesswasser, Inhaltsstoffen und Prozesswärme. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Wasserqualität. Investitionsentscheidungen werden auf Basis von Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC) und anderen Instrumenten zur Beurteilung der Nachhaltigkeit getroffen.

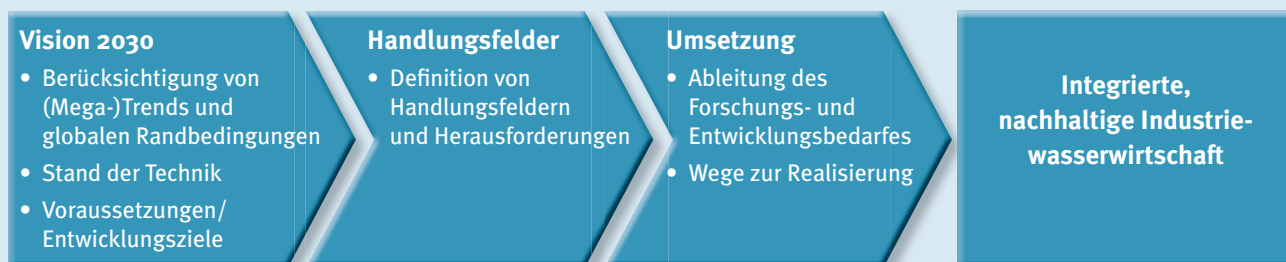


Abb. I: Der Weg zu einer integrierten, nachhaltigen Industrierewasserwirtschaft

- » Die Inhaltsstoffe industrieller Abwässer und Abwasserteilströme sind weitgehend bekannt. Transformationsprodukte durch biologische/chemische Abbauvorgänge sowie die Freisetzung von Stoffen durch Wasseraufbereitungsverfahren werden weitestgehend vermieden oder sind biologisch nahezu vollständig mineralisierbar.

Aus der Vision 2030 lassen sich vierzehn Handlungsfelder mit entsprechendem Entwicklungsbedarf ableiten:

1. Intelligentes Wassermanagement
2. Wasser: Quantität, Qualität, Ressourcen
3. Abwasser: Netzwerke, Klärwerk, Vorfluter, Abwasserabgabe
4. Schadstoffe, Hygiene: Substanzen, Konzentrationen, Grenzwerte
5. Wasser-Energie Nexus
6. Technologie: Integration, Effizienzsteigerung, Transfer
7. Rückgewinnung: Rohstoffe, Wertstoffe, Energie
8. Fußabdruck: CO₂, virtuelles Wasser, LCA
9. Veränderung der industriellen Produktion
10. Umgebung: Klima, Reststoffe
11. Salze: regional/global, mediale Verlagerung, Minderung, Salznutzung
12. Sozioökonomisches Umfeld
13. Verantwortung für die Zukunft: Ganzheitliche Sichtweise, Folgen einer optimierten Wasserwirtschaft
14. Qualifikation und Öffentlichkeitsarbeit

Aus diesen Handlungsfeldern und dem daraus resultierenden Entwicklungsbedarf ergeben sich wiederum Forschungsschwerpunkte für technologieübergreifende Ansätze und Verfahren. Diese gilt es bereits heute zu adressieren, um eine integrierte, nachhaltige Industriewasserwirtschaft bis zum Jahr 2030 zu realisieren:

- » Produktionsintegrierte Maßnahmen mit dem Ziel eines energieeffizienten Wasserrecyclings
- » Rückgewinnung von Wertstoffen
- » Umgang mit Salzen
- » Biologische Verfahren
- » Advanced Oxidation Processes
- » Membranen für die Wasser- und Abwasseraufbereitung

Im Rahmen des Positionspapiers werden die Ausgangssituationen dieser Ansätze/Verfahren beschrieben, ihre Anwendungspotentiale charakterisiert, der spezifische Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet sowie der zu erwartende Impact bei ihrer Umsetzung abgeschätzt.

I Trends und Perspektiven

1 Einleitung

Wasser ist für die Industrie sowohl auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene von entscheidender Bedeutung. Die Wassertechnik im industriellen und kommunalen Sektor unterscheidet sich grundsätzlich hinsichtlich der Anforderungen voneinander. Sie sind im industriellen Sektor branchen- und standortabhängig so verschieden, dass standardisierte Lösungen nicht möglich sind (s. Abb. 1). Vielmehr erfordern die unterschiedlichen Bedürfnisse eine Kombination aus methodischem/fachlichem Know-how und maßgeschneiderter Prozesstechnik. Durch die enge Verzahnung der Produktion mit der Wassertechnik sind integrative Technologien und Managementsysteme notwendig.

Eine integrierte, nachhaltige Industriewasserwirtschaft führt zu einer verringerten Abhängigkeit von natürlichen Wasserressourcen und weiteren Einflussfaktoren wie Energie oder rechtlichen Rahmenbedingungen. Sie ist somit nicht nur für den innerdeutschen Markt von großer Relevanz, sondern stärkt auch den Export von Technologien, Ausrüstungen, Ingenieur- und anderen Dienstleistungen und verbessert die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen in internationalen Märkten.

Die ProcessNet-Fachgruppe „Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik“ befasst sich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik sowie neuen Perspektiven auf dem Gebiet der produktionsintegrierten (Ab-)Wasserbehandlung. Ziel der Gruppe ist es, die industrielle Wassernutzung unter Berücksichtigung soziologischer Effekte in den gesamten Wasserhaushalt zu integrieren und ihre ökologische und ökonomische Effizienz konsequent zu verbessern. Die Fachgruppe bietet ein Forum für den interdisziplinären Erfahrungsaustausch zwischen Experten aus der industriellen Produktion, der Verfahrensentwicklung, der Umwelttechnik, dem Anlagenbau sowie aus Ingenieurbüros, Verbänden und Fachbehörden. Dabei werden neue Bedarfslfelder in der Entwicklung und Anwendung identifiziert und der Technologietransfer aus der Wissenschaft in die industrielle Praxis gefördert.

Aufgrund der großen Innovationspotentiale einer integrierten, nachhaltigen Industriewasserwirtschaft hat es sich die Fachgruppe zur Aufgabe gemacht, die Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik aufzuzeigen. Das vorliegende Papier geht primär von der Situation in Deutschland aus, berücksichtigt aber auch, dass sowohl die industrielle Produktion als auch die Wassertechnik in einen internationalen Kontext eingebunden sind.

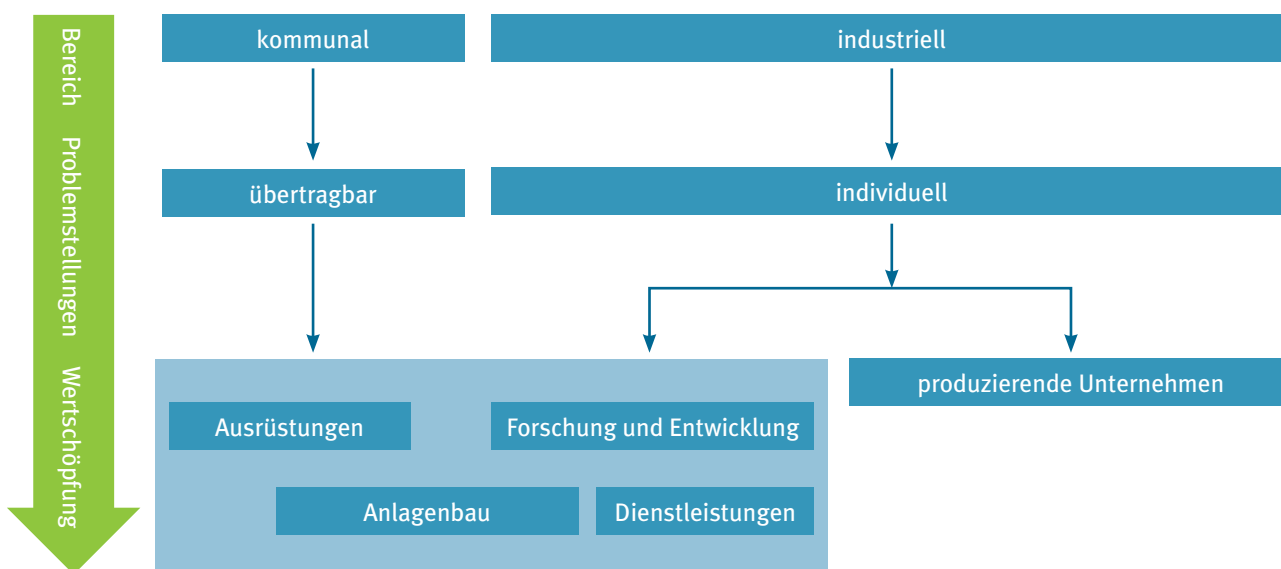


Abb. 1: Im industriellen Bereich profitieren, besonders auf internationaler Ebene, eine Vielzahl von Akteuren von Innovationen der (Ab-)Wassertechnik

Ausgehend von dem aktuellen Istzustand werden eine Vision für die Situation im Jahr 2030 aus den (Mega-)Trends abgeleitet und Entwicklungsziele definiert. Obwohl Vorhersagen immer mit Unsicherheiten behaftet sind, regen sie zur Diskussion an und eröffnen die Möglichkeit zur Entwicklung neuer perspektivischer und – in Abhängigkeit von der Länge des Betrachtungszeitraums – auch systemischer Lösungsansätze. Mit dem Jahr 2030 wurde ein überschaubarer Zeithorizont festgelegt, der hinreichend groß für die Entwicklung systemischer Konzepte ist.

Aus der Vision für das Jahr 2030 leiten sich Herausforderungen und die damit verbundenen Handlungsfelder ab. Um die definierten Entwicklungsziele zu erreichen, werden der für die Umsetzung notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf beschrieben und potentielle Wege zur Realisierung aufgezeigt (s. Abb. 2).

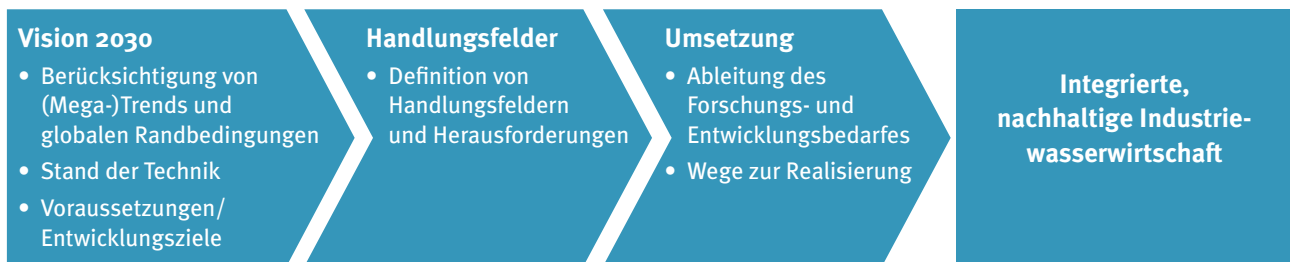


Abb. 2: Methodisches Vorgehen für die Entwicklung einer integrierten, nachhaltigen Industriegewässerversorgung: von der Vision 2030 über die Handlungsfelder zur Umsetzung

1.1 Istzustand

Die heterogene Nutzung von Wasser im Rahmen industrieller Prozesse erfordert unterschiedliche Prozesswasserqualitäten. In Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden

Rohwasser und den Anforderungen an das Prozesswasser werden diverse Aufbereitungsprozesse eingesetzt (s. Abb. 3).



Abb. 3: Industrielle Prozesswasserversorgung

In Deutschland werden etwa 90 % des Prozesswassers (s. Abb. 4) nach der Nutzung den gesetzlichen Vorgaben entsprechend behandelt und letztlich in Oberflächengewässer abgeleitet. Das bei bestimmten Anwendungen eingesetzte Wasserrecycling schont Wasser- und Energieressourcen. Für eine optimale Wassernutzung muss das Prozessabwasserrecycling mit der Wasseraufbereitung zusammengeführt werden (s. Abb. 5).

Die industriell genutzte Wassermenge betrug 2007¹ in Deutschland mit 26,5 Mrd. m³/a das Sechsfache des häuslichen und gewerblichen Bedarfs von 4,5 Mrd. m³/a. Lediglich 1,1 Mrd. m³/a (4 % des industriellen Abwassers) werden den kommunalen Kläranlagen zugeführt (s. Abb. 4). Diese erhebliche Differenz ist darauf zurückzuführen, dass insbesondere Kühlwasser, das ca. 92 % des verwendeten Frischwassers ausmacht, direkt in der geforderten Qualität in die Gewässer eingeleitet werden kann.

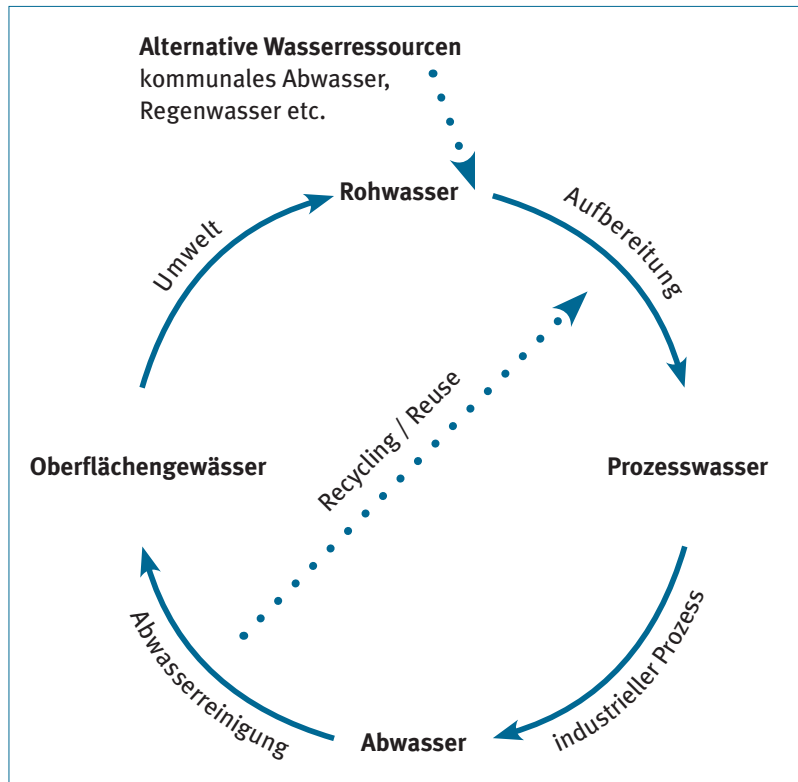


Abb. 5: Der industrielle Wasserkreislauf, Schonung natürlicher Wasserressourcen durch Wasserrecycling/-reuse und die Nutzung alternativer Ressourcen

Industrieller Gesamtfrischwasserbezug 2007: 26.548 Mio. m³

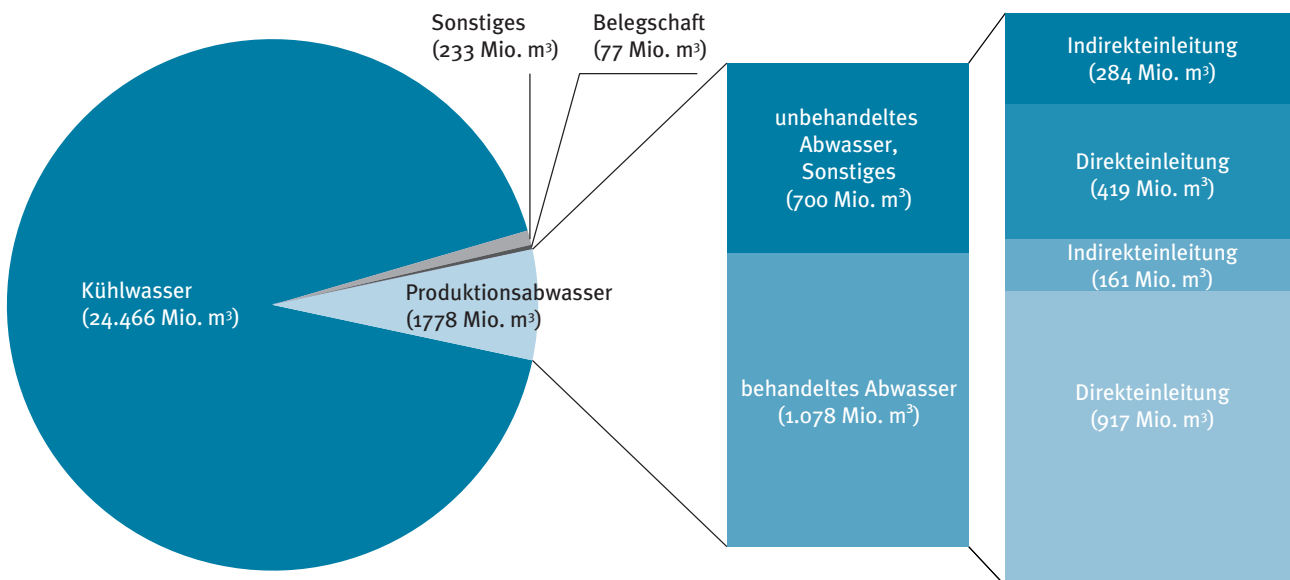


Abb. 4: Frischwassernutzung²

¹ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2009

² Geißen et al., Chem. Ing. 84 (2012) 7

In den vergangenen Jahrzehnten wurde durch eine Optimierung der Produktionsprozesse eine erhebliche Reduzierung des produktionsspezifischen Wasserbedarfs und eine Verbesserung der Abwasserqualität erreicht. Beispielsweise verringerte sich der Wasserintensitätsfaktor inklusive Kühlwasser in der chemischen Industrie von 1991 bis 2004 um 25 % auf ca. 90 L/€³. Flankiert wurde diese Entwicklung durch Investitionen in die Abwasseraufbereitung, die in der vergangenen Dekade unter anderem durch die verstärkte Installation von anaeroben Reinigungsverfahren geprägt wurde.

Die chemische Industrie gilt in Deutschland gemeinsam mit der industriellen Biotechnologie als Leitindustrie für die Wassernutzung. Sie erzeugt derzeit die größte Abwassermenge (s. Abb. 6) und wird auch in Zukunft gemeinsam mit der Automobil-, Elektro- und Kunststoffindustrie sowie dem Maschinenbau wesentlich zum Wachstum der deutschen Industrieproduktion beitragen. Verglichen mit dem sonstigen verarbeitenden Gewerbe ist die prognostizierte Entwicklung bis 2030 in dieser Leitbranche mit 1,8 % Wachstum pro Jahr in Deutschland dynamischer⁴. Darüber hinaus bietet die chemische Industrie über die Entwicklung von neuen Prozess- und Verfahrenstechniken, Materialien und Chemikalien ein hohes Innovati-

onspotential für Lösungen zur (Ab-)Wasseraufbereitung auf industrieller und kommunaler Ebene.

Neben der weiteren Optimierung der Produktionsprozesse ist derzeit eine Intensivierung des Abwasserrecyclings zu beobachten, um den Frischwasserbedarf und damit die Prozess(-ab-)wasserkosten zu reduzieren. Auch die Nutzung der Abwasserwärme und vereinzelt die Rückgewinnung von im Abwasser enthaltenen Wertstoffen sind neue Trends in der industriellen Wassernutzung. Da erste Technologien und Messtechniken vorhanden sind, könnte die Etablierung solcher Prozessmodule bereits heute maßgeblich zu Kosteneinsparungen beitragen.

Die Motivationen für Investitionen in die Prozessabwasseraufbereitung und die Wasserwiederverwendung sind in Abb. 7 dargestellt. In Abhängigkeit vom Entwicklungsstand gibt es in verschiedenen Ländern unterschiedliche Prioritäten. In den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern besteht ein erheblicher Bedarf beim Ausbau der industriellen Abwasserbehandlung, dessen Umsetzung maßgeblich von der Höhe des Bruttonationalprodukts und der Wasserverfügbarkeit abhängt. Darüber hinaus spielen Strategien global agierender Unternehmen sowie nationale (z. B. chinesische Mega-Wasserprojekte) und

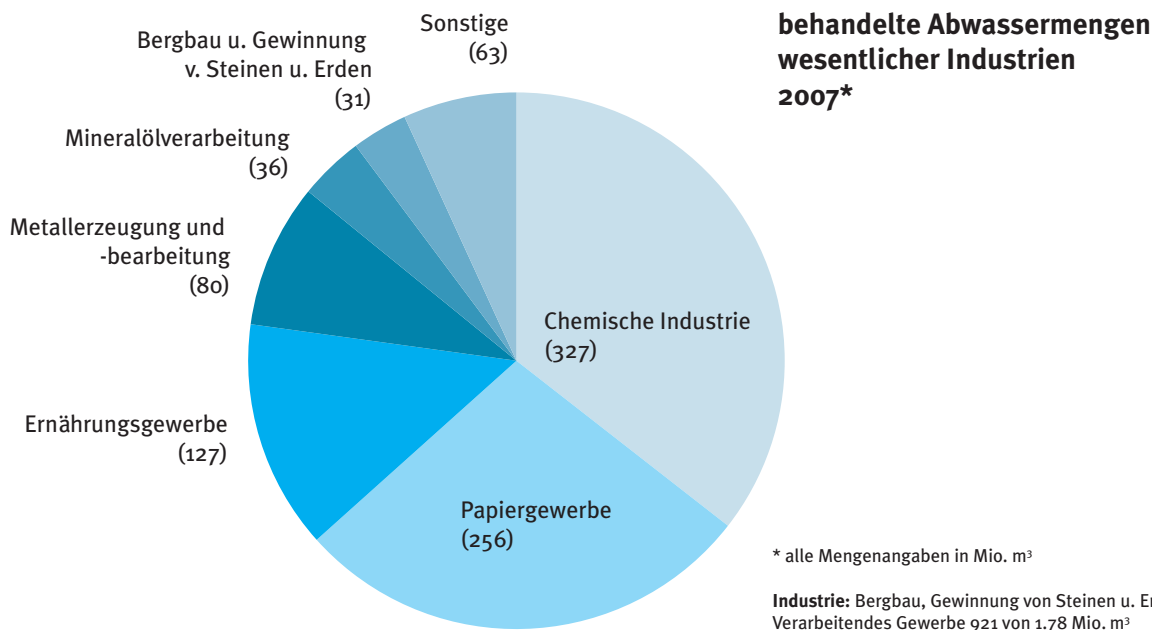


Abb. 6: Abwassermengen verschiedener Industriezweige⁵

³ Hillenbrand, T. et al., Technische Trends der industriellen Wassernutzung, Arbeitspapier, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe 2008

⁴ VCI-Prognos Studie, Die deutsche chemische Industrie 2030, VCI, Frankfurt 2012

⁵ Geißen et al., Chem.Ing. 84 (2012) 7

internationale Programme (z. B. European Water Stewardship⁶, CEO Water Mandate des UN Global Compact⁷) eine entscheidende Rolle.

Zur Beurteilung des Wasserbedarfs, der Wasserverfügbarkeit und der damit verbundenen Risiken unter weltweit unterschiedlichen Bedingungen stehen der Industrie Werkzeuge wie der „Water Footprint“, das „Global Water Tool“ des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), die „Water Sustainability Tools“ der Global Environmental Management Initiative (GEMI) und das „Aqueduct Tool“ des World Resources Institute zur Verfügung⁸. Instrumente wie das Life Cycle Assessment (LCA) und das Life Cycle Costing (LCC), die eine ganzheitlichere Bewertung erlauben, werden bislang nur vereinzelt eingesetzt.

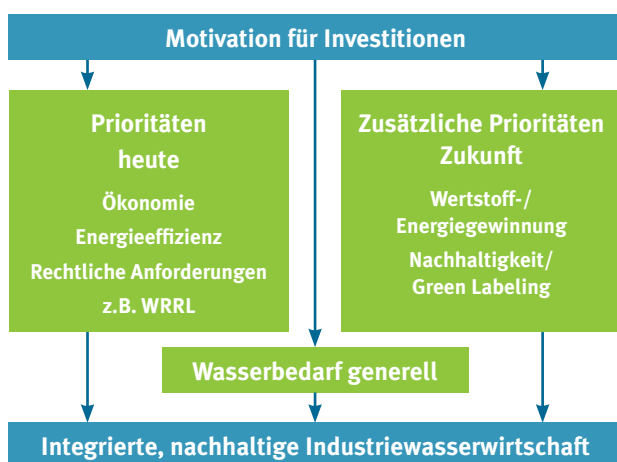


Abb. 7: Investitionsgründe (WRRL = Wasserrahmenrichtlinie)

1.2 Nahe Zukunft

Neben einer weiteren Kostenreduzierung wird bei der industriellen Wassernutzung in Deutschland in den nächsten fünf bis zehn Jahren im Wesentlichen die Erfüllung der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der in Überarbeitung befindlichen Abwasserordnungen im Vordergrund stehen. Mit den geplanten Änderungen in den Abwasserordnungen wird erstmalig der Integrationsansatz durch eine Umweltkompartimentübergreifende Betrachtung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung umgesetzt. Dieses Prinzip wird auch in die Prozessabwasserbehandlung übertragen werden.

Beim Abwasserrecycling entsteht ein Großteil der Kosten durch die dafür notwendige Infrastruktur, deren Anpassung in existierenden Betrieben meist sehr aufwändig ist. Daher und aufgrund der sich noch in der Entwicklung befindlichen Wasser-, Wärme- und Wertstoffrückgewinnung wird das produktionsintegrierte Abwasserrecycling erst in den kommenden Jahren flächendeckend umgesetzt. Bei der Etablierung von Recyclingsystemen ist zu beachten, dass die zurückbleibenden Konzentrate aufgefangen und behandelt werden müssen. Darüber hinaus werden in Zukunft durch die Entwicklung und Nutzung effizienterer Kühlsysteme der Wasserbedarf und die Wärmelast der Gewässer reduziert.

Die Bewertung von Maßnahmen zur Wassereinsparung, zur Prozessabwasserbehandlung und zum Wasserrecycling wird zunehmend über das LCA und das LCC erfolgen.

6 www.ewp.eu/activities/ews

7 <http://ceowatermandate.org>

8 Übersicht unter <http://ceowatermandate.org>

2 Vision 2030

Da Megatrends wie

- » das Konsum- und Bevölkerungswachstum,
- » die Ressourcenverknappung,
- » der Klimawandel und
- » die zunehmende Bedeutung des Umweltschutzes

unstrittig sind⁹, erübrigt sich eine Betrachtung verschiedener Szenarien für das Jahr 2030. Dennoch kann die prognostizierte Entwicklung lokal z. B. durch Naturkatastrophen, neue Rohstofffunde, politische Entscheidungen kurz- bis mittelfristig verändert werden.

Die von der European Water Partnership formulierte Vision für 2030¹⁰ gilt grundsätzlich auch für die industrielle Wassertechnik:

„We have achieved sustainable water resource management and universal access to modern and safe water supply and sanitation because we value water in all its dimensions – in its economic, social, environmental and cultural importance“

Im Zuge einer weiterhin steigenden industriellen Produktionseffizienz wird der spezifische Wasserbedarf noch stärker als bisher vom Produktionszuwachs entkoppelt. Über die Höhe des ökonomisch realisierbaren Wassereinsparpotentials für die deutsche und europäische Industrie gibt es aktuell keine zuverlässigen Daten. In jedem Fall hängt es im hohen Maße vom Standort und vom Industriezweig ab. Auch eine valide Abschätzung der möglichen Schmutzfrachtreduzierung im Prozessabwasser sowie des Wertstoff- und Wärmegewinnungspotentials ist nicht möglich. Voraussetzungen für die Entwicklung einer integrierten, nachhaltigen Industrieressourcenwirtschaft sind die Finanzierbarkeit von Investitionen in den Umweltschutz sowie die in Abb. 7 zusammengefassten Motivationen.

2.1 Randbedingungen 2030

Aus den oben angeführten Megatrends können folgende global geltende Randbedingungen abgeleitet werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit im Jahre 2030 auch für Deutschland relevant sein werden:

- 1) Wasser bleibt das wichtigste Lösungsmittel.
- 2) Weltweit steigt der Wasserbedarf weiter an (primär durch den Anstieg des Lebensstandards, sekundär durch Bevölkerungswachstum und Zunahme des Lebensalters). Dabei spielt das anhaltend starke Wachstum des Bruttoinlandsprodukts in China, Indien, Brasilien, Südkorea und Mexiko eine große Rolle¹¹. In Deutschland sinkt der Wasserbedarf bei gleichbleibender industrieller Wertschöpfung.
- 3) Durch den Klimawandel steigen die durchschnittlichen Jahrestemperaturen („+2-Grad-Gesellschaft“).
- 4) Die Bevölkerung ist besser ausgebildet und legt größeren Wert auf Umweltschutz. Das Kauf- und Marktverhalten der Kunden fördert ein Green-/Eco-Labeling.
- 5) Der Einsatz von Technologien wird ganzheitlich bewertet.
- 6) Neue Industriezweige (z. B. Bioraffinerien, industrielle Biotechnologie), neue Materialien, neue Energiespeichermedien und alternative Energiegewinnungsformen sind etabliert.
- 7) Der Kostendruck ist unter anderem durch den Anstieg der Energie- und Ressourcenkosten sowie durch den starken globalen Wettbewerb gestiegen.
- 8) Zunehmend werden komplexe und schwierig auszubauende Lagerstätten erschlossen.
- 9) Der Bedarf an Wertstoff(-rück-)gewinnung (z. B. Phosphor, seltene Erden) steigt.
- 10) Die Wasserrahmenrichtlinie und andere gesetzliche Vorgaben werden in Deutschland weiter fortgeschrieben und weltweit werden ähnliche immissionsbasierte Gesetze zum Schutz des aquatischen Milieus implementiert; dadurch wird die Rohwasserqualität verbessert.
- 11) Lokal kommt es zu einem Mangel an Fachkräften.
- 12) Die Wasserverfügbarkeit und -belastung ist regional sehr unterschiedlich. In Verbindung mit einer weiteren Urbanisierung kommt es lokal zu einem verschärften Wettbewerb verschiedener Wassernutzer.

⁹ Beispielsweise: www.unesco.de/weltwasserbericht4_kernaussagen.html

¹⁰ www.ewp.eu

¹¹ VCI-Prognos Studie, Die deutsche chemische Industrie 2030, VCI, Frankfurt 2012

2.2 Stand der Technik 2030

Aus den Megatrends und den Randbedingungen resultiert der allgemeine Stand der industriellen (Ab-)Wassertechnik im Jahr 2030:

- » Intelligente Managementsysteme steuern und regeln die Wasserverteilung und -nutzung unter Berücksichtigung der technischen/natürlichen Wassernetzwerke und -kreisläufe (Smart Networks). Die Einspeisung von Abwässern in kommunale Kläranlagen und Oberflächengewässer erfolgt unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der vorhandenen Infrastruktur sowie unter Vermeidung von Schäden für natürliche Gewässer und von Verlagerungen in andere Umweltkompartimente. Diese Prämissen gelten auch für die Wärmeabgabe.
- » Die weitere Optimierung der Produktionsprozesse unter Nutzung produktionsintegrierter Verfahren ermöglichen eine Reduzierung des Wasserbedarfs und der Schmutzfrachten, sowie eine Zunahme der ökonomischen Rückführung des Wassers, der Inhaltsstoffe und der Wärme. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Wasserqualität. Investitionsentscheidungen werden auf Basis von LCA, LCC und anderen Instrumenten zur Beurteilung der Nachhaltigkeit getroffen.
- » Die Inhaltsstoffe industrieller Abwässer und Abwasserteilströme sind weitgehend bekannt. Transformationsprodukte durch biologische/chemische Abbauvorgänge sowie die Freisetzung von Stoffen durch Wasseraufbereitungsverfahren werden weitestgehend vermieden oder sind biologisch nahezu vollständig mineralisierbar.

Aus dem prognostizierten Stand der (Ab-)Wassertechnik folgen die notwendigen Voraussetzungen, die bis 2030 geschaffen werden müssen:

1. Das Wassermanagement wird bereits bei der Entwicklung neuer Industrien, Verfahren und Prozesse berücksichtigt; entsprechende bedienungsfreundliche Softwaresysteme stehen zur Verfügung. Die eingesetzten Systeme besitzen Schnittstellen zu Managementsystemen anderer Betriebe, von Kommunen sowie für den gesamten lokalen Wasserhaushalt im Einzugsgebiet (Smart Networks). Durch diese Vernetzung kann die Prozess- und Kühlwasserversorgung sowie die Prozessabwasserbehandlung/-rückführung bedarfs- und angebotsabhängig systemisch reguliert werden.
2. Die Ökoeffizienz des Wassermanagements und der beteiligten Prozesse wird mit Kennzahlen wie Water Footprint, Carbon Footprint, Environmental Footprint beschrieben; eine Bewertung erfolgt mit Hilfe des LCA und LCC. Die Stoff- und Wärmeflüsse sind integrative Bestandteile des Wassermanagements.
3. Die industriellen Anlagen werden automatisch betrieben und gewartet. Die zur Verfügung stehende Online-Mess- und Analysetechnik ist kostengünstig und wartungsarm.
4. Die Wasser-, Wärme- und Stoffspeicherung erfolgt im Verbund aller Wassernutzer – Smart Networks sind etabliert.
5. Die Prozesse sind an die klimatischen, geographischen und sozio-ökonomischen Bedingungen angepasst.
6. Das aufbereitete Abwasser und Regenwasser wird als Wasserressource genutzt.
7. Die Anlagenhersteller, -betreiber sowie die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden sind technisch, (sozio-)ökonomisch und ökologisch hochqualifiziert und werden von Expertensystemen unterstützt. Die Bevölkerung ist über die technologischen Entwicklungen informiert und wird in die Entscheidungsprozesse eingebunden.
8. Bereits heute etablierte Verfahren sind weiter optimiert und werden sinnvoll kombiniert; sie benötigen wenig Energie und sind bezüglich der Energiequelle flexibel.
9. Die Nutzung von Wärmeenergie und chemischer Energie ist weitgehend etabliert.
10. Die hochauflösende chemische Analytik wird mit biologischen Methoden und Modellen ergänzt, die neben der Konzentration von Einzelstoffen und Summenparametern auch die Wirkungen komplexer Gemische in geringen Konzentrationen auf die Natur und den Menschen beschreiben.
11. Wertstoffe werden weitgehend abgetrennt und zurückgewonnen.
12. Ein Salzmanagement für industrielle Abwässer ist etabliert.
13. Wasserrelevante Roh- und Hilfsstoffe sowie Produkte und Nebenprodukte sind weitestgehend biologisch abbaubar.

3 Handlungsfelder und Entwicklungsbedarf

Aus den Megatrends, den daraus entwickelten Randbedingungen sowie dem prognostizierten Stand der Technik für das Jahr 2030 lassen sich für den Bereich der indus-

triellen Wasserwirtschaft Handlungsfelder identifizieren, die zum Erreichen der Vision 2030 bearbeitet werden müssen (s. Abb. 8).



Abb. 8: Handlungsfelder für eine integrierte, nachhaltige Industriewasserwirtschaft

1. Intelligentes Wassermanagement

Das intelligente Wassermanagement vernetzt nicht nur die verschiedenen Nutzer außerhalb (z. B. Kommunen, Landwirtschaft, Naherholung), sondern auch innerhalb der Industrie. Das Wassermanagement ist mit dem Wärme- und dem Stoffstrommanagement gekoppelt. Diese Komplexität macht das intelligente Wassermanagement zu einem vielseitigen, systemischen Handlungsfeld:

» Verbesserungen einzelner Prozesse sind nur begrenzt wirksam. Daher müssen Wasserverteilung und Abwasserbehandlung unter Berücksichtigung der Wärme- und Stoffströme vernetzt erfolgen (Smart Networks). Ein solches Vorgehen gewährleistet eine optimale Integration der vorhandenen inner- und außerbetrieblichen Prozesse (z. B. Klärschlammfahltürme).

- » Alle für das Wassermanagement zuständigen Parteien müssen die gleichen nachhaltigen Ziele vertreten.
- » Lokale Randbedingungen, wie industrielle, ökonomische und gesetzliche Vorgaben, müssen berücksichtigt werden.
- » Zielführend ist eine systemangepasste und systematische Vorgehensweise, die aufgrund der Komplexität der Prozesse entsprechende Softwaremodule erfordert. Diese Module müssen einfach zu bedienen und zu konfigurieren sein; die Schnittstellen müssen untereinander und mit einem Wasserhaushalt-Masterprogramm kompatibel sein.

2. Wasser: Quantität, Qualität, Ressourcen

Die Prozesswasserversorgung ist im hohen Maße vom Standort abhängig und wird darüber hinaus von einer Vielzahl weiterer Parameter beeinflusst. Entscheidend ist die Einbeziehung aller Wasserressourcen, was zu einer umfangreichen Bewertungsmatrix führt. Darüber hinaus ist die Reduzierung des Wasserbedarfs ein wichtiges Handlungsfeld. Die Wasserverfügbarkeit stellt in Deutschland nur an einzelnen Standorten einen begrenzenden Faktor dar und ist nur in ausgeprägten Trockenphasen eingeschränkt. Ausländische Standorte, auch in Europa, können eine extrem eingegrenzte Wasserverfügbarkeit aufweisen. Unabhängig von der Art der Einschränkung wird die Industrie gegenüber den anderen Wassernutzern (Bevölkerung, Landwirtschaft) benachteiligt sein. Wasser kann durch Ressourcen-schonende Technologien an Orten verfügbar gemacht werden, an denen natürlicherweise kein Wasser vorhanden ist oder nicht-nachhaltig aus dem Untergrund bezogen wird (z. B. weitgehende Schließung von Wasserkreisläufen, Mehrfachnutzung von Wässern im Downcycling, kommunales Abwasser). Gleiches gilt für Standorte mit geringer Wasserqualität (z. B. durch Organik, Schwermetalle, Salze belastete Wässer). Dadurch können weitere Flächen einer industriellen Verwendung oder einer Siedlungstätigkeit zur Verfügung gestellt werden.

- » Grundsätzlich sollte die „Wasserumgebung“ berücksichtigt werden. In wasserreichen Gebieten ist nicht der gleiche technologische Aufwand erforderlich wie in wasserarmen Gebieten.
- » Die Wasserverfügbarkeit ist mit entsprechenden Werkzeugen an den verschiedenen Standorten zu ermitteln. Geeignete Instrumente zur Prüfung der Wasserverfügbarkeit sind weiter zu entwickeln. Die Analyse von „Worst-Case“-Szenarien ermöglicht die rechtzeitige Einleitung von Gegenmaßnahmen (z. B. Nutzung alternativer Wasserressourcen, Intensivierung der Kreislauf-führung). Solche Untersuchungen müssen aufgrund der Komplexität der Prozesse mit Modellen durchgeführt werden (s. intelligentes Wassermanagement).
- » Bei der Wassergewinnung ist eine Bewertung der Ressource (z. B. Grundwasser vs. Oberflächenwasser) erforderlich.
- » Unabhängig von der Rohwasserressource müssen bedarfsabhängig Qualitäten und Quantitäten zur Verfügung gestellt werden. Bei einer Kaskadennutzung sind

Dominoeffekte zu berücksichtigen, was im Wassermanagement implementiert werden muss.

- » In einigen Industriezweigen und Ländern zeigen sich Trends zur weiteren Kreislaufschießung und zur abwasserfreien Produktion (Zero Liquid Discharge – ZLD, z. B. Trockenlackierung, Papierindustrie). Diese Entwicklungen werden unter anderem aufgrund einer zunehmenden Verknappung der Ressource Wasser durch behördliche Vorgaben und Kosten ausgelöst.
- » Eine Senkung des Kühlwasserbedarfs ist anzustreben, z. B. durch eine Umstellung auf Kreislauf-, Hybrid- und Trockenkühlung sowie durch die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung. Der Bedarf an Kühlwasser sollte in die ganzheitliche Bewertung der Prozesse eingehen. Darüber hinaus sollten Abschlämmwasser durch geeignete Aufbereitungsprozesse im Kreislauf und die Investitionskosten gesenkt, sowie die Effizienz gesteigert werden.
- » Die Nutzung von alternativen Wasserressourcen wie Regenwasser, aufbereitetes (kommunales) Abwasser und Kondensate, ist auszubauen.
- » Synergiepotentiale bei der Wassernutzung, insbesondere zwischen Kommune und Industrie sowie zwischen verschiedenen Industriezweigen, müssen identifiziert werden. Basierend auf diesen Analysen müssen Technologie- und Managementlösungen erarbeitet werden.

3. Abwasser: Netzwerke, Klärwerk, Vorfluter, Abwasserabgabe

Unabhängig davon, ob das Prozessabwasser nach der Aufbereitung erneut genutzt, in die kommunale Kläranlage oder in ein Oberflächengewässer eingeleitet werden soll, sind hohe Qualitätsanforderungen zu erfüllen.

- » Angestrebte Verbesserungen müssen die Kapazitäten der Vorflut einbeziehen. Eine Veränderung der Volumina der Wasserströme (z. B. stärkere Schwankungen in den Pegelständen im Verlauf des Jahres; Regenrückgang) und die Wärmelast müssen dabei berücksichtigt werden. Die Finanzmittel aus der Abwasserabgabe können Effizienzverbesserungen im Sinne einer Minimierung des Footprints unterstützen.
- » Aufbereitungsprozesse müssen weiter und/oder neu entwickelt werden. Dies betrifft neben den refraktären

Substanzen auch Salze und die abgegebene Wärmeenergie (s. Technologie).

- » Netzwerke zur Reinigung von Prozessabwässern müssen auch über Systemgrenzen hinweg implementiert werden (s. 1. Intelligentes Wassermanagement).

4. Schadstoffe, Hygiene: Substanzen, Konzentrationen, Grenzwerte

Die Eintragspfade für Emissionen in das Wasser müssen bekannt sein. Die Beschreibung des Eintrags und des Verbleibs einzelner Substanzen bis hin zu Ionenverteilungen und mikrobiellen Belastungen wird nahezu komplett möglich sein. Die Bewertung der biologischen Wirkungen, auch in größeren Bilanzräumen wie Wassereinzugsgebieten, lässt klare Qualitätsvorgaben zu. Vorbelastungen werden berücksichtigt.

- » Ziel im Sinne einer möglichst effizienten und vollständigen Nutzung von Rohstoffen muss es sein, Emissionen ins Abwasser zu vermeiden/vermindern und damit gleichzeitig die Ausbeuten zu steigern.
- » Verbesserte analytische Methoden und das zunehmende Wissen über Umweltwirkungen von Schadstoffen werden den Fokus auf (problematische) Einzelstoffe weiter verstärken (z. B. persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe). Eine biologische Wirkungsanalyse muss die chemische Analytik auch im Hinblick auf eine Grenzwertsetzung ergänzen. Geeignete Verfahren zur Detektion von Spurenkonzentrationen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit anderen Substanzen sowie dem Auftreten von Transformationsprodukten müssen entwickelt werden, um sichere Aussagen über das Verhalten von Substanzen im aquatischen Milieu treffen zu können. Dies ist sowohl für die Zulassung und die Anwendung von Stoffen als auch für die anschließende Abwasserbehandlung und Wassereinleitung/-wiederverwendung von großer Bedeutung (z. B. im Rahmen der Gesetzgebung, der Betriebsführung). Die Entwicklung neuer Methoden sollte von einer Modellierung begleitet werden.
- » Eine weitere Optimierung, Verfeinerung und Automatisierung der hygienischen Nachweismethoden und eine entsprechende Anpassung der Bewertungsmethoden sind zwingend erforderlich. Dies gilt nicht nur für sensible Industrien wie die Lebensmittel- und Pharmaindustrie, sondern auch für Kühlwässer (z. B. Nachweis von Legionellen) und in Bereichen mit ver-

stärktem Wasserrecycling. Das Vorkommen von pathogenen viralen und mikrobiellen Belastungen sowie Multiresistenzen muss frühzeitig erkannt und ein Transfer vermieden werden.

- » Die oben genannten Methoden müssen in die chemische und biologische Online-Messtechnik übertragen werden. Diese Online-Verfahren werden beim Wassermanagement, bei der Steuerung und Regelung von technischen Prozessen sowie bei der Qualitätssicherung in natürlichen Gewässern und von rückgeführtem Wasser eingesetzt. Online-Datenbanken sind eine Voraussetzung für ein effizientes und zeitgemäßes Wassermanagement auf allen Ebenen.

5. Wasser-Energie Nexus

Die zusätzlichen Anforderungen an die Wasserreinigung sind mit einem erhöhten Einsatz von Energie gekoppelt. Da die Energiepreise weiter steigen werden und der Carbon-Footprint ein wichtiges Bewertungsinstrument für die Nachhaltigkeit ist, gilt es primär Verschmutzungen zu vermeiden und sekundär den Energiebedarf der Wasseraufbereitungs- und -transportprozesse zu reduzieren sowie die in den Prozessabwässern enthaltene chemische und thermische Energie zu nutzen.

- » Dazu ist eine Bewertung der Energieeffizienz einzelner Reinigungs- und Rückgewinnungsverfahren unter Berücksichtigung der erzielten Reinigungswirkung notwendig. Neue Prozesse müssen entwickelt werden, die den Energiebedarf deutlich reduzieren und die chemisch gebundene Energie (z. B. biologische Brennstoffzelle, Wertstoffproduktion) nutzen. Weiter sollten Reststoffmengen, deren Weiterbehandlung Energie erfordert, verringert werden (z. B. Schlämme).
- » Die Entwicklung von Aufbereitungsprozessen auf hohem Temperaturniveau (z. B. Biologie, Membranen, Sorbentien) sollte weiter vorangetrieben werden, um Wärmeübertragungsverluste zu vermeiden.
- » Eine Integration der chemisch gebundenen und der thermischen Energie sowie der Transportprozesse in das Wassermanagement ist anzustreben.
- » Die Kühlwassernutzung und -behandlung hat große Auswirkungen auf die Energiebilanz und muss auf der Grundlage der oben dargestellten Parameter optimiert werden.

6. Technologie: Integration, Effizienzsteigerung, Transfer

Leistungsfähige Technologien für die Prozess-, Kühl- und Abwasseraufbereitung bilden die Grundlage für ein nachhaltiges Wassermanagement. Die Effizienz solcher Technologien ist beim Einsatz am Entstehungsort der Emission größer als am Ende der Kette („End-of-Pipe-Lösung“).

- » Eine Steigerung der Effizienz der Produktionsprozesse und der (Ab-)Wasserreinigung in Bezug auf Wasser, Produkte, Roh- und Hilfsstoffe, Energie, Reststoffe und Abgasemissionen ist anzustreben.
- » Neue Technologien und die Kombination von Technologien bzw. die Variation von Schrittfolgen bieten große Entwicklungspotentiale.
- » Wasserbehandlungsprozesse sollten auf hohem Temperaturniveau stattfinden, um eine direkte Wiederverwendung von Stoffströmen ohne externe Temperaturanpassung zu ermöglichen.
- » Produktions- und prozessintegrierte Maßnahmen (z. B. die verschmutzungsgesteuerte Laugenaufbereitung nach Reinigungsprozessen) sind zu fördern.
- » Das Technologiepotential der Prozessindustrie sollte durch den Transfer in andere Anwendungsgebiete genutzt werden.
- » Selektive Trenntechniken, z. B. für die Wertstoffrückgewinnung oder Abtrennung inhibierender Substanzen, müssen entwickelt werden.
- » Prozesse zur effizienten Salzabtrennung mittels universell anwendbarer, nicht-toxischer, einfach abzutrennender Extraktionsmittel sind zu erarbeiten.
- » Das immense Potential biologischer Prozesse (z. B. Energie- und Wertstoffproduktion, Abbau refraktärer Stoffe) sollte erschlossen werden.
- » Der Energiebedarf oxidativer und elektrochemischer Prozesse zur Entfernung von noch verbleibenden, refraktären Substanzen sowie zur Verbesserung der hygienischen Wasserqualität sollte durch Prozessoptimierung, neue Katalysatoren und Prozessintegration verringert werden.

- » Membranprozesse sollten durch die Erhöhung der Selektivität und der Stabilität sowie durch die Optimierung der Modulgeometrien und der Prozessintegration weiterentwickelt werden. Dies schließt auch eine anschließende Konzentratbehandlung ein.
- » Neue, ökologisch unbedenkliche Materialien zur Prozessintensivierung und Effizienzsteigerung, wie Hybridmaterialien, Katalysatoren, Sorbentien, Membranen, Hilfsstoffe (z. B. grüne Flockungsmittel, Antiscalantien, Biozide), sollten entwickelt werden.
- » Maßnahmen zur Beschleunigung und Verbesserung von technologischen Entwicklungen unter Berücksichtigung der Wertschöpfungskette müssen erforscht werden. Dazu bedarf es einer Verbesserung der Forschungsförderung und des Know-how-Managements insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen. Der Bau von Demonstrationsanlagen in Deutschland (z. B. über Fördermittel, Testfelder) erleichtert die Markteinführung neuer Technologien.



© DECHEMA e.V.

7. Rückgewinnung: Rohstoffe, Wertstoffe, Energie

Die Verwertung von Stoffen vor der konventionellen Prozessabwasserreinigung vermindert die Emissionen in die Umwelt. In diesem Kontext ist es wichtig, die Stelle in einer Prozesskette zu identifizieren, an der der Stoff am besten verfügbar ist. Dies hängt in hohem Maße von den spezifischen Gegebenheiten des Prozesses und des Umfeldes ab. Die Abtrennung im noch unvermischten Strom anstatt am Ende der Prozesskette (End-of-Pipe) ist alleine aus entropischen Gründen meist effizienter. Eine Prozessintensivierung kann nützlich sein (z. B. verringerter Platzbedarf), aber auch eine Nutzung der Inhaltsstoffe. Beispielsweise ist eine Umwandlung organischer Stoffe in Biogas sowohl End-of-Pipe als auch am Anfallort möglich.

- » Eine Nutzung der im Abwasser enthaltenen stofflichen Ressourcen (z. B. Phosphor, Ammonium, Polyphenole, Metalle) durch neue hochselektive und effiziente Trennprozesse ist anzustreben. Biologische und chemische Transformationsprozesse (z. B. Lactoseproduktion) sollten entwickelt werden, um die Wertschöpfung zu steigern.
- » Die Wärmerückführung durch Wasserrecycling (siehe Wassermanagement) sollte ausgebaut werden.
- » Die Energiegewinnung aus Prozessabwässern mit biologisch/katalytischen Prozessen sollte gesteigert werden.

8. Fußabdruck: CO₂, virtuelles Wasser, LCA

Die Verbesserung der Qualität der Wasserbehandlung und die Kreislaufführung sollten nicht zur Verschiebung von Belastungen in andere Kompartimente führen. Mithilfe der verschiedenen Fußabdrücke kann die Verringerung des Aufwandes der Abwasserbehandlung sowie die Steigerung der Effizienz der Abwasserreinigung ökologisch bewertet werden. Die Wasserqualität ist bereits heute, teilweise unter hohem Energieverbrauch und/oder hohen Kosten, beliebig einstellbar. Daraus resultiert ein Bedarf an geeigneten Werkzeugen, objektiv zwischen den verschiedenen Möglichkeiten abwägen zu können. Welche Menge an zusätzlichem CO₂ ist für die Entfernung einer bestimmten Menge organisch gebundenem Kohlenstoff oder NaCl aus einem Gewässer akzeptabel oder gerechtfertigt? Wie ist eine Verbrennung anstelle einer chemischen, physikalischen oder biologischen Behandlung im oder außerhalb eines Produktionsprozesses zur Entsorgung von Wasserinhaltsstoffen energetisch zu bewerten?

- » Zur ganzheitlichen Bewertung von Prozessen sind eine konsequente Anwendung und eine Weiterentwicklung von LCA-Methoden über die Implementation zusätzlicher Indizes (z. B. Salz, Temperatur, Wirkung auf aquatische Organismen) notwendig.
- » Kennzahlen wie „Water-Footprint“ und „virtuelles Wasser“ müssen analog zum „Carbon-Footprint“ als Qualitätskriterien der industriellen Herstellung etabliert werden. Für die Einordnung sollten nicht nur die absoluten Zahlen Verwendung finden, sondern die regionale Verfügbarkeit des genutzten Wassers sollte ebenfalls einfließen (z. B. Water Stress Index). Dazu ist eine Weiterentwicklung der Fußabdrücke und Indizes erforderlich.

9. Veränderung der industriellen Produktion

Die Entwicklung der industriellen Produktion wird zu veränderten und neuen Herstellungsverfahren und -zweigen führen (z. B. industrielle Biotechnologie, neue Materialien). Dabei kann das Wassermanagement effizient einbezogen werden.

- » Die Entwicklung des Wassermanagements und der notwendigen Wassertechnologien sollte parallel zur Produktionsentwicklung und zum Aufkommen neuer Industriezweige (z. B. Bioraffinerien) erfolgen.
- » Vorhandene Technologien sollten adaptiert werden, um z. B. die erhöhten Anforderungen an die Rückgewinnung von Wertstoffen bei gleichzeitig verringertem Rohstoffeinsatz in der Produktion zu erfüllen. Bei der Entwicklung neuer Technologien sollten diese Parameter bereits berücksichtigt werden.
- » Neue Technologie- und Managementkonzepte sollten eine weitergehende Entkopplung von industrieller Produktion und Wasserbedarf ermöglichen.
- » In der Produktion und in der industriellen Wassertechnik sollten neue, umweltneutrale Materialien und Materialfunktionalitäten zum Einsatz kommen (s. 6. Technologie).

10. Umgebung: Klima, Reststoffe

Zukünftig werden Klimaänderungen den Umgang mit Wasser zunehmend beeinflussen. Die Wasserverfügbarkeit wird sich regional verändern, was zu einem verringerten Dargebot, z. B. in Südeuropa und im Nordosten Deutsch-

lands, führen wird. Verstärkt wird dieser Einfluss durch eine zunehmende Konkurrenz zwischen urbanen, landwirtschaftlichen und industriellen Nutzern. Des Weiteren wird die Bandbreite und Häufigkeit extremer Wettersituationen in Form von Trockenheit und Starkregenereignissen in Verbindung mit einem steigenden Temperaturniveau zunehmen. Dies wird zu periodischen Einschränkungen in der Wassernutzung führen (z. B. verringerte Verfügbarkeit von Rohwasser, eingeschränkte Aufnahmekapazität für Abwärme, organische Stoffe oder Salze erhöhte Anforderungen an die Aufbereitung von Prozess- und Kühlwasser). Die Möglichkeiten der Reststoffentsorgung werden sich zunehmend reduzieren.

- » Es gilt daher, Standortvorteile durch die Reduzierung der Abhängigkeit von Frischwasserressourcen zu schaffen.
- » Die Wasserverfügbarkeit, klimatische Bedingungen und Reststoffverwertungsmöglichkeiten müssen bei der regionalen Industrieentwicklung berücksichtigt werden.
- » Technologieentwicklungen für die Prozesswasseraufbereitung und die Kühlung (z. B. Steigerung der Kreislaufführung, Schaffung von Synergien zwischen industrieller und kommunaler Nutzung) müssen vorangetrieben werden, um die Abhängigkeit von Frischwasserressourcen und von Abwassereinleitungen in Gewässer zu reduzieren.
- » Reststoffe aus der Prozess(-ab-)wasseraufbereitung müssen minimiert und neue Verwertungsmöglichkeiten entwickelt werden.

11. Salze: regional/global, mediale Verlagerung, Minderung, Salznutzung

Durch die gesetzlichen Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie ist die Emission von Salz in Süßwasser soweit eingeschränkt, dass das natürliche Niveau nicht wesentlich verändert wird. Trockenperioden werden die Problematik der Salzentsorgung verstärken, da die zulässigen Salzfrachten verringert werden müssen. Dies erfordert ein konsequentes Salzmanagement mit einer Entfernung der Salze aus dem Kreislauf. Durch die verstärkte Entnahme von Grundwasser in Küstenregionen dringt Salzwasser zunehmend in Grundwasserleiter ein und führt zu einer Verringerung der Wasserqualität. Dies hat zur Folge, dass Küstenregionen vermehrt durch Wasserstress gekennzeichnet sind. In diesen Regionen ist zwar die Emission von Salzen unkritischer, aber die Prozesswassergewinnung durch die hohen Salzkonzentrationen aufwändiger. Die Wasserwiederver-

wendung gewinnt sowohl an Binnenstandorten als auch in Küstenregionen an Attraktivität. Durch die Reduzierung des Rohwasserbedarfs und die Intensivierung des Recyclings werden zunehmend konzentrierte salzhaltige Stoffströme anfallen.

- » Konzepte und Prozesse zur Salzreduzierung und -wiederverwendung, sowie zur Konzentratnutzung und -behandlung müssen entwickelt werden.
- » Verlagerungen in andere Umweltkompartimente müssen in die ganzheitliche Betrachtung einbezogen werden.
- » Energieeffiziente Entsalzungsprozesse (z. B. druckreduzierte Membranverfahren), die Nutzung von Salzgradienten zur Energiegewinnung und Herstellungsverfahren für nutzbare salzhaltige Produkte müssen etabliert werden.

12. Sozioökonomisches Umfeld

Wasser ist in der industriellen Produktion ein unverzichtbares Medium. Die industrielle Wassernutzung ist dabei immer in ein wirtschaftliches, politisches und soziales Umfeld eingebunden und muss diese Rahmenbedingungen in ihren Managementansätzen berücksichtigen. Insbesondere gilt es, knappe Frischwasserressourcen zu schonen und den qualitativen Zustand durch die industrielle Wassernutzung nicht zu beeinträchtigen. Auf industrieller Seite müssen diese Aspekte in die Bewertung von Standorten einfließen, um beispielsweise das Risiko von Produktionslimitierungen und -ausfällen sowie steigende Aufbereitungskosten abschätzen zu können. Nur so ist eine in gesellschaftspolitische Rahmenbedingungen integrierte, kosteneffiziente Wassernutzung möglich.

- » Die Kommunikation mit der Öffentlichkeit, der Politik und den Nichtregierungsorganisationen muss ausgebaut werden.
- » Nutzungskonzepte zur Verringerung des Konkurrenzdruckes und der Abhängigkeit von Frischwasserressourcen müssen erarbeitet werden.
- » Die Entwicklung von Management- und Technologiekonzepten für eine stärkere Entkopplung von Frischwasserbedarf und Produktion müssen vorangetrieben werden. Sie stärken die industrielle Wassertechnik auf dem globalen Markt und bieten deutschen Unternehmen der produzierenden Industrie globale Standortvorteile.

13. Verantwortung für die Zukunft: Ganzheitliche Sichtweise, Folgen einer optimierten Wasserwirtschaft

In der industriellen Wassertechnik muss die Bewertung und Auswahl von technischen Maßnahmen auf der Basis ganzheitlicher Methoden erfolgen. Nur so lässt sich die starke Vernetzung mit anderen Bereichen bereits auf innerbetrieblicher Ebene erzielen. Die ganzheitliche Sichtweise ist auch eine gesellschaftliche Forderung. Mit dieser Position wird eine stärkere Verantwortung für die Zukunft übernommen. Wirtschaftliche, gesellschaftspolitische und soziale Aspekte fließen bei der Betrachtung des Rohstoffs Wasser ein. Durch eine globale Sichtweise stehen nicht ausschließlich lokale Interessen im Vordergrund. Die Folgen der Anwendung eines neuen Managementansatzes oder einer neuen Technologie werden ganzheitlich betrachtet und die Auswirkungen einer Verschiebung von Produktionen an andere Standorte werden berücksichtigt.

- » Die Methoden des LCA und LCC müssen exakter an neue Technologien angepasst werden.
- » Neue Methoden müssen entwickelt werden, um die Umweltwirkungen auf lokaler Ebene genauer bewerten zu können.
- » Eine Kopplung mit dem Wassermanagement ist erforderlich, um in den komplexen Wassersystemen (Rohwasser – Prozessabwasser – natürliche Gewässer) Bewertungen durchführen zu können.

14. Qualifikation und Öffentlichkeitsarbeit

Aufgrund der zunehmend komplexeren Technologien und Systeme ist die Personalqualifikation auf allen Ebenen sowohl in der Aus- als auch in der Weiterbildung anzupassen. Gleiches gilt für die Öffentlichkeit, die ohne ausreichende Öffentlichkeitsarbeit Entscheidungen zum Einsatz von innovativen Konzepten und Technologien nicht unterstützen wird. Da die deutsche Industrie exportorientiert ist, sind entsprechende Maßnahmen auch im Ausland zu unterstützen.

- » Die Aus- und Weiterbildung muss an den technologischen Fortschritt angepasst werden; dies gilt für alle Qualifikationsstufen. Dazu gehört eine Optimierung der Wissensvermittlung im Bereich der naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagen. Weiter sollten Modelle zur komplexen systemischen Betrachtung sowie zur ganzheitlichen Bewertung als Elemente in

die Curricula integriert werden. Gleiches gilt für sozio-ökonomische und soziale Fähigkeiten. Grundlagen dafür können bereits in den allgemeinbildenden Schulen gelegt werden (z. B. thematische Einbindung in Lehrpläne, Schülerlabore).

- » Eine Weiterentwicklung der Nachwuchsförderung sowie der Verbindung zwischen theoretischer und praktischer Ausbildung auf akademischer Ebene ist anzustreben. Dafür sind Lehrende mit Praxiserfahrung von zentraler Bedeutung.
- » Maßnahmen zur Verringerung des Fachkräftemangels auf der nicht-akademischen Ebene (z. B. Kommunikation, Qualifikation, Anerkennung) sind zu konzipieren.
- » Die zunehmende Automatisierung erfordert eine verstärkte Aus- und Weiterbildung von Fachkräften in ereignisorientierten Situationen (z. B. Simulatortraining).
- » Eine exportorientierte Wasserwirtschaft benötigt für den Betrieb der installierten Anlagen qualifiziertes Personal im Ausland. Kurze Einarbeitungsphasen während der Inbetriebnahme, wie sie heute üblich sind, werden nicht mehr ausreichend sein. Die in Deutschland praktizierte Kopplung zwischen Theorie und Praxis ist weiter auszubauen. Lokale Arbeitskräfte können über mittel- bis langfristig angelegte Aus- und Weiterbildungen in regionalen Trainings- und Ausbildungszentren besser einbezogen werden. Um Know-how-Verlust zu vermeiden, muss eine langfristige Mitarbeitermotivation und -bindung angestrebt werden (z. B. Karriereplan, Anreize). Auch die Aus- und Weiterbildung von Behördenvertretern ist einzubeziehen.
- » Die Öffentlichkeit muss über die technischen Entwicklungen informiert und wenn möglich auch in Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Veranstaltungen, wie die „Lange Nacht der Wissenschaften“ in Berlin und Bildungsmodule, wie die „Schüler Labore“ der Chemischen Industrie müssen weiter ausgebaut werden.
- » Softwaremodule und Expertensysteme mit bedienerfreundlichen Oberflächen und definierten Schnittstellen ergänzen die Aktivitäten.

II Wege zur Realisierung

4 Technologieübergreifende Ansätze

In diesem Kapitel werden aufbauend auf verschiedenen Handlungsfeldern die Ausgangssituation, die Potentiale, die Herausforderungen sowie der notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf für technologieübergreifende Ansätze beispielhaft aufgezeigt, um eine integrierte, nachhaltige Industrierwasserwirtschaft zu ermöglichen.

Darüber hinaus erfolgt eine Abschätzung die erzielbaren Wirkungen.

4.1 Produktionsintegrierte Maßnahmen mit dem Ziel eines energieeffizienten Wasserrecyclings

Ausgangssituation

Produktionsintegrierte Maßnahmen setzen an der Quelle der Entstehung von Abwässern an. Viele Prozesse zur Herstellung, Veredlung und Reinigung von Produkten werden im wässrigen Medium durchgeführt. Eine Implementierung von Maßnahmen zum Wasserrecycling in den Produktionsprozess setzt eine detaillierte Analyse und Bilanzierung der relevanten Stoffströme, eine Wasserverbrauchsanalyse sowie die Festlegung von Spezifikationen und Qualitätsanforderungen an das Wasser voraus. Damit ist eine Entscheidung möglich, ob Wasser effizient eingesetzt wird, ob eine direkte Wiederverwendung möglich ist und ob ein Recycling den Einsatz einer innerbetrieblichen Wasserwiederaufbereitung erfordert.

Wasserrecycling ist mit Synergieeffekten verbunden,

- » wenn gleichzeitig Energie eingespart wird,
- » wenn eine ökologisch, ökonomisch und technisch sinnvolle Lösung für die aus dem recycelten Wasser ausgeschleusten Stoffe gefunden wird (Ressourcenschonender Umgang mit nützlichen und wertvollen Inhaltsstoffen),
- » wenn Rationalisierungseffekte eintreten und/oder
- » wenn durch die Reduktion der Abwassermenge und -fracht die nachgeschaltete Abwasserreinigung entlastet und eine Gewässerbelastung vermieden oder verringert wird.

Die Möglichkeit des Wasserrecyclings ist aus allen Industriezweigen bekannt.

Wasserrecycling lohnt sich meist dann, wenn nur schwach verunreinigte Ströme kostengünstig durch aufwandsarme Reinigungsmaßnahmen wieder aufbereitet werden können. Bei Strömen, die einerseits eine hohe Konzentration an Verunreinigungen aufweisen und/oder andererseits Stoffe mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften enthalten, erweist sich Wasserrecycling meist als weniger effizient. Daher ist die Grundvoraussetzung für ein Wasserrecycling in der Regel die Etablierung eines effizienten Wassermanagements, um unterschiedlich gut recyclingfähige Abwässer voneinander zu trennen.

Die Optimierung eines Stoffstrommanagements ist ein hochkomplexer Prozess. In der Regel kann weder die Analyse noch die Maßnahmenentwicklung und Implementierung neuer Konzepte durch das vorhandene betriebliche Personal vorgenommen werden. Insbesondere wenn neue gesetzliche Vorschriften und Auflagen umzusetzen sind, wird vom Management eine hohe technische Kompetenz erwartet. Maßnahmen dürfen nicht isoliert betrachtet werden, sondern müssen Problemverlagerungen in andere Umweltkompartimente berücksichtigen. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Maßnahmen sind immer auch die Auswirkungen auf den verursachenden Prozess und auf die Prozess- und Produktqualität zu beachten. Diese Anforderungen setzen neben den im Betrieb bekannten Kenntnissen über die eingesetzten Stoffe, Herstellungsverfahren, Rezepturen und Randbedingungen der Prozesse auch Wissen zu den ökologischen und ökonomischen Zusammenhängen, unter anderem zur Beschaffenheit des Prozesswassers, zum Energie- und Ressourcenverbrauch sowie zu den Risiken und Gefahren beim Einsatz von Gefahrenstoffen voraus. Über spezifische, Prozess-bezogene Daten (z. B. L Wasser/kg Produkt, Chemischer Sauerstoffbedarf-(CSB)-Fracht/Prozess oder Prozessschritt, kWh thermische Energie/kg Produkt oder Prozess) lassen sich eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse und damit auch des betrieblichen Umweltschutzes erzielen. Die Maßnahmenentwicklung muss auch langfristige Auswirkungen von (integrierten) Umweltschutzmaßnahmen berücksichtigen, beispielsweise die Aufkonzentrierung von Stoffen im Wasser bei einer Reduzierung des Abwasser-

volumens, eine mögliche Aufkonzentrierung von Störstoffen im Wasserkreislauf, potentielle Veränderungen der Rahmenbedingungen für den Produktionsstandort und auch Reaktionen der Stakeholder. Bei der Beurteilung von Ursache-Wirkungsbeziehungen ist eine ökologisch-ökonomische Bilanzierung der vorgesehenen Änderungen hilfreich. Insbesondere für mittelständische Unternehmen stehen hierzu keine in der Praxis bewährten Methoden zur Verfügung. Daher sind ökologische Prozess- und Produktkriterien, beispielsweise aus dem Bereich des Ressourcen- und Energieverbrauchs oder zu Klimafaktoren, den Kunden kaum zugänglich und daher weitgehend unbekannt.

Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung von Emissionen in das Abwasser und zur Schonung der Ressourcen Wasser und Energie sowie der effiziente Einsatz von Betriebsmitteln verlangen eine ständige Überprüfung der Prozesse hinsichtlich ihrer Optimierungspotentiale.

Kurzfristig umzusetzen sind Einsparungen von Wasser, Energie, Betriebsmitteln und damit einhergehend auch von Prozess- und Umweltkosten. Damit verbunden sind Verbesserungen der Prozess- und Produktqualität, die Einführung von Maßnahmen zum Arbeitsschutz, zur Pro-

zesssicherheit, zum Vollzug neuer gesetzlicher Vorschriften oder zur Umsetzung von Kundenanforderungen und die Vergabe von Umweltlabels.

Mittelfristig ist eine Umsetzung von betrieblich integrierten Umweltschutzmaßnahmen bei der Neu- oder Ersatzinvestition von Maschinen und Anlagen möglich.

In einem **langfristig** angelegten zeitlichen Rahmen werden integrierte Maßnahmen schon in der Planungsphase neuer Produkte oder Prozesse berücksichtigt.

Oft werden in den Betrieben integrierte Umweltschutzmaßnahmen durch additive Verfahren ergänzt. Im Gegensatz zum integrierten Umweltschutz werden bei Maßnahmen des additiven Umweltschutzes Verfahren oder Prozesse durch einen nachgeschalteten Prozessschritt erweitert. Der additive Umweltschutz erfordert einen zusätzlichen Ressourceneinsatz, führt zur Umwandlung von Emissionen in der Regel unter Einsatz von Energie und ist oft mit Folgeemissionen oder einer Verlagerung von Emissionen in andere Umweltkompartimente sowie mit Investitions- und zusätzlichen Betriebskosten verbunden. Additive Maßnahmen bewirken eine gezielte und effekti-



Wasserrückgewinnung in der Stahlindustrie (© atech innovations gmbh)

ve Minderung der jeweiligen Umweltbelastung und führen gegebenenfalls zu einer Senkung von Emissionsgebühren.

Zahlreiche Beispiele belegen die Möglichkeit eines kontinuierlichen Übergangs zwischen innerbetrieblich angewandten additiven und integrierten Maßnahmen. Eine Heiß-Nanofiltration erlaubt ein Wasserrecycling direkt am Färbe- oder Waschprozess bei gleichzeitiger Energieeinsparung. Ionentauscher werden zur Reinigung von Spülwasser in der Oberflächenveredelung eingesetzt. Auch der Einsatz der Membranfiltration beim Wasserrecycling in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie stellt eine erfolgreiche Umsetzung dar. Die meisten dieser innerbetrieblichen Recyclingprozesse setzen in der Nähe oder direkt im Produktionsprozess an, da die Komplexität der Wasserinhaltsstoffe begrenzt und der Aufwand für additive Verfahren gering ist. Zur Vermeidung ineffizienter Verfahren müssen die Maßnahmen hinsichtlich Ressourcenschonung und Emissionsminderung evaluiert werden (s. auch Kap. 4.2 „Rückgewinnung von Wertstoffen“).

Vision/Potentialabschätzung

Produktionsintegrierte Umweltschutzmaßnahmen bestehen vorrangig in Maßnahmen zur Substitution von Betriebsstoffen, zur Effizienzsteigerung von Prozessen und zur Vermeidung von Emissionen in Wasser oder andere Kompartimente. Eine direkte Wiederverwendung von Wasser bei Wasch- und Reinigungsprozessen ist bei heißem Wasser besonders lohnenswert, da die Kreislaufführung des Wassers mit einer Energieersparnis einhergeht. In diesem Kontext birgt eine Ertüchtigung von Altanlagen ein noch nicht ausgeschöpftes Potential. Kleine und mittlere Unternehmen werden derzeit durch staatliche Fördermaßnahmen motiviert, Ressourceneinsparpotentiale zu ermitteln. In einigen Branchen betragen sie bis zu 30 % des eingesetzten Wassers, bis zu 20 % der beim Wassergebrauch benötigten thermischen Energie und bis 10 % bei weiteren Betriebsmitteln. Die damit verbundenen Kosteneinsparungen sind zum Teil erheblich und könnten zur Verbesserung der Rendite der Unternehmen beitragen. Viele dieser Maßnahmen sind jedoch betriebsspezifisch und die Übertragbarkeit auf andere Verhältnisse/in andere Unternehmen ist nicht ohne Weiteres möglich.

Erfahrungsgemäß werden integrierte Maßnahmen, so ihr Potential erkannt wird, sofort umgesetzt, insbesondere wenn es sich um unkomplizierte Verfahrensänderungen oder mit geringem Aufwand und ohne Beeinträchtigung der Produktqualität einführbare stoffliche Substitutionen handelt. Der Erhalt wertvoller funktioneller Inhaltstoffe bzw. Eigenschaften (z. B. Gehalt an Korrosionsinhibito-

ren, Desinfektionsmitteln, Elektrolytgehalt, Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln, oder die reduzierte Härte, Keimfreiheit und Temperatur) kann für ein Recycling des Wassers ausschlaggebend sein. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen muss nachgewiesen werden.

Häufig geht mit der Einführung integrierter Maßnahmen eine Steigerung der Qualifikation der am Prozess beteiligten Mitarbeiter einher. Informationen zu integrierten Maßnahmen erhalten die betrieblichen Akteure durch Fachverbände sowie durch die Lieferanten von Betriebsmitteln und Anlagen/Maschinen und können dann als Multiplikatoren fungieren. Kenntnisse zum Zusammenhang zwischen Abwasserbelastung und verursachendem Prozess, zu integrativen und additiven Maßnahmen sowie zur Prozessoptimierung und deren potentielle Auswirkungen eröffnen den Blick auf die Chancen, die Zukunftsfähigkeit der Unternehmen zu stärken.

Die prozessnahen Anwendungen von Membranverfahren, der chemischen Oxidation beispielsweise mit O_3 oder H_2O_2/UV , der Adsorption an Aktivkohle und Ionentauschern stellen große, bisher nur begrenzt genutzte Potentiale dar, die im Rahmen von praxisorientierten Forschungs- und Förderprojekten der vergangenen beiden Dekaden erarbeitet wurden. Ihre Umsetzung scheiterte bisher meist daran, dass die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen nicht ausreichte, eine praxistaugliche Lösung nicht gefunden wurde oder eine großtechnische Umsetzung beim betriebseigenen Personal auf große Vorbehalte stieß.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Ähnlich wie bei der „Rückgewinnung von Wertstoffen“ (s. Kap. 4.2) beschrieben, erfolgt die Umsetzung neuer Konzepte auch bei Wasserrecyclingverfahren nur sehr zögerlich.

Trotz der Verfügbarkeit von wirtschaftlichen Konzepten zum produktionsintegrierten Umweltschutz besteht auch weiterhin ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Neugestaltung von wasserverbrauchenden und abwasserproduzierenden Verfahren/Prozessen, bei denen Potentiale zur Ressourcenschonung und Energieeffizienzverbesserung anzunehmen sind.

Aufgrund der Verknappung der Energieressourcen werden bei der Herstellung von organischen Chemikalien im wässrigen Medium zunehmend Prozessbedingungen mit Temperaturen kleiner $50\text{ }^\circ\text{C}$ angestrebt werden. Eine Kombination von Prozess- und Trenn-/Reinigungstechnik

mit optimierter Ausbeute erfordert hybride Lösungen. Beispiele aus der Forschung sind Kapselmembranen für den sicheren Transport und die gezielte Freisetzung der verkapselten Stoffe am Zielort sowie Hohlfasermembranreaktoren zur gezielten Nutzung definierter Reaktionsbedingungen.

In Zukunft wird das Wasserrecycling verstärkt mit der Gewinnung von Stoffen kombiniert werden. Dazu werden vermehrt Prozess-nahe additive Maßnahmen zum Einsatz kommen. Forschungsbedarf besteht bei der Weiterentwicklung von Membranverfahren (aggressive, heiße Medien; Steigerung der Ausbeute und Wirtschaftlichkeit; funktionalisierte Membranen; Flüssigmembranen), von Ionentauschern (selektive Ionentauscher, Ionenpaarreaktionen zur Regenerierung und zum stofflichen Recycling, Trennung von Stoffgemischen mit großen Konzentrationsunterschieden), von biologischen Verfahren (selektiver Abbau; Steigerung der Abbaurate), von Hybridverfahren sowie bei der Prozessintensivierung und bei der Kopplung prozessnaher additiver Verfahren mit Wärmenutzung.

Integrierte Maßnahmen werden unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit neben den derzeitigen Bereichen Energie und Klima verstärkt die Ressourceneffizienz aufgreifen:

- » Reduzierung des Aufwandes, der Kosten und der Gebühren für die Rohwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung durch Senkung des spezifischen Wasserverbrauchs und Wasserrecycling (Water-Footprint)
- » Nutzung des organischen Kohlenstoffes im Wasser am Ende von Prozessen zur Gewinnung regenerativer Energien und Verringerung der Klimagasemissionen (Carbon-Footprint)
- » Schonung der Ressource Wasser aus Grund- und Oberflächengewässern.

Vorrangige Entwicklungsziele für die Optimierung und Entwicklung von Verfahren zur effizienten Wassernutzung sind eine ganzheitliche Betrachtung sowie eine breite Anwendung der ökologisch-ökonomischen Bilanzierung. Softwarebasierte Systeme müssen entwickelt werden, um die Wirkungen der integrierten Maßnahmen beschreiben und eine Bewertung durchführen zu können.

Impactabschätzung

Der effiziente Einsatz von Wasser trägt insbesondere in Regionen mit begrenzten Wasservorräten zum Schutz der Ressourcen bei. Reduzierte Emissionen führen zu Syner-

gieeffekten bei der Einleitung in Gewässer. Die Einführung integrierter Maßnahmen zum betrieblichen Umweltschutz steht mit einem verbesserten Arbeitsschutz und einer verbesserten Qualität der Prozesse und Produkte in einem engen Zusammenhang. Die Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten der integrierten Umweltschutzmaßnahmen in einem Betrieb trägt zur Erweiterung des Wissens der Mitarbeiter und damit zur Verbesserung ihrer Qualifikation bei. Ein proaktives Management wird den betrieblichen Umweltschutz zum Gewässerschutz in Form einer integrierten, nachhaltigen Industriewasserwirtschaft anstelle von End-of-Pipe-Regelungen als Chance für die Zukunftssicherung des Unternehmens erkennen.

Trotz der meist individuellen Lösungen erfordernden Produktionsprozesse werden sich wirtschaftliche Umsetzungen von Maßnahmen für eine integrierte, nachhaltige Industriewasserwirtschaft auf andere Unternehmen derselben Branche und auch auf vergleichbare Verhältnisse in anderen Branchen übertragen lassen; softwarebasierte Systeme werden diesen Transfer unterstützen.

4.2 Rückgewinnung von Wertstoffen

Ausgangssituation

Eine Kontamination des Prozesswassers mit Produktionsmaterialien ist bei einem direkten Kontakt unvermeidlich. Daher finden sich die Substanzen in unterschiedlichen Konzentrationen (von wenigen ppb bis zu einigen %) im Prozessabwasser wieder. Handelt es sich um einen Wertstoff, kann eine Rückgewinnung nicht nur aus Gründen des Umweltschutzes, sondern besonders auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein.

Im Zuge der zunehmenden Rohstoffknappheit und steigenden Rohstoffpreise wird dieser Trend sich in Zukunft noch verstärken. Darüber hinaus bestehen für manche Stoffe auch strategische Gründe für ein Recycling, da der Zugriff auf die Quellen (z. B. Minen) durch Monopolstellungen (z. B. China für Gallium) eingeschränkt sein kann. Zudem ist das **Kreislaufwirtschaftsgesetz** zu berücksichtigen, welches die Rückgewinnung von Stoffen in Deutschland gesetzlich vorschreibt.

Eine weitere Triebfeder für die Optimierung von Verfahren zur Abtrennung und Rückgewinnung von Stoffen aus Abwasser und Prozessströmen ist die fortschreitende **Verschärfung von Grenzwerten**. Bei einigen als „prioritär gefährliche Stoffe“ eingestuften Metallen (z. B. Quecksilber, Nickel, Cadmium, Blei) ist aufgrund der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie in Zukunft eine deut-

liche Verschärfung von Grenzwerten zu erwarten (s. Kap. 2.1).

Grundvoraussetzung für die unkomplizierte Rückgewinnung von Wertstoffen aus der Produktion ist eine gut organisierte Trennung von Prozess- und Abfallströmen (Stoffstrommanagement), so dass möglichst konzentrierte und sortenreine Stoffströme anfallen. Zur Wertstoffrückgewinnung existiert derzeit bereits eine Vielzahl von Techniken. Die Wahl der Trennmethode richtet sich primär nach den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Zielsubstanz sowie nach ihrer Konzentration und in zweiter Linie nach der spezifischen Matrix des Abwassers sowie nach der Größe des Stoffstromes.



Rückgewinnung von Lösungsmitteln (© EnviroChemie GmbH)

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Methoden der Rückgewinnung und Anwendungsbeispiele. Dabei können die Rückgewinnungstechniken prinzipiell auf drei Ansätze abzielen:

- a) **Wertstoffrückgewinnung:** Abtrennung eines wertvollen Stoffes aus einem Prozesswasser (z. B. Edelmetalle, Lösemittel)
- b) **Rückgewinnung eines Prozessstroms:** Aufarbeitung eines Prozessstroms, so dass er nicht als Prozessabwasser oder mit diesem entsorgt werden muss (z. B. Elektrolyte, Beizsäure)
- c) **Wasserwiederverwertung**

Wie in Tabelle 1 erkennbar, gibt es eine Vielzahl von technischen Verfahren und interessanten Rohstoffen. Für viele Rohstoffe stehen unterschiedliche Rückgewinnungsmethoden zur Auswahl. Welches Verfahren am besten geeignet ist, hängt in der Regel von den Rahmenbedingungen ab. Diese können beispielsweise sein:

- » Konzentration des Wertstoffes und zulässiger Restgehalt im Abfallstrom nach Behandlung
- » Matrix- und Begleitkomponenten
- » Verfügbarkeit kostengünstiger Energie
- » Möglichkeiten/Anforderungen der direkten Rückführung von Prozessströmen in die Produktion

Bei einer komplexen Abwassermatrix sind nach Möglichkeit Verfahren anzuwenden, die die selektive Abscheidung der relevanten Stoffe erlauben.

Tabelle 1: Technische Methoden der Wertstoffrückgewinnung und ihre Einsatzmöglichkeiten (Auswahl)

Methode	Wertstoff														
	Gold, Silber und Platin-Gruppen, Metalle	Buntmetalle: Cu, Zn, Sn	Halbmetalle: B, Ga, Ge, As, Sb, Se	Spezielle Metalle: Co, Ni, Nb, Ta, Mo, V, U, Pb, Cd	anorganische Säuren: z. B. HCl, HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HF	Elektrolyte für die Oberflächenbehandlung: z. B. Cr ³⁺ , Zn ²⁺ , Ni-Elektrolyte	Andere Elektrolyte: NaCl, KCl,	organische Säuren: z. B. Weinsäure, Essigsäure, EDTA	Organische Lösemittel	Öle	Pharmazeutische Wirkstoffe, Pestizide	Phosphor, Stickstoff	Iod und Iodverbindungen	Li, Seltene-Erden-Metalle: z. B. La, Ce	Wasser
Hydroxid-Fällung		✓		✓			✓							✓	
Sulfid/Organosulfid-Fällung	✓	✓		✓			✓								
Flockung und Fällung			✓	✓			✓	✓			✓		✓		
Chemische Oxidation/ Reduktion	✓	✓	✓									✓			✓
Elektrochemische Rückgewinnung	✓	✓		✓		✓								✓	
Zementation	✓	✓													
Elektrodialyse	✓		✓		✓			✓							
Diffusionsdialyse					✓										
Kristallisation (Eindampfung)	✓	✓			✓						✓		✓		
Destillation/Rektifikation								✓	✓			✓			
Ionenaustausch (Entsalzung)								✓	✓						✓
Selektiv-Ionenaustausch	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Säure- und Ionenretardation					✓		✓								
Chromatographie											✓			✓	
Extraktion		✓	✓	✓				✓			✓		✓		
Aktivkohle-Adsorption	✓				✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓
Adsorberharz-Adsorption					✓	✓	✓				✓				
Spezielle Adsorbentien	✓	✓	✓	✓		✓			✓		✓	✓			
Nanofiltration	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓
Umkehrosiose											✓				✓
Schüttgut- und Gewebefiltration	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓				✓
Sedimentation und Zentrifugation	✓	✓		✓		✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓
Flotation	✓	✓		✓											✓

Vision/Potentialabschätzung

Die Wertstoffrückgewinnung wird ökonomisch zunehmend interessanter, da die Rohstoffpreise steigen werden. Aufgrund der vielfältigen geopolitischen und ökonomischen Einflussfaktoren sind Prognosen zum zeitlichen Rahmen für diese Entwicklung jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Eine zunehmende Volumenreduktion führt zu steigenden Konzentrationsniveaus in den Wasserkreisläufen, was die Rückgewinnung der Wertstoffe

erleichtert. Zu den Stoffen mit Wertstoffcharakter gehören: Edel- und Buntmetalle, Alkalimetalle, Seltene-Erden-Metalle, Halbmetalle wie Selen, Tellur, Arsen, Bismuth, Bor, Gallium, Germanium, Indium sowie Verbindungen der Elemente Phosphor (z. B. Phosphat), Stickstoff (z. B. Ammonium oder Nitrat), Lithium und Iod. Dazu kommen Säuren (mineralische und organische), Tenside, Lösemittel, Extraktionsmittel, Phenole, Lignine sowie Wirkstoffe der pharmazeutischen Industrie oder des Pflanzenschutzes.

Tabelle 2: Industriezweige mit hohem Wertstoffrückgewinnungspotential

Industrie	Wertstoff														
	Gold, Silber und Platin-Gruppen, Metalle,	Buntmetalle: Cu, Zn, Sn	Halbmetalle: B, Ga, Ge, As, Sb, Se	Spezielle Metalle: Co, Ni, Nb, Ta, Mo, V, U, Pb, Cd,	anorganische Säuren: z. B. HCl, HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HF	Elektrolyte für die Oberflächenbehandlung: z. B. Cr ⁺ , Zn ⁺ , Ni-Elektrolyte)	Anderer Elektrolyte: NaCl, KCl	organische Säuren: z. B. Weinsäure, Essigsäure, EDTA	Organische Lösemittel	Öle	Komplexe organische Moleküle. z. B. Pharmazeutische Wirkstoffe, Pestizide	Phosphat, Stickstoff	Iod und Iodverbindungen	Li, Seltene-Erden-Metalle: z. B. La, Ce	Wasser
Bergbau	✓	✓		✓	✓									✓	✓
Metall-Raffination	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓						✓	
Metall- und Kunststoffoberflächen Finisher (Galvanik)	✓	✓		✓	✓	✓		✓							✓
Halbleiterindustrie	✓		✓												✓
Elektronikindustrie	✓	✓	✓		✓	✓								✓	✓
Solarindustrie			✓	✓											✓
Maschinenbetrieb										✓					✓
Petrochemie										✓					✓
Chemie	✓			✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓
Pharmazeutische Industrie								✓		✓		✓			
Pflanzenschutz								✓		✓					
Textilindustrie		✓													✓
Batteriehersteller				✓	✓		✓							✓	
Keramikindustrie	✓		✓		✓										✓
Abfall- / Abwasserentsorger	✓	✓		✓						✓					
Landwirtschaft											✓				✓
Lebensmittelindustrie							✓		✓	✓					✓
Düngemittelindustrie											✓				✓

Zu den Industriezweigen mit hohem Wertstoffrückgewinnungspotential gehören alle Branchen, in denen wertvolle Metalle gewonnen oder verarbeitet werden, (z. B.: Bergbau, Metallraffination, Stahlindustrie, Metall-Oberflächenbearbeitung und Oberflächen-Finishing, Elektro-, Solar und Halbleiterindustrie), die chemische und pharmazeutische Industrie, die Landwirtschaft sowie die Holzverarbeitungs-, Zellstoff- und Lebensmittelindustrie (s. Tabelle 2). Diese Industriezweige besitzen einen erheblichen Anteil an der gesamtwirtschaftlichen Leistung.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Derzeit wird in vielen Betrieben auf die Rückgewinnung von Wertstoffen verzichtet, da die Investitionen für die technische Realisierung dieser Verfahren hoch sind. Darüber hinaus sind bei älteren Anlagen umfangreiche Umbaumaßnahmen notwendig, welche sich aus räumlichen Gründen und wegen der erforderlichen, temporären Produktionsstillstände und den daraus resultierenden Kosten kaum realisieren lassen. Aus diesen Gründen sind technische Konzepte für die Wertstoffrückgewinnung primär bei der Planung von Produktionserweiterungen und für neue Projekte umsetzbar.

Zu diesen praktischen und organisatorischen Problemen kommt hinzu, dass zur Realisation von Wertstoffrückgewinnungen individuelle, auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Konzepte erarbeitet werden müssen. Diese Aufgabenstellung ist so komplex, dass sie in der Regel nicht ohne äußere Hilfe (Planungsarbeiten mit Laborversuchen und Pilotierung) erfolgen kann.

Praktikable Lösungen ergeben sich in den meisten Fällen durch die Verknüpfung eines geeigneten Stoffstrommanagements mit einer Kombination von etablierten Trennverfahren (s. Tabelle 1).

Es gilt in jedem Einzelfall zu prüfen, ob eine Rückgewinnung eines Stoffes aus einem Abfallstrom technisch machbar ist und inwieweit der zurückgewonnene Wertstoff den Qualitätsanforderungen genügt, um im eigenen oder in einem anderen Betrieb wiederverwertet oder weiterverarbeitet zu werden.

Ferner ist zu prüfen, inwieweit neben der Wertstoffabtrennung auch die zuverlässige Einhaltung von Grenzwerten gelingt. Letztlich entscheiden eine Kostenrechnung und Nachhaltigkeitsbewertung, ob eine Wiederverwertung wirtschaftlich bzw. auch ökologisch sinnvoll ist.

Insbesondere bei Rohstoffen mit eingeschränkter Verfügbarkeit ist ein Kontakt zwischen Erzeugern und Verbrauchern anzustreben, um den Wissensaustausch über Techniken zur (Rück-)Gewinnung der Rohstoffe aus Abwässern und Abfällen zu fördern.

Im Rahmen des technischen Fortschritts sind alle Methoden interessant, die den Wertstoff oder die Verunreinigung möglichst selektiv aus einer verunreinigten Matrix aufkonzentrieren. Im Idealfall sollte ein möglichst hoher Abscheidegrad (99,9 %) erreicht werden. Ein gegebenenfalls bei der Konzentrierung eingesetzter Hilfsstoff sollte regenerativ verwendbar sein.

Aufgrund dieser Anforderungen und Vorgaben gibt es für einzelne Zielsubstanzen auch weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich neuer Materialien und Methoden zur selektiven Abtrennung aus spezifischen Prozessströmen. Beispielsweise wäre es sinnvoll, die Palette der zur Auswahl stehenden selektiven Adsorber deutlich zu erweitern. In diesem Kontext sind neue funktionelle Gruppen für Selektiv-Ionentauscher, Metall- oder Metalloxid-dotierte Polymere oder Festkörper mit spezifisch geformten Adsorptionszentren (MIPs: molecularly imprinted polymers) von großem Interesse.

Der Forschungsstand zur selektiven Adsorption von organischen Verbindungen ist im Vergleich zur Adsorption von anorganischen Stoffen, historisch und auch chemisch/physikalisch bedingt, weniger weit fortgeschritten, so dass in diesem Bereich ein großer Entwicklungsbedarf besteht.

Impactabschätzung

Da die meisten der oben genannten Wertstoffe toxische, refraktäre und/oder umweltbelastende Eigenschaften besitzen, ist eine Rückgewinnung nicht nur ökonomisch sondern auch ökologisch sinnvoll.

Die mediale Verbreitung ökonomisch erfolgreicher Projekte zur Wertstoffrückgewinnung in Verbindung mit einer integrierten, nachhaltigen Industriewasserwirtschaft stellt eine Triebkraft für weitere Projekte dar.

Darüber hinaus ist auch der strategische Nutzen in Form einer abnehmenden Abhängigkeit von Rohstofflieferanten und einer Schwächung von Monopolstellungen bei der Impactabschätzung zu berücksichtigen.

4.3 Salze

Ausgangssituation

Anorganische Salze gelangen vorwiegend bei der Erzgewinnung und -aufarbeitung, Salz- und Düngemittelproduktion und über die chemische Industrie, petrochemische Industrie und Lebensmittelindustrie in Prozessabwässer. Einen Sonderfall stellen Konzentrate aus Meerwasserentsalzungsanlagen dar.

Die Salzfracht ist durch Stoffverluste bei der Produktion, Ab- oder Nebenprodukte, Reaktionsprodukte (chemische Industrie) sowie Säuren/Laugen, die in Reinigungsprozessen, für Reaktionen oder in der Abluft- und Abwasserreinigung eingesetzt werden, bedingt. Bei der Abwasserreinigung erhöht sich die Salzfracht insbesondere durch Neutralisationsprozesse.

Relevante Ionen der anorganischen Salze sind vorwiegend Na^+ , K^+ , Cl^- und SO_4^{2-} .

Organische Salze (z. B. neutralisierte organische Säuren) werden in der biologischen Abwasserbehandlung meist zu CO_2 bzw. den entsprechenden Carbonat-Spezies umgesetzt und liegen nach der Abwasserbehandlung größtenteils als anorganische Salze vor.

Salz hat im Hinblick auf die industrielle Wasserwirtschaft folgende Relevanz:

a) Ein Salzeintrag kann Auswirkungen auf die ökologische Situation der Gewässer haben. In der überwiegenden Anzahl der Fälle erfolgt bei der Abwasserreinigung keine Entfernung der Salze, sondern sie werden mit dem von Organik und Nährstoffen gereinigten Abwasser in die Gewässer abgegeben. In den meisten Fällen ist der Verdünnungseffekt so groß, dass negative Auswirkungen auf die Gewässer zumindest akzeptabel sind (s. Abb. 9). Dort, wo dies nicht der Fall ist, gibt es Bestrebungen, die Auswirkungen durch ein Salzmanagement (z. B. Rhein-Salz-Abkommen) in Grenzen zu halten.

Diese Abschätzung ist von großer Bedeutung, weil für die meisten Salze kaum Verfahren existieren, um sie aus dem Abwasser zu entfernen. Darüber hinaus sind sie fast immer – insbesondere im Vergleich mit Verfahren zur Entfernung von organischen Verunreinigungen – mit einem hohen Energieverbrauch und entsprechend hohen Kosten verbunden. Elektrische Verfahren und Membranverfahren eignen sich nur für die ersten Schritte einer Aufkonzentrierung, so dass am Ende fast nur thermische Verfahren (Eindampfung/Kristallisation) einsetzbar sind. Fällverfahren gibt es nur für wenige Salze (z. B. Sulfat) und führen darüber hinaus je nach Wassermatrix zu einer Sekundärbelastung des Prozessabwassers.

	Herkunft	Entfernung?	Verfahren
Organika	1) Nebenprodukte der Reaktionen 2) Reaktionshilfsmittel (Löse-, Extraktions-, ...)	"immer" erforderlich	Nassoxidation, H_2O_2 , O_3 , Fällung/Flockung, elektrochem. Oxidation, Strippung, Destillation, Extraktion, Adsorption (Aktivkohle, Harze, ...), biologische Verfahren (aerob, anaerob), ...
industrielles Abwasser	1) Reaktionsprodukt (stöchiometrisch) 2) aus Säuren/Laugen (für Reaktion) 3) aus Säuren/Laugen (Reinigungsprozesse, Abluftreinigung, Abwasserreinigung, ...)	i. d. R. nur bei sensiblen Gewässern erforderlich	Membranverfahren, elektrische Verfahren, Eindampfung, Kristallisation, (Fällung)
anorganische Salze (überwiegend Na^+ , K^+ , Cl^- , Br^- , SO_4^{2-})			

Abb. 9: Salze in industriellem Prozessabwasser

b) **Salz ist ein Wertstoff.** Salze können entweder direkt oder als Rohstoff für weitere Anwendungen (z. B. Düngemittelproduktion, Chlorerzeugung) genutzt werden. Beide Möglichkeiten stellen aber in der Regel hohe Anforderungen an die Reinheit des Salzes (als Lösung oder Feststoff). Der Aufbereitungsaufwand (Entfernung störender Matrix-Inhaltsstoffe, z. B. Organik) ist entsprechend hoch. Bei der Nutzung von NaCl-Solen in Elektrolysen sind beispielsweise Reinheitsanforderungen in Bezug auf organischen Kohlenstoff oder Stickstoff im Bereich von oder unter 1 ppm üblich. Daher erfordern solche Anwendungen immer auch eine gewisse Risikobereitschaft von Betreibern/Anwendern.

c) **Hohe Salzkonzentrationen hemmen die biologische Abwasserreinigung.** In der Praxis haben sich je nach Reinigungsanforderung Konzentrationen von 2–5 % als noch akzeptabel für biologische Verfahren erwiesen. Verfahren mit Spezialbiozöosen haben sich trotz intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Praxis nicht durchgesetzt. Daher ist eine Begrenzung der Salzkonzentration für den Einsatz der günstigen und vergleichsweise Ressourcen-schonenden biologischen Verfahren für die Prozessabwasserreinigung unverzichtbar.

Vision/Potentialabschätzung

Die Problematik hoher Salzkonzentrationen im Prozessabwasser nimmt zu, da sich durch zunehmende Wassereinsparung und Kreislaufschließungen höhere Konzentrationen einstellen. Darüber hinaus steigen die Anforderungen an die Gewässerqualität und Aspekte der Ressourcenschonung spielen zunehmend eine Rolle.

Auch Trinkwassergrenzwerte für Salze und einzelne Ionen wirken sich zunehmend auf die erlaubten Emissionen in Gewässer aus.

In Zukunft wird die Salzkonzentration der Abwässer über die Wirtschaftlichkeit des Recyclings entscheiden. Dies gilt insbesondere für Regionen, in denen das Rohwasser aus Meer- oder Brackwasser gewonnen wird. Die aus diesem Prozess resultierenden Abwässer besitzen geringe Leitfähigkeiten und können somit vergleichsweise kostengünstig aufbereitet werden.

Im Jahr 2030 wird es in erheblich größerem Umfang erforderlich sein, Salz aus Abwasser abzutrennen und wenn möglich zurückzugewinnen. Hierfür sind Verfahren erforderlich, die einen verglichen mit dem heutigen Stand der Technik drastisch reduzierten Energieeinsatz erfordern.

Dabei ist nicht nur eine Optimierung von bestehenden Verfahren(-skombinationen), sondern auch die Entwicklung und Etablierung von gänzlich neuen Verfahren(-skombinationen) anzustreben.

Die Etablierung von ökobilanziellen Betrachtungen zur Abwägung zwischen der Schonung von Salzressourcen und dem Energie- und Ressourcenverbrauch bei der Aufreinigung ist zwingend erforderlich.

Entwicklungs- und Laborerfahrungen zum Abbau von Organik mit biologischen Verfahren in Wässern mit hohen Salzkonzentrationen müssen in praktische Anwendungen überführt werden. Zurzeit fehlen weniger die spezialisierten Mikroorganismen als vielmehr Betriebs- und Steuerungsstrategien.

Trotz potentieller Fortschritte wird der Zielkonflikt zwischen Wassereinsparung und der Schaffung von Voraussetzungen für eine biologische Prozessabwasserbehandlung bestehen bleiben. Derzeit wird weltweit vielerorts das Abwasser bereits verdünnt, um eine biologische Behandlung zu ermöglichen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

a) Übergeordneter Entwicklungsbedarf

- Weiterentwicklung von Werkzeugen zur ökobilanziellen Betrachtung, Standardisierung und Bewertung; Berücksichtigung bei Genehmigungsverfahren
- Salzmanagement

b) Verfahren zur Salz Entfernung / -reduktion

- Etablierung von best-practice-Beispielen zur Reduktion des Einsatzes von Säuren und Laugen (z. B. Regelung von alkalischen Wäschern anstelle des Betriebs im „Komfortbereich“)
- Weiterentwicklung der thermischen Trennverfahren (z. B. Membrandestillation, umgekehrte Elektrodialyse)
- Konzepte zur Nutzung von Abwärme für thermische Verfahren (z. B. Wärmepumpen, Energiespeicher)
- Entwicklung von Strategien für den Betrieb von Ionentauschern mit dem Ziel einer geringeren Salzfrachterhöhung in der Regeneration (z. B. alternative Regenerationsmittel, direkte Fällung bei der Regeneration)
- Grundlagenforschung für gänzlich neue Verfahrensansätze (z. B. biologische Salzanreicherung)

- c) Verfahren zur Aufreinigung von Salzlösungen
 - selektive Verfahren zur Entfernung von polaren organischen Stoffen sowie Ionen aus Salzlösungen
- d) Salznutzung
 - robuste Membranelektrolyseverfahren, die höhere Konzentrationen an Störkomponenten und damit ein Salzrecycling erlauben (insbesondere Si-Verbindungen und Organik)
 - Neubewertung von Qualitätsanforderungen für Produkte auf Salzbasis. Zur Rückführung von (Salz-) Ressourcen in den Rohstoffkreislauf ist es dringend geboten, auch geringere Qualitäten zu akzeptieren, wenn die Möglichkeit besteht.
- e) Biologische Verfahren zur Reinigung salzbelasteter Abwässer
 - Weiterentwicklung insbesondere der anaeroben biologischen Verfahren in Hinblick auf eine höhere Salztoleranz
 - Nutzung der Salztoleranz mariner Algen für die Abwasserbehandlung
 - Entwicklung und Etablierung von Steuerungs- und Betriebsstrategien zur Nutzung von halotoleranten bzw. halophilen Biozönosen in der biologischen Abwasserreinigung
- f) Verfahren zur Erzeugung von ultrareinen Wässern
 - Weiterentwicklung der elektrischen Hybridverfahren (z. B. kapazitive Deionisation)

Impactabschätzung

Eine optimierte Strategie zum Umgang mit Salzen in industriellen Prozesswässern wird sich vor allem auf den Bereich der Ressourcenschonung auswirken. Bei der Salzgewinnung fallen zum Teil erhebliche Mengen an Abfällen in fester und flüssiger Form an (z. B. bei der Kalisalzproduktion nach Stand der Technik das Vierfache der Produktmenge). Eine Rückführung von Salzen aus Prozessabwässern hat daher häufig auch indirekt erhebliche positive Auswirkungen.

Die biologische Abwasserreinigung ist in der Regel das kostengünstigste und Ressourcenschonendste Verfahren der Abwasserbehandlung und dementsprechend weit verbreitet. Wenn es gelingt, die tolerierbaren Salzkonzentrationen zu erhöhen, wird sich dies positiv auf den Energieeinsatz, Ressourcenverbrauch und auf die Kosten auswirken. Dies gilt in besonderem Maße für Anaerobverfahren.

5 Verfahren zur Realisierung

Aufbauend auf den Handlungsfeldern werden in diesem Kapitel die Ausgangssituation, die Potentiale und die Herausforderungen sowie der dazu notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf für ausgewählte Verfahren beispielhaft aufgezeigt, um eine integrierte, nachhaltige Industriewasserwirtschaft zu ermöglichen. Darüber hinaus erfolgt eine Abschätzung der erzielbaren Wirkungen.

5.1 Biologische Verfahren

5.1.1 Allgemein

Ausgangssituation

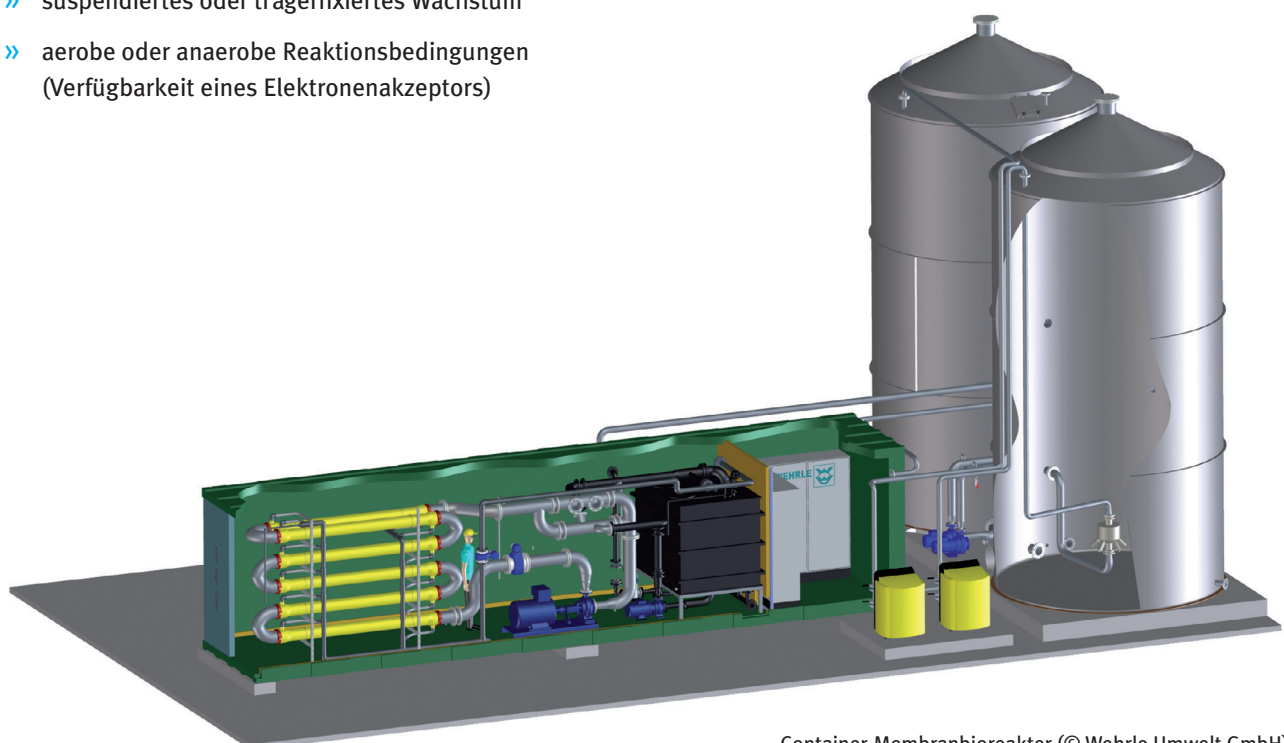
Biologische Verfahren besitzen aufgrund der in der Regel geringeren Kosten im Vergleich zu chemisch-/physikalischen Verfahren in der Abwasserbehandlung eine herausragende Bedeutung. Eine Vielzahl von unterschiedlichen Reaktorkonzepten und Verfahren wird eingesetzt, um Mikroorganismen optimale Kultivierungsbedingungen für die gewünschten Abbau- und Reinigungsleistungen zu bieten. Durch die Variation verschiedener Prozessparameter lässt sich in den Reaktoren die gewünschte Biomasse (z. B. Nitrifikanten, methanbildende Organismen) kultivieren. Prinzipiell unterscheidet man folgende Prozessführungskonzepte:

- » Biomassewachstum oder Erhaltungstoffwechsel
- » suspendiertes oder trägerfixiertes Wachstum
- » aerobe oder anaerobe Reaktionsbedingungen (Verfügbarkeit eines Elektronenakzeptors)

Aerobe und anaerobe Prozesse laufen in vielen Verfahren zur Abwassersammlung und -behandlung parallel. Erst nach dem aktiven Einbringen von Sauerstoff in der Belebung kommen auch aerobe Prozesse in größerem Umfang zum Tragen. Sowohl in der Belebtschlammflocke als auch in Biofilmen können in Abhängigkeit der Biomasseverteilung lokal Sauerstofflimitierungen vorliegen und sich anaerobe Bereiche ausbilden.

Die überwiegende Zahl biologischer Abbauprozesse läuft in zentralen Kläranlagen ab, in denen die Produktionsabwässer eines Standortes zur Nutzung der Synergien („economy of scale“, Ausgleich von Fracht und Hydraulik, Zusammenführung von C- und N-reichen Strömen, Vermeidung von toxischen Konzentrationen) gemeinsam behandelt werden. Dabei ergeben sich folgende Problemkreise:

- a) Die unzureichende biologische Abbaubarkeit bestimmter synthetischer Substanzen sowie hemmende Wirkungen führen zu einem für eine Direkteinleitung oder Wasserwiederverwendung nicht ausreichenden Abbau. Daher müssen chemisch-physikalische Verfahren – in der Regel für Teilströme – in den Behandlungsprozess integriert werden. Dem Einsatz von Spezialbiozönosen im technischen Maßstab stehen Hemmnisse im Wege, z. B. schwankende Zusammensetzung des Abwassers hinsichtlich Substrat- und Schadstoffkonzentration,



Container-Membranbioreaktor (© Wehrle Umwelt GmbH)

unregelmäßige Anfallzeiten, geringe Wachstumsraten der Biozönosen in Verbindung mit unzureichenden Kenntnissen über deren Zusammensetzung und den notwendigen Milieubedingungen, Betriebsschwankungen und die Gegenwart toxischer Verbindungen (z. B. Schwermetalle), hohe Salzbelastungen (s. Kap. 4.3), schwankende pH-Werte und Temperaturen sowie Substratmangelsituationen. Die überwiegende Zahl biologischer Abbauprozesse nutzt heute Biomasse in der Wachstumsphase. Für einige Anwendungen (z. B. Dehalogenierung, Entfärbung) konnte im Labormaßstab gezeigt werden, dass die oben aufgeführten Probleme durch eine Immobilisierung, d. h. durch eine Fixierung der Spezialisten auf geeigneten Trägermaterialien, oder durch die Entkopplung der Abwasser- von der Substrat- und Biomassenverweilzeit mit Membranen, wirkungsvoll überwunden werden können. Eine praktische Umsetzung findet jedoch derzeit nur in vernachlässigbarem Umfang statt.

- b) Die Mechanismen biologisch bedingter Betriebsprobleme (z. B. Schaumbildung, Schwimmschlamm) sind noch nicht ausreichend verstanden. Gegenmaßnahmen sind häufig nur zum Teil erfolgreich oder beispielsweise aufgrund eines hohen Chemikalieneinsatzes unbefriedigend.
- c) Die optimalen Bedingungen und die Kinetik erst seit kurzem genutzter biologischer Prozesse (z. B. Deammonifikation, Eisen-/Manganbakterien) sind noch nicht vollständig bekannt und/oder werden nicht umgesetzt.
- d) Die Anpassung der Reaktortechnik an die Anforderungen und die Kinetik der Mikroorganismen gelingt nur unzureichend.

Die Steuerung der in der Abwassertechnik verwendeten biologischen Prozesse basiert heute immer noch weitgehend auf Erfahrungswerten sowie auf physikalischen und chemischen Messwerten. Durch diese Vorgehensweise werden die für die Verfahren entscheidenden biologischen Prozesse nur indirekt durch die Messung des Substratverbrauchs und/oder der Biomasse- und Produktbildung kontrolliert. Nur in Einzelfällen ist es bereits üblich, die für eine bestimmte Abbau- bzw. Produktleistung verantwortlichen Mikroorganismen direkt nachzuweisen und zu quantifizieren. Beispielsweise werden nitrifizierende Bakterien mittels Fluoreszenz in situ Hybridisierung (FISH) erfasst.

Vision/Potentialabschätzung

Für die Transformation der meisten organischen Abwasserinhaltsstoffe stehen Mikroorganismen zur Verfügung, die in technischen Anlagen angereichert werden können. Damit ist sowohl eine vollständige Mineralisierung als auch die Bildung von Wertstoffen (z. B. CH_4 , H_2 , Laktat, Öl, Strom) auch bei hohen Temperaturen und Salzkonzentrationen sowie außerhalb des neutralen pH-Bereichs auf biologischem Wege möglich. Diese Prozesse basieren auf spezialisierten Bakterien (z. B. eisenoxidierende und -reduzierende, halophile, thermophile Organismen), auf Algen, Pilzen und Enzymen, die zum Teil auf Trägermaterialien mit weiteren Funktionen (Membranen, Sorbentien) immobilisiert sind. Möglich sind auch eine mehrstufige Prozessführung mit Trennung der Biozönosen und Anpassung der Reinigungsstufen an Spezialisten (Konkurrenzsubstrat, Cometabolismus, sequentieller Abbau) oder spezielle Reaktoren (Algenreaktoren, Brennstoffzelle, Hybridreaktoren). Durch die Kenntnis der mikrobiologischen Reaktionen sind die Auslegung und der Betrieb der Bioreaktoren sowohl für die Behandlung von Konzentraten als auch von gering konzentrierten Prozessabwässern mit Spurenstoffen wirtschaftlich durchführbar.

Zur Teilstrombehandlung direkt am Entstehungsort steht ein Portfolio von biologischen Prozessen zur Verfügung, welches bei Bedarf durch chemisch-physikalische Verfahren ergänzt werden kann.

Auch einige Algen sind in der Lage bei mixotrophem Stoffwechsel ohne energieintensive Belüftung unter bestimmten verfahrenstechnischen Randbedingungen Abwasserinhaltsstoffe effektiv abzubauen. In sonnenreichen Regionen werden diese Organismen in Algen-Bakterien-Mischbiozönosen in der industriellen Abwasserbehandlung angewendet. Mikroalgen werden zur selektiven Sorption von bestimmten Abwasserinhaltsstoffen und zur Rückgewinnung von beispielsweise Schwermetallen erfolgreich eingesetzt.

Bio-elektrochemische Systeme ermöglichen die direkte Stromerzeugung beim Abbau von gelösten bzw. feinpartikulären organischen Stoffen. Insbesondere Abwasser mit relativ geringer organischer Belastung, wie kommunales Abwasser, könnte so energieeffizient behandelt werden.

Um eine mögliche Schädigung der Biozönose durch hemmende und toxische Substanzen im Zustrom zur biologischen Abwasserbehandlung oder während einer weitergehenden physikalisch-chemischen Stufe zu vermeiden, werden toxische Substanzen durch zuverlässige Wirktests

online mit ausreichend schnellen Ansprechzeiten erkannt und durch Separation (Stapelung) von der biologischen Anlage ferngehalten. Diese Wirkttests werden auch für die Qualitätssicherung der Anlagenabläufe eingesetzt.

Die Mechanismen biologisch bedingter Betriebsprobleme sind tiefreichend verstanden und beschrieben. In der Praxis existieren handhabbare Strategien, um auftretende Probleme durch eine gezielte Beeinflussung der Biozönose zuverlässig und ohne Chemikalieneinsatz zu bekämpfen.

Durch die Kombination etablierter und neuer verfahrenstechnischer Prozesse mit spezifischen mikrobiellen Populationen sowie online erfassbaren Daten zur mikrobiellen Aktivität ist eine deutlich spezifischere und effizientere Abwasserbehandlung möglich. Durch die gezielte Beeinflussung der verschiedenen Subpopulationen in den Reaktoren kann sowohl deren Interaktion als auch deren spezifische Aktivität gezielt gesteuert werden. Mit Hilfe von molekularbiologischen Nachweismethoden ist es möglich, die Präsenz und Aktivität von Subpopulationen, die für spezifische Abbauleistungen verantwortlich sind (z. B. Nitrifikation, Denitrifikation, Phosphat- bzw. Schwermetallakkumulation), sehr schnell und gegebenenfalls online zu erfassen und in adaptive Regulierungskonzepte für die Behandlungsverfahren zu integrieren.

Neben den klassischen Abwasserreinigungsanlagen werden verschiedene Varianten von Membran- und Biofilmreaktoren eingesetzt, mit dem Ziel Abwasserinhaltsstoffe effektiv abzubauen und gleichzeitig Wertstoffe und/oder Energie aus der Abwassermatrix zu gewinnen. In diesem Kontext spielen Verfahren mit Trägerfixierung der Biomasse eine wichtige Rolle, da diese unempfindlicher auf suboptimale Kultivierungsbedingungen und störenden Einflüsse reagieren und somit eine verbesserte Prozessstabilität ermöglichen. Zur Reinigung von Prozessabwässern mit schwer abbaubaren Inhaltsstoffen mit Hilfe immobilisierter Mikroorganismen haben sich je nach Anforderung anaerobe und aerobe Fest- und Fließbettreaktoren durchgesetzt. Bei ausreichenden Biomassekonzentrationen und kurzen Verweilzeiten können sie als leistungsfähige Teilstrombehandlungseinheiten in den Produktionsprozess mit hoher Betriebssicherheit integriert werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Bereich der biologischen Transformation von Prozessabwasserinhaltsstoffen besteht vor allem bei der Anreicherung von Bakterien, Algen, Pilzen und Enzymen mit speziellen Abbaueigenschaften Forschungs- und Entwick-

lungsbedarf. Aktuell verfügbare Methoden zur verlässlichen Identifizierung der Zusammensetzung von Mischkulturen müssen deutlich vereinfacht werden und in situ anwendbar sein. Weiterhin müssen die Populationsdynamiken in definierten Mischkulturen analysiert werden. Dies gilt insbesondere beim Einsatz von Subpopulationen, die in Abwässern mit leicht abbaubarem Substrat Spurenstoffe transformieren können. Die Suche nach kritischen und nutzbaren Transformationsprodukte im Schadstoffabbau sowie Analysen zu mutualistischen Wechselwirkungen sind weitere wichtige Forschungsfelder. Diese Arbeiten müssen durch kinetische Untersuchungen sowohl mit dem Einzelstoff als auch im Multisubstratgemisch (z. B. Wachstumskinetik einzelner Stämme in der Mischkultur, Cometabolismus, kompetitive Substrate) flankiert werden, um die charakteristischen reaktionskinetischen Parameter zu bestimmen. Diese Parameter dienen zur mathematischen Modellierung und Simulation der Abbauprozesse und können zur Störfallsimulation herangezogen werden. Ähnlich sollten extreme Reaktionsbedingungen wie hohe Temperaturen und Salzkonzentrationen, pH-Werte außerhalb des neutralen Bereichs und geringe Substratkonzentration im Mikro- und Nanogrammbereich analysiert werden.

Für die Etablierung von Verfahren mit Mikroalgen sind grundlegende Untersuchungen zur Verbesserung der Photonennutzung, zum Verhalten von Algen-Bakterien-Mischbiozönosen sowie zum chemo-organo-heterotrophen Stoffwechsel („Dunkelstoffwechsel“) unter aeroben Milieubedingungen durchzuführen (Bildung von Ölen als Speicherstoffe). Ziel sollte es sein, die Energieeffizienz der Prozessabwasserbehandlung zu erhöhen und/oder einen Algenöl-Wertstoff beispielsweise als Rohstoff für biogene Kraftstoffe herzustellen. Damit stünde ein Verfahren zur Wertstoffproduktion zur Verfügung, was nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht. Die sorptive Abtrennung und Rückgewinnung von Rohstoffen mit Algen, Bakterien oder Pflanzen ist zwar möglich, für einen wirtschaftlichen Einsatz müssten jedoch die Selektivität, Regenerierbarkeit und Standzeit verbessert werden.

Ein Entwicklungsbedarf besteht nicht nur für schnelle und spezifische biologische Wirkttests zur Quantifizierung kritischer Substanzen, sondern auch für Tests zur schnellen Erfassung von Parametern, mit denen sich die Quantität und Aktivität von Mikroorganismen direkt bestimmen lassen. Hierfür sind die Weiterentwicklung molekularbiologischer Methoden und deren Einsatz in automatisierten Analysesystemen erforderlich. In Kombination mit Bio- und physikalisch-chemischen Sensoren ist eine online-

Überwachung möglich, die auf eine direkte Beeinflussung der Mikroorganismen abzielt und sowohl zur Prozessregelung als auch zum Schutz vor Hemmstoffen genutzt werden kann. Für einen Einsatz im Anlagenbetrieb müssen die zu entwickelnden Systeme ausreichend robust sein.

Die gezielte Beeinflussung bestimmter Subpopulationen in einem Bioreaktor setzt ein besseres Verständnis der Interaktionen zwischen den Mikroorganismen (inner- und zwischenartliche Kommunikation sog. Quorum sensing, z. B. zur Biofilmbildung) voraus. Ziele der Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sind die Förderung von gewünschten physiologischen Leistungen bestimmter Subpopulationen (z. B. Abbau, Biosorption, Akkumulation von Stoffen) und die Unterdrückung physiologischer Prozesse, die zu Betriebsproblemen wie Schwimmschlamm-bildung führen.

Die Beeinflussung des Wachstumsverhaltens von Mikroorganismen ist ein wichtiger Prozessparameter. Bis heute konnte nicht geklärt werden, welche Faktoren entscheiden, ob Mikroorganismen bei Zellrückhalt in den Erhaltungsstoffwechsel übergehen oder ob sie weiterhin unter Ausbildung von Nahrungsketten (Bakterien – Protozoen – Metazoen) planktonisch wachsen. Mit der Möglichkeit das Schlammalter durch die direkte Beeinflussung der Mikroorganismen zu steuern, ergeben sich neue Möglichkeiten der Reduktion des Klärschlammaufkommens.

Weiterhin fehlen Kenntnisse zu den Mechanismen der Biofilmbildung von oberflächenassoziierten Lebensgemeinschaften (Flockungs-, Aggregations-/Agglomerations- bzw. Adsorptionsphänomene, Exopolymermatrix, Biofouling) sowie zu Stofftransportvorgängen in den Biofilmen. Dies erschwert die gezielte Beeinflussung von Biofilmen (z. B. Stabilität von Biofilmen, Biofilmmechanik, physiologische Veränderung der Mikroorganismen, mechanische Beanspruchung) durch Prozessparameter.

Im Bereich der Bioreaktortechnik und der Prozessführung biologischer Verfahren sind weiterhin verfahrenstechnische Grundlagenuntersuchungen in Fließ-, Festbett- und Membranbioreaktoren (MBR) zur Aufwirbelcharakteristik, Durchmischung, Verweilzeitcharakteristik, Fluidodynamik, zum Sauerstoffeintrag, Scale-up sowie bei MBR auch zu einer verbesserten Rückhaltung verschiedener toxischer Stoffe durchzuführen. Damit werden auch zurzeit noch fehlende, grundlegende Daten zur Beurteilung der Energieeffizienz generiert. Weiterhin gilt es Untersuchungen zur mechanischen Beanspruchung von schersensitiven Biozönosen durch die gezielte Scherbeeinflussung durch

Reaktorbauteile (u. a. Rührer und Begasungseinbauten) durchzuführen. Kenntnisse zum Verweilzeitverhalten und zur Reaktionskinetik müssen konsequent angewendet werden. Darüber hinaus sollten auch nachgeschaltete Verfahren (z. B. Sedimentation, Filtration, Flotation) konventioneller Behandlungsanlagen weiterentwickelt und optimiert werden.

Die Entwicklung der bio-elektrochemischen Brennstoffzelle liefert grundlegende Erkenntnisse zum Elektronentransport in Biofilmen, zur Elektrodenentwicklung, Steuerung der Elektrodenpotentiale, Generierung von OH-Radikalen, Optimierung der Reihen- und Parallelschaltung der Zellen sowie zur Maßstabsvergrößerung.

Impactabschätzung

Die Umsetzung der oben beschriebenen Konzepte in die Praxis erfordert umfangreiche Forschungsbemühungen und neue Entwicklungen im Bereich der molekularen Biotechnologie, der Sensorik, der Verfahrenstechnik sowie der adaptiven Prozessführung. Im Fokus sämtlicher Aktivitäten steht die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Verfahren. Die Entwicklung neuer analytischer Technologien und deren Kombination dienen als Grundlage für eine neuartige Prozessregelung und stellen einen wesentlichen Innovationsschub im Bereich der Abwassertechnologie dar.

Bei der Destruktion von Prozessabwasserinhaltsstoffen sind biologische Prozesse für die meisten Anwendungen bereits heute die wirtschaftlichste Variante. Durch die Entwicklungen der nächsten Jahre werden die Anwendungsgebiete biologischer Verfahren erweitert und ihre Wirtschaftlichkeit verbessert; gleiches gilt für die Wertstoff- und Energieproduktion (z. B. Algen, H₂, Strom). Die Etablierung von Anwendungen unter Extrembedingungen (Temperatur, Salinität, Konzentration, pH-Wert) wird zu einer zusätzlichen Verbreitung der biologischen Verfahren führen, da dann Prozessströme, die bisher thermisch oder mehrstufig entsorgt werden müssen, effizient behandelt werden können. Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die mit dieser Entwicklung und mit der Modularisierung/Automatisierung möglich werdende prozessintegrierte Wasser- und Wärmerückgewinnung. Es ist davon auszugehen, dass neue/verbesserte biologische Verfahren im Rahmen der Prozessabwasserbehandlung und -rückgewinnung einen überaus wichtigen Beitrag zur abwasserarmen Produktion leisten und darüber hinaus die Produktionskosten durch Stoff-, Wasser- und Energierückführung senken werden. Sie sind somit ein wichtiger Bestandteil einer integrierten, nachhaltigen Industriewasserwirtschaft.

5.1.2 Anaerobverfahren

Ausgangssituation

Die Anaerobverfahren finden aufgrund des Energiegewinns bei gleichzeitiger Einsparung von Belüftungsenergie breite Anwendung bei organisch hoch belasteten Abwässern. Sie werden zumeist als Vorreinigungsstufe vor einer abschließenden Aerobstufe eingesetzt. Bei einem hohen Stoffumsatz der anaeroben Bakterien sind der Aufwand sowie die Kosten für die Schlamm Entsorgung und der Nährstoffbedarf gering, was vor allem bei stickstoff- und phosphorarmen Prozesswässern vorteilhaft ist.

Die anaerobe Abwasserreinigung wird aktuell unter den Voraussetzungen eingesetzt, dass die organischen Abwasserinhaltsstoffe hochkonzentriert vorliegen, das Abwasseraufkommen kontinuierlich erfolgt und keine oder kaum Hemmstoffe im Abwasser enthalten sind.

Die bedeutendsten Branchen mit überwiegend anaerober Abwasserbehandlung sind die Lebensmittelindustrie sowie die Papier- und Zellstoffindustrie. Darüber hinaus werden anaerobe Verfahren vermehrt auch in der chemischen Industrie eingesetzt.

Aktuelle, großtechnisch genutzte Verfahren zielen auf einen möglichst weitgehenden Biomasserückhalt mit anschließender Rückführung ab, da die aktive Biomasse durch geringe Wachstumsraten charakterisiert ist. Folgende Verfahren zum Biomasserückhalt werden verwendet (Auswahl):

- » Sedimentationsverfahren mit Schlammflocken:
 - Belebungsverfahren mit nachgeschaltetem Nachklärbecken,
 - MBR
- » Verfahren mit immobilisierter Biomasse
 - Pellets (granulierte Biomasse): Upflow-anaerobic-sludge-blanket-(UASB)-, Expanded-granular-sludge-bed-(EGSB)-, Internal-circulating-(IC)-Verfahren
 - Verfahren mit Trägermaterial (Festbett, Fließbett)

Die Anwendung anaerober MBR wird derzeit in Pilotanlagen getestet. Die Hauptschwierigkeit ist die schlechte Filtrierbarkeit anaerober Schlämme. Außerdem ist die bei aeroben MBR weit verbreitete Deckschichtkontrolle mittels Luft im anaeroben Bereich nicht möglich und der Ersatz durch Biogas aufwändig und sicherheitstechnisch bedenklich.

Vision/Potentialabschätzung

Durch die zunehmenden Energiekosten in den kommenden Jahr(zehnt)en ist es zwingend erforderlich einerseits den Energieverbrauch von industriellen Prozessen zu minimieren und andererseits industrielle Prozesse zur Energiegewinnung zu optimieren. Daher wird die Rückgewinnung der in Form organischer Inhaltsstoffe in vielen Abwässern enthaltenen Energie stark an Bedeutung gewinnen.

In Zukunft werden auch geringer belastete Abwässer aufgrund des möglichen Energiegewinns anaerob gereinigt werden, wenn es gelingt, die durch den Stoffwechsel der anaeroben Spezies bedingten Anforderungen besser zu verstehen und geeignete Milieubedingungen zu realisieren. Zusätzlich zu den heute üblichen mesophilen anaeroben Biozönosen werden auch thermo- und psychrophile, sowie halotolerante und halophile anaerobe Mikroorganismen eingesetzt werden.

Thermophile Organismen zeichnen sich durch einen höheren Stoffumsatz aus, wodurch die volumenbezogene Umsatzleistung gesteigert werden kann. Psychrophile Anwendungen sind einerseits einfacher realisierbar, erfordern allerdings einen höheren Platzbedarf. Die Anwendung halophiler oder -toleranter Biozönosen ist vor allem in der chemischen, aber auch in der petrochemischen Industrie interessant. Zusätzlich wird auch das Stoffwechspotential spezieller anaerober Spezies genutzt werden. Beispielsweise werden die biologische Sulfatreduktion und Deammonifikation zur Salzentfernung eingesetzt werden.

Darüber hinaus können einige unter aeroben Milieubedingungen refraktäre Abwasserinhaltsstoffe anaerob mittels Reduktion besser und effizienter umgesetzt werden als mittels Oxidation.

Die Anwendung anaerober MBR wird sich ausweiten, da am Reaktorkopf lediglich das Gas abgetrennt wird und die flüssige Phase über Membranverfahren getrennt separiert wird. Aus dem feststofffreien Klarlauf können gelöste Nährstoffe vergleichsweise einfach abgetrennt werden (z.B. Nanofiltration/Umkehrosmose, Fällung, Ionentauscher, Strippung).

Modulare, kompakte und kostengünstige Verfahrenskonzepte werden die Verbreitung anaerober Verfahren deutlich vorantreiben.

Speziell Betriebe, in denen organisch stark belastete Prozesswasserteilströme anfallen, werden solche anaerobe

Verfahren zunehmend nutzen. Höher belastete Teilströme werden verstärkt anaerob vorgereinigt werden, da die Prozesse robuster, effizienter und kostengünstiger werden.

Prozessabwässer können sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein. Dennoch wird die Auslegung der Verfahren auf der Basis von Ergebnissen, die mit einfachen, standardisierten Versuchsanlagen nach einem vereinheitlichten Schema ermittelt werden, erfolgen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Obwohl anaerobe Verfahren weit verbreitet sind, sind sie im Vergleich zu aeroben Reinigungsverfahren deutlich weniger gut verstanden.

Folgende Besonderheiten anaerober Stoffwechselforgänge sind vordringlich zu erforschen:

- » das Zusammenspiel der in mehreren Stufen erfolgenden anaeroben Abbauschritte, insbesondere bei der Hydrolyse, welche die Effizienz aller nachfolgender Degradationsstufen bestimmt
- » der reduktive Abbau von aerob nicht abbaubarer Verbindungen (refraktäre Stoffe)
- » psychro- und thermophile Anaerobier
- » halophile bzw. halotolerante Anaerobier
- » Sulfatreduktion und Deammonifikation

Weiter sind auf das anaerobe Stoffwechselgeschehen angepasste Verfahrenskonzepte zu entwickeln:

- » Anpassung der Reaktorsysteme an die Abbaukinetik (v. a. an die Hydrolyse)
- » eigenständige anaerobe Reinigung (ohne aerobe Nachreinigungsstufe)
- » Verfahren zur Wasserstofferzeugung, Sulfatreduktion und Deammonifikation

Verfahrenstechnische Ziele sind dabei:

- » kompakte, einfache Anaerobsysteme
- » Teilstrombehandlung auch kleinerer Volumenströme
- » weitergehende Energieproduktion
- » Verringerung des Methanschlupfes

Großer Forschungsbedarf besteht beispielsweise bei der Etablierung anaerober MBR-Verfahren, wobei die Schwerpunkte auf der Modul- und Membranoptimierung sowie auf der Entwicklung eines Gesamtkonzeptes liegen.

Auch die Schwefelabtrennung ist zu optimieren, um die Verwertung zu verbessern und geeignete Verfahren zur CO₂-Abtrennung weiter zu entwickeln. In Bezug auf eine sichere biologische Entfernung von Schwefel besteht vor allem Forschungsbedarf zur Physiologie der Stoffwechselspezialisten.

Eine vereinfachte und schnelle Untersuchung unterschiedlicher Abwässer zur Anpassung der Verfahrensauslegung an den spezifischen Bedarfsfall wird die Verbreitung anaerober Verfahren beschleunigen.

Impactabschätzung

Mit einer steigenden Auslegungssicherheit wird das Spektrum von Anwendungen von anaeroben Verfahren zunehmen; dies betrifft zum einen die anaerobe Reinigung von Teilströmen und zum anderen diskontinuierlich anfallende Prozesswässer.

Die Möglichkeiten zum selektiven Umbau der Organik in Methan als Energiespeicher oder bis zu Basischemikalien werden genutzt werden.

Aufgrund der geringen spezifischen Wachstumsraten anaerober Biozönosen und des geringen Nährstoffbedarfs werden die (keimarmen) bakterienfreien Anlagenabläufe von anaeroben MBR zur Bewässerung/Düngung landwirtschaftlicher Flächen genutzt werden. Dadurch können anaerobe Verfahren im Sinne einer schadstofffreien Kreislaufschließung zur Nährstoffrückgewinnung beitragen und helfen, die umweltbelastende und energieaufwändige Produktion von Nährstoffen zu reduzieren.

5.1.3 Aerobe Membranbioreaktoren

Ausgangssituation

Das allgemeine Ziel einer biologischen Abwasserbehandlung ist es, gelöste Kohlen- und Stickstoffverbindungen durch biochemische Oxidation zu eliminieren. Die klassischen biologischen Verfahren sind durch einen hohen Platzbedarf charakterisiert. Ihr Einsatz wird dadurch limitiert, dass die gelösten Abwasserinhaltsstoffe einem mikrobiellen Abbau unter den gegebenen Bedingungen zugänglich sein müssen und unter den Betriebsbedingungen weder toxisch noch inhibierend wirken dürfen. Zudem tritt bei der klassischen Verfahrensführung ein „Schlupf“ von nicht-abgebauten Verbindungen und Mikroorganismen auf, der die Abläufe der Anlagen belasten kann.

Um diese Nachteile zumindest teilweise zu umgehen, haben sich aerobe Membranbioreaktoren und -belebungs-

anlagen in den letzten 20 Jahren zu einem etablierten Verfahrensbaustein entwickelt.

Bei einer Membranbelebungsanlage werden die klassischen Komponenten des Belebtschlammreaktors mit einer Membrantrennstufe als Ersatz für das Nachklärbecken kombiniert. Dabei kommen zumeist getauchte Membransysteme zum Einsatz.

Im Jahr 2011 wurden die weltweit größten kommunalen Membranbelebungsanlagen mit einem PDF (Peak daily flow) von 150 MLD (Million Liter per Day) in Betrieb genommen. Weltweit sind etwa 20 Anlagen mit einer Leistung von > 60 MLD in Betrieb.

Bei der Konzeption von Membranbelebungsanlagen sind die veränderten Belüftungseigenschaften der angereicherten Biomasse, der gesteigerte Energieaufwand bei der Abtrennung der Biomasse sowie die Optimierung der Membranstandzeit die wesentlichen Herausforderungen.

Bei der Behandlung von hochbelasteten industriellen Abwasser(teil)strömen aus der Produktion ist eine Übertragung der aus der kommunalen Abwasserreinigung bekannten Verfahrensweisen nur bedingt möglich. Individuelle, häufig wechselnde Abwasserzusammensetzungen,

die Existenz von schwer abbaubaren, gelösten Inhaltsstoffen und der Wunsch nach einer Steigerung der Raum-Zeit-Ausbeute erfordern angepasste Reaktionsräume, effizientere Belüftungssysteme und wirtschaftliche bzw. robuste Membrantrennstufen. Aufgrund der zumeist deutlich geringeren Abwassermengen sind unterschiedliche, auf den Anwendungsfall zugeschnittene Membrankonzepte einsetzbar. Projektspezifische Konzeptionen müssen häufig durch Vorversuche ermittelt und an die Erfordernisse angepasst werden. Die dazu vorhandene „Toolbox“ ist durch folgende Elemente gekennzeichnet:

- » Reaktorbauformen: z. B. Schlaufenreaktoren, Druckreaktoren, Reaktorkaskaden (z. B. aerob, anoxisch)
- » Belüftungseinrichtungen: z. B. Reinsauerstoffbegasung, Injektoren, Ejektoren Membranbelüftung
- » Membransysteme: getauchte oder extern aufgestellte Cross-Flow-Filtration, Dead-End-Filtration, keramische oder organische Membranen, Platten- Rohr- oder Kapillarmembranen, Mikro-, Ultra- oder Nanofiltration

Aerobe MBR finden in der industriellen Abwasserreinigung aufgrund ihrer Zuverlässigkeit, hohen Reinigungsleistung, Kompaktheit und Anpassungsfähigkeit breite Anwendung. Die Anwendungsfelder beschränken sich

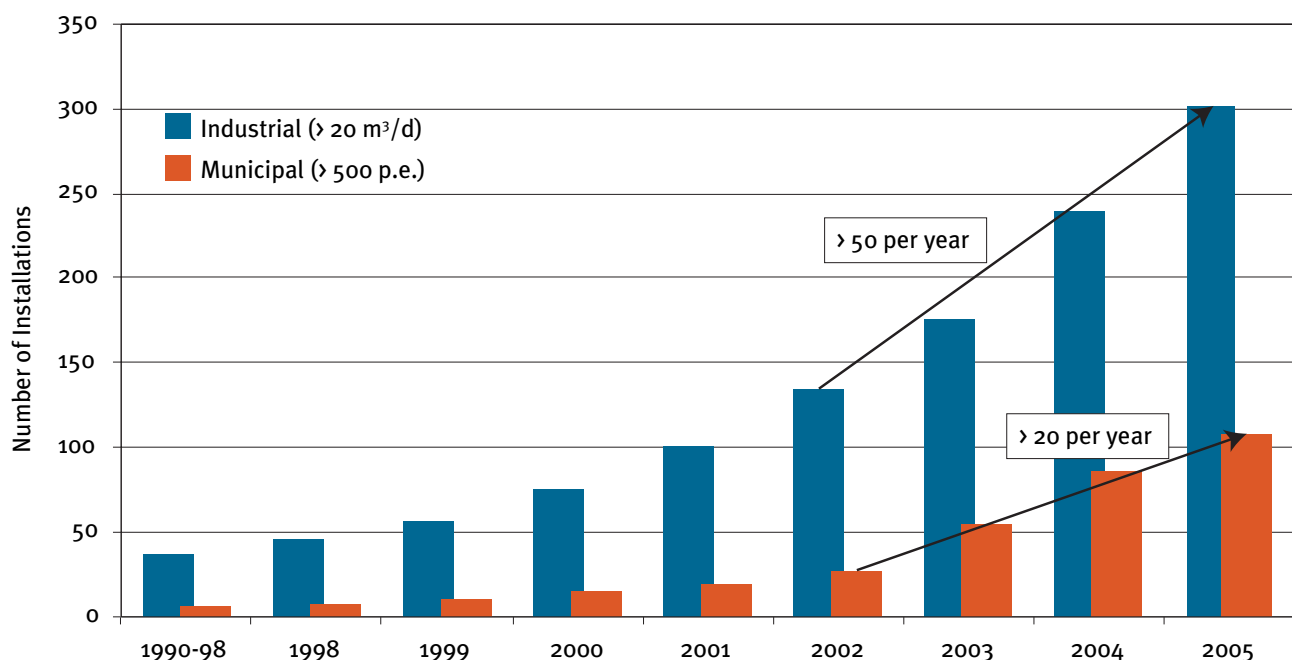


Abb. 10: Anzahl der installierten Membranbioreaktor/Belebungsanlagen¹²

¹² Lesjan B. und Huisjes E.H. (2008): Survey of the European MBR market: trends and perspectives; Desalination 231, 71-81

nicht nur auf die Endbehandlung von Wasser vor der Ableitung/Einleitung, sondern umfassen auch Systeme zur internen Wasserwiedernutzung und Schließung von Wasserkreisläufen.

Europaweit finden sich zahlreiche Anwendungsbeispiele für industrielle MBR-Anlagen. Beispielhaft seien hier einige Installationen aufgeführt.

- » Deponiesickerwasser, Abwasser aus der Abfallbehandlung (› 250 Anlagen)
- » Chemieabwasser, Tankwageninnenreinigung (› 25 Anlagen)
- » Milchverarbeitende Industrie (› 25 Anlagen)
- » Krankenhausabwasser, pharmazeutische Industrie (› 10 Anlagen)
- » Schlachthofabwasser, Tierkörperverwertung (› 10 Anlagen)
- » Papierindustrie (› 10 Anlagen, teilweise mit Abwasserrecycling)
- » Lebensmittelindustrie (› 10 Anlagen)
- » Brauereiabwasser (› 5 Anlagen)
- » Wäschereiabwasser (› 5 Anlagen, mit Abwasserrecycling)
- » Kosmetikindustrie (› 5 Anlagen)

Die zunehmend präferierte Strategie, Wertstoffe im Abwasser am Anfallort zurückzugewinnen oder Verschmutzungen im Teilstrom mit speziell auf den zu eliminierenden Inhaltsstoff ausgerichteten Technologien zu reinigen, führt dazu, dass aerobe MBR-Anlagen vermehrt als erster Schritt einer mehrstufigen Abwasserbehandlung eingesetzt werden.

Daher ist die Nachfrage nach MBR auch 20 Jahre nach der ersten Installation technischer MBR-Systeme in den 1990er Jahren noch immer steigend (s. Abb. 10).

Vision/Potentialabschätzung

Abwässer, die Wertstoffe enthalten oder die mit biologisch nicht oder schwer abbaubaren Inhaltsstoffen belastet sind, werden separat gefasst und gezielt behandelt. Dabei steht die Wertstoffrückgewinnung im Vordergrund. Stoffe, die in konventionellen Kläranlagen biologisch nicht oder nur schwer abgebaut werden können, werden im Teilstrom physikalisch-chemisch oder mit einer aeroben MBR-Vorstufe entfernt.

Beim Einsatz eines aeroben MBR zur Behandlung industrieller hochbelasteter Abwässer oder bei der Teilstrombehandlung werden unterschiedliche Teilprozesse sinnvoll miteinander kombiniert. Die Reaktorausführungen werden an die im vorgelagerten Produktionsprozess entstandenen, teilweise einseitig zusammengesetzten Abwässer angepasst. Effiziente Begasungssysteme und deren intelligente Regelung erfordern deutlich weniger Energie. Neue und zum Teil spezielle Membranreinigungsstrategien sind entwickelt. Bei den Membranwerkstoffen und Modulkonzeptionen erhalten langlebige, flexible und leistungsfähige Systeme den Vorzug gegenüber preiswerter Massenware. Die aeroben MBR werden häufig mit anderen physikalischen oder chemischen Behandlungsschritten gekoppelt, wodurch spezifische und angepasste „Hybridsysteme“ entstehen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Behandlung hochbelasteter industrieller Abwässer erfordert die Ausarbeitung individueller, auf den jeweiligen Anwendungsfall ausgerichteter Lösungskonzepte. Dabei stehen Fragen der Betriebs- und Prozessstabilität des biologischen Vorgänge sowie der Membranabtrennung im Vordergrund.

Reaktionsräume und Belüftungseinrichtungen sind so miteinander zu kombinieren, dass die höheren Feststoffkonzentrationen in MBR-Anlagen ideal mit Sauerstoff versorgt werden können. Die Prozessführungen sind dabei nicht auf ein komplexes Abwassergemisch, sondern auf in Teilstromen und/oder im hochbelasteten Industrieabwasser vorliegende einzelne Inhaltsstoffe auszurichten. Sinnvolle Regelungen der Sauerstoffzufuhr sind zu entwickeln. Akkumulationsmechanismen im MBR oder im Prozess bei Wasserwiedernutzungssystemen sind besonders zu bewerten. Im Folgenden sind die Bereiche mit hohem Forschungs- und Entwicklungsbedarf noch einmal aufgelistet:

- » geeignete Belüftungssysteme für höhere Gehalte an Biomasse
- » Einfluss der Reaktionsraumgeometrie auf die Belüftungseffizienz und den Stoffumsatz
- » Abbauverhalten einzelner Inhaltsstoffe
- » Steuerung/Regelung der Sauerstoffzufuhr in aeroben MBR
- » Stoffakkumulation bei aeroben MBR im Reaktor und in Wasserkreisläufen

Geeignete Membrankonzepte sind unter Berücksichtigung der Reinigung der Membranen, der Membranlebensdauer und des energetischen Aufwands der Filtration zu entwickeln. Besonders bei der Reinigung von Membranen haben sich neue interessante Möglichkeiten gezeigt:

- » Membranreinigung mit Ultraschall
- » Reinigung durch Veränderung des elektrischen Ladungspotentials
- » Reinigung durch pulsierende Strömungen
- » Entwicklung neuer Membranreinigungskemikalien
- » mechanische in situ Membranreinigung

Für die Auslegung und Planung sind neben Datenbanken mit relevanten kinetischen und physiologischen Daten standardisierte Laborversuche gekoppelt mit Modellierungswerkzeugen zu entwickeln. Ein besonders wichtiger Aspekt ist die Adaption und Integration der aeroben Membranverfahren in ein Gesamtbehandlungskonzept oder in den gesamten Produktionsablauf. Die Anpassung der unterschiedlichen Systeme und deren Schnittstellen ist eine große Herausforderung für die Zukunft.

Impactabschätzung

Die Weiterentwicklung von MBR erlaubt einen produktionsintegrierten Einsatz zur Teilstrombehandlung und Wasserwiederverwendung. Die konsequente Behandlung von Teilströmen ermöglicht den Betrieb auf einem höheren Konzentrations- und Temperaturniveau sowie die Vermeidung hoher Investitionskosten für die Infrastruktur (z. B. Speichervolumina, Rohrleitungen). Die bei manchen Inhaltsstoffen zur Elimination zum Einsatz kommenden physikalischen und chemischen Verfahren können durch eine aerobe MBR-Vorbehandlung wirtschaftlicher eingesetzt werden. MBR sind somit ein wichtiger Baustein für eine integrierte, nachhaltige Industriewasserwirtschaft.

In Ländern und Regionen, in denen die Infrastruktur unzureichend ausgebaut ist oder Wasser als Ressource nur eingeschränkt und in schlechter Qualität zur Verfügung steht, erhält die (Vor-)Behandlung von hoch belasteten industriellen Abwässern und Teilströmen eine noch höhere Bedeutung als in den gut entwickelten Industriestaaten. Für Deutschland als eine der führenden Exportnationen wäre eine Vorreiterrolle auf diesem Gebiet vorteilhaft.

5.2 Advanced Oxidation Processes (AOP)

Ausgangssituation

AOP besitzen ein breites Anwendungspotential und werden in der industriellen und kommunalen Abwasserbehandlung, in der industriellen Wasseraufbereitung und -rückgewinnung, aber auch in der Grundwasser- und Trinkwasseraufbereitung eingesetzt¹³. Sie zeichnen sich durch die Beteiligung von Radikalen, im Wesentlichen von OH-Radikalen, an den Reaktionen aus. Aufgrund der radikalischen Reaktionen mit hohem Oxidationspotential sind diese Prozesse für den Abbau von anthropogenen und toxischen organischen Wasserinhaltsstoffen interessant. Darüber hinaus ist die parallele Desinfektion, Entfärbung und Desodorierung des (Ab-)Wassers vorteilhaft.

Eine Besonderheit von Oxidationsverfahren ist die Bildung von Zwischen- und Nebenprodukten. Diese Transformationsprodukte können ebenfalls toxische Wirkungen besitzen, so dass eine genaue Analyse der Prozesse und eine präzise Auslegung solcher Anlagen vor einer möglichen Anwendung notwendig sind.

AOP erfordern im Vergleich zu anderen Verfahren, wie biologischen Verfahren oder Membranverfahren, einen erhöhten Energieaufwand, z. B. für Elektroenergie und/oder chemisch gebundene Energie (Oxidationsmittel). Wirtschaftliche Anwendungen von AOP sind daher zurzeit noch auf vergleichsweise kleine Schmutzfrachten, erkennbare Produktionsvorteile (z. B. verbesserte Produktqualität oder verminderte Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit) und auf Kombinationen mit anderen Verfahren (z. B. biologische, membranbasierte und adsorptive Verfahren) beschränkt.

Eine Anwendungsmöglichkeit mit hohem wirtschaftlichen Potential für AOP ist die Nachbehandlung von aufbereiteten Prozesswässern (z. B. Polishing: Spurenstoffelimination, Entfärbung, Desinfektion), weil bei diesen Verfahren nur ein geringer Oxidationsmittelbedarf besteht.

Vision/Potentialabschätzung

Mit AOP ist eine rückstandsfreie Wasseraufbereitung bezüglich organischer Komponenten möglich. Sie eignen sich deshalb gut als Teilprozess im Rahmen von Verfahren zur Wertstoff- und Wasserrückgewinnung, wobei sowohl die Qualität der rückgewinnbaren Wertstoffe als auch die

13 Sievers M. (2011): Advanced Oxidation Processes. In: Peter Wilderer (ed.) Treatise on Water Science, vol. 4, pp. 377-408 Oxford; Academic Press

des wiederverwendbaren Prozesswassers in der Regel verbessert und darüber hinaus die Menge an Reststoffen und/oder Konzentraten reduziert wird. Beispielsweise können die über eine Fällung rückgewinnbaren Metallsalze in der Qualität verbessert werden, indem die (Mit-) Fällung/Flockung von Organika durch eine vorgeschaltete Oxidation minimiert wird. Daher ist mit einer zunehmenden Bedeutung von AOP in der Wasseraufbereitung zu rechnen.

Potentiale bestehen insbesondere bei

- » der Senkung des Energiebedarfs für die Bereitstellung von Oxidationsmitteln,
- » der gezielten Nutzung oder Vermeidung der Bildung von Intermediärprodukten,
- » der Effizienzsteigerung des Wasserrecyclings durch Prozesskombination.

Zunehmend interessant besonders für wasserarme Regionen mit hoher Solarstrahlung könnte die Photokatalyse werden. Bedingung dafür ist die Entwicklung stabiler und hocheffizienter Katalysatoren.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Aktuelle Forschungsansätze zielen auf folgende Einsatzgebiete ab:

- » energie- und kosteneffizientere Produktion sowie Nutzung von Oxidationsmitteln (Wasserstoffperoxid, Ozon)
- » Reduzierung des Oxidationsmittelbedarfs (gezielte Unterstützung von Kettenreaktionen, Katalysatoren)
- » verstärkte Nutzung und Steuerung von Photonen aus der Solarstrahlung
- » Anwendung von neuen effizienteren Materialien zur Elektro-, Chemo- und Photo-Katalyse
- » verbesserte Reaktorkonzepte und -techniken
- » Prozesskombinationen mit anderen Verfahren
- » Unterstützung der Prozessoptimierung durch verbesserte Reaktionsmodelle, insbesondere zu Radikalreaktionen und den Wechselwirkungen mit Wasserinhaltsstoffen

Bei der Minimierung von Nebenprodukten ist es wahrscheinlich möglich, Forschungsansätze zur Risikoabschätzung von Mikroverunreinigungen zu nutzen, um Prüfmethode und Automatisierungskonzepte für AOP-Anwendungen zu entwickeln.

Künftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht für die Qualitätsverbesserung im Bereich Wertstoffrückgewinnung aus wässrigen Lösungen, da hier ein großes Potential vermutet wird. Ein erstes Praxisbeispiel aus der Leiterplattenproduktion zeigt fünf Vorteile: (1) Minimierung der Abfall- und (2) Abwassermenge (Nullmission), (3) Rückgewinnung einer qualitativ hochwertigen Prozesslösung, (4) Verbesserung der Energieeffizienz und entscheidend auch (5) eine Verbesserung der Produktqualität¹⁴.

Impactabschätzung

Die heute noch visionären Pläne zur energie- und kosteneffizienten Anwendung von AOP können zukünftig erschlossen werden. Dadurch werden neue wirtschaftliche Anwendungsoptionen geschaffen. Da nicht nur die Wertstoffrückgewinnung, sondern insbesondere die Rückgewinnung der Ressource Wasser zukünftig an Bedeutung gewinnen wird, ist zu erwarten, dass AOP in vielen Bereichen einen unverzichtbaren Beitrag zur Schließung von (industriellen) Wasserkreisläufen leisten werden, beispielsweise als Teil von „multi-barrier-concepts“ oder in der Nebenstrombehandlung.



Ozonelektrodenbestückung (© Xylem Inc.)

¹⁴ Dams S, Sörensen M, Weckenmann J, and Csik G (2008): Continuous nickel recycling with integrated electrolyte purifying. *Galvanotechnik* 2, 320-328.

5.3 Membranen für die Wasser- und Abwasseraufbereitung

Ausgangssituation

Die Membranreinigung spielt als physikalisches Trennverfahren mit niedrigem Energieverbrauch eine wichtige Rolle bei der Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung. Aktuell werden polymere Membranen erfolgreich zur Aufbereitung von großen Trink- und Abwasserströmen herangezogen. Dabei kommen vorzugsweise Wickelmodule in der Querstromfiltration und getauchte Membranen als Membranbioreaktoren (MBR) zum Einsatz. Über Polymere Membranen können nicht nur suspendierte Stoffe und Keime, sondern auch gelöste Salze und niedermolekulare Moleküle abgetrennt werden. In der chemischen und pharmazeutischen Industrie müssen vergleichsweise kleine Prozessströme mit spezifischen und funktionalen Membranen aufbereitet werden. In diesem Kontext finden in stärkerem Maße keramische Membranen Anwendung, die aufgrund ihrer hohen mechanischen, chemischen und thermischen Stabilität den Einsatz in aggressiven Medien und die Verwendung von effektiven chemischen Reinigern bis hin zur Heißdampfsterilisation erlauben. Durch diese Eigenschaften ist ein produktionsintegrierter Einsatz der Membrantechnik möglich, bei dem nur Teilströme behandelt und Kreisläufe häufig unter Vermeidung von Wärmeverlusten geschlossen werden. Beispiele sind die Pflege von verunreinigten Öl-Wasser-Emulsionen durch Mikrofiltrationsmembranen, die Pflege von hochalkalischen Laugebädern zur Reinigung von Mehrwegflaschen durch Ultrafiltrationsmembranen oder die Entfärbung chemisch aggressiver und heißer Textilabwässer aus der Textilveredelung durch Nanofiltrationsmembranen.

Vision/Potentialabschätzung

- » Membranverfahren sind die dominierenden Trennverfahren im Bereich der Abwasserreinigung und Wasseraufbereitung. Sie werden überwiegend in Kombination mit anderen Stofftrennverfahren eingesetzt.
- » Die Lücke zwischen Polymere Membranen und keramischen Membranen ist weitestgehend geschlossen. Polymere Membranen sind wesentlich stabiler und langlebiger, keramische Membranen können preiswert in großen Flächen hergestellt werden.
- » Die Verschmutzungsneigung von Membranen und Modulen ist deutlich reduziert; dadurch verlängern sich die Standzeiten der Membranen bei reduziertem Reinigungsaufwand.
- » Neue Membranen mit spezifischen Selektivitäten für bestimmte Wasserinhaltsstoffe und/oder mit zusätzlichen Funktionen (z. B. katalytisch, selbstreinigend, umschaltbar zwischen hydrophob/hydrophil) sind verfügbar.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- » Verbesserung der chemischen, mechanischen und thermischen Stabilität von Polymere Membranen
- » keramische Membrangeometrien mit hoher volumenspezifischer Membranfläche zur signifikanten Reduzierung der spezifischen Membrankosten
- » höhere Durchsatzleistungen der Module bei geringerem Energieaufwand



Hohlfasermembranen in der industriellen Abwasseraufbereitung (© Bayer Pharma AG)

- » Verfügbarkeit keramischer Nanofiltrations-(NF)-membranen mit einer Trenngrenze von 200 g/mol
- » Verbesserung der Selektivität von Membranen ohne Einschränkung der Produktivität
- » Funktionalisierung der Membranen
- » Verfügbarkeit von Ultrafiltrations-(UF)- und NF-Membranen mit hoher Säure- und Laugenstabilität (15–20 %ige Säuren und Laugen)
- » Erhöhung der Stabilität und Selektivität von Membranen in organischen Lösemitteln
- » Kombination der Membranreinigung mit anderen Trenn- und Anreicherungsverfahren
- » Entwicklung von Gesamtlösungen inklusive Konzentratbehandlung
- » neue Modulkonzepte und Membranen für Anwendungen zur besseren Nutzung regenerativer Energien (z. B. Biokraftstoff sowie Biogas-, Synthesegas- und Erdgasreinigung, osmotische Destillation, Direktosmose, Wasserrückgewinnung aus Verbrennungsabgasen)

Impactabschätzung

Der Einsatz von Membranen weist folgende Vorteile auf:

- » Wassereinsparung durch produktionsintegrierte Abwasserreinigung und Kreislaufschließung
- » Erhöhung der Gewässerqualität durch effiziente Abwasserreinigung
- » Energieeinsparung durch energieextensive Trennverfahren
- » Möglichkeit der Kombination mit anderen Verfahren (z. B. Membranbelüftung für biologische Abwasserbehandlung)

Der seit Jahren weltweit steigende Bedarf an sauberem Trinkwasser und die Forderung nach mikrobiologisch unbedenklichem Wasser werden bei einer erfolgreichen Weiterentwicklung der Membranen dafür sorgen, dass die installierten Membranflächen signifikant ansteigen werden. Gelingt eine deutliche Kostensenkung bei der Produktion keramischer Membranen, wird sich ihre Verbreitung deutlich erhöhen. Dies gilt auch für die Anwendung in biotechnologischen Verfahren zur Herstellung spezieller Grund- und Feinchemikalien, z. B. auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen. Verglichen mit chemischen Prozessen zeichnen sich Membranverfahren durch reduzierte Energiekosten aus. Zudem wachsen die Forderungen, bestimmte nicht als Massenrohstoff anfallende, aber essentiell wichtige Stoffe möglichst direkt im Produktionsprozess wiederzugewinnen, beziehungsweise ihre Verteilung in verschiedene Abströme und damit ihre Ausschleusung aus der Wertschöpfungskette zu verhindern. In diesem Kontext eröffnen sich neue Möglichkeiten für den Einsatz von Membranen mit hoher stoffspezifischer Selektivität und/oder zusätzlicher Funktionalität.



DECHEMA
Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-0
Telefax: 069 7564-117
E-Mail: info@dechema.de