



DECHEMA

DISKUSSIONSPAPIER

**Auswirkungen der Circular Economy
in der Prozessindustrie
auf das industrielle Wassermanagement**



Impressum

Autoren

Dr.-Ing. Christoph Blöcher, Covestro Deutschland AG, Leverkusen
Dr.-Ing. Andree Blesgen, Evonik Operations GmbH, Hanau
Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart, Technische Universität Darmstadt
Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen, Technische Universität Berlin
Prof. Dr. Harald Horn, Karlsruher Institut für Technologie - KIT, Karlsruhe
Dr.-Ing. Matthias Kozariszczuk, VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf
Dr.-Ing. Ursula Schließmann, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart
Dr. Thomas Track, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main

Herausgeber



Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
Tel.: +49 69 7564-0
Fax: +49 69 7564-201
E-Mail: info@dechema.de

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.
Dr. Thomas Track
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Mai 2022

Bildnachweis

Titelseite: © AdobeStock_286422998

Vorwort

Die fundamentale Umstellung der Produktionsweise in der Prozessindustrie bei der Transition zur *Circular Economy* sowie die damit einhergehenden Herausforderungen werden derzeit intensiv betrachtet und beschrieben. Weitgehend unberücksichtigt bleiben dabei die Auswirkungen auf die Rolle des Wassers in der Produktion sowie das konkrete industrielle Wassermanagement.¹ Es kann als sicher gelten, dass das nicht an der fehlenden Relevanz des Wassers liegt, sondern daran, dass sich die Prozessentwicklungen derzeit noch in frühen Phasen befinden, in denen Nebenprozesse wegen der Fokussierung auf den Kernprozess wenig Beachtung finden.

Dies gilt es zu ändern, da bereits jetzt abzusehen ist, dass die Umstellung der Produktion gerade in der Prozessindustrie signifikante Auswirkungen auf das industrielle Wassermanagement haben wird. Zudem werden sich die Verfahren der (Ab)wasserbehandlung insgesamt wandeln, von einer Wasserreinigung mit dem Ziel der Entfernung von Inhaltsstoffen hin zu einer Fokussierung auf die Nutzung der Inhaltsstoffe, des Wassers und der darin enthaltenen Wärmeenergie durch Rückgewinnung.

Ziel des Diskussionspapiers ist es, die Bedeutung des Themas „industrielles Wassermanagement“ für die Realisierung einer Circular Economy in der Prozessindustrie aufzuzeigen. Hierfür wird der aktuelle Sach-/ Erkenntnisstand umrissen sowie Wechselwirkungen, Herausforderungen und Entwicklungsbedarfe skizziert.

1. Einführung

In dem Motivationspapier der DECHEMA zur Circular Economy (DECHEMA, 2022) wurden mit Fokus auf den Kohlenstoff-Kreislauf folgende Handlungsfelder als relevant identifiziert, die hier noch um den Bereich Anorganik ergänzt werden:

- (1) *Ganzheitlich ressourcen- und energieeffiziente Prozessketten*
- (2) *Ansätze zur chemischen und biotechnologischen Aktivierung von CO₂ sowie deren verfahrenstechnische Anbindungen an Punktemissionsquellen*
- (3) *Inwertsetzung von Abfallströmen zur Bereitstellung von Monomeren und Fasern als Bausteine nachhaltiger Kunststoffe durch Entwicklung und Optimierung effizienter und rohstoff-toleranter Prozesse zur Rückgewinnung polymerer Rest- und Abfallströme*
- (4) *Substitution bzw. Ergänzung von Kohlenstoff-Verlusten durch nachwachsende Rohstoffe, auch unter Nutzung von Abfall- und Nebenströmen der Land-, Forst- und Lebensmittelindustrie*
- (5) *Entwicklung und Nutzung von Modellen zur integrierten Betrachtung der Stoff- und Energiesysteme sowie ganzheitlich optimalen Konzepten für die Kreislaufwirtschaft*
- (6) *Auswirkung auf verbundene Systeme, wie z. B. Infrastruktur, Flächennutzung, Wassermanagement, Logistik, globale Wertschöpfungsteilung*
- (7) *Inwertsetzung von Abfallströmen durch Rückgewinnung von anorganischen Wertstoffen (z. B. Metalle, seltene Erden) aus Konsum- und Industrieprodukten nach der Nutzungsphase, sowie von Reststoffen aus Prozessen wie Stahl- und Metall-Herstellung/-Verarbeitung.*

¹ In den gängigen Studien zur Zirkularität wie z. B. *Circular Economy Roadmap für Deutschland* (Circular Economy Initiative Deutschland, 2021) oder der Studie *Chemie 4.0 - Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch* (Deloitte, 2017) taucht Wasser lediglich in Form des Bedarfs zur Wasserstoffherzeugung auf und dahingehend, dass das Schließen von Wasserkreisläufen mit Blick auf zunehmenden Wasserstress ebenfalls ein Element der Zirkularität ist. In einem Screening der am häufigsten zitierten 20 Publikationen zum Polymerrecycling aus den Jahren 2009 – 2022 fand sich keine einzige, welche sich explizit mit dem Anfall von Abwasser beschäftigt hat.

Diese Handlungsfelder lassen signifikante Auswirkungen auf die Wassernutzung erwarten. Sie sind dabei eingebettet in die übergeordnete Herausforderung eines global zunehmenden Wasserstress aufgrund von durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen von regionalen Wasserqualitäten und -bilanzen, insbesondere Verringerung der Wasserverfügbarkeit bei gleichzeitig im Zuge des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums zunehmendem Bedarf.

Ein zentrales Element der Circular Economy ist das Recycling. Grundsätzlich wird ein Recycling, insbesondere von Kunststoffen, wegen des geringeren Ressourcen- und Energieeinsatzes auf einem möglichst hohen Niveau der Wertschöpfungskette angestrebt (Abb. 1). Entsprechende Verfahren (in erster Linie mechanisch, in zweiter Lösemittel-basiert mit Erhalt der grundlegenden Polymerbausteine beim Löseprozess) erfordern auch einen geringeren Entwicklungsaufwand, weshalb sie derzeit am weitesten fortgeschritten und vielfach bereits großtechnisch umgesetzt sind. Wasser spielt hierfür in Reinigungs- und nachgelagerten Aufbereitungsschritten eine wesentliche Rolle. Hinsichtlich Quantität und Qualität sind derzeit jedoch keine grundsätzlichen neuen Herausforderungen zu erkennen.

In Abb. 1 sind die Wege des Recyclings in der Prozessindustrie eingeordnet und in Bezug zu den Kapiteln dieses Textes dargestellt.

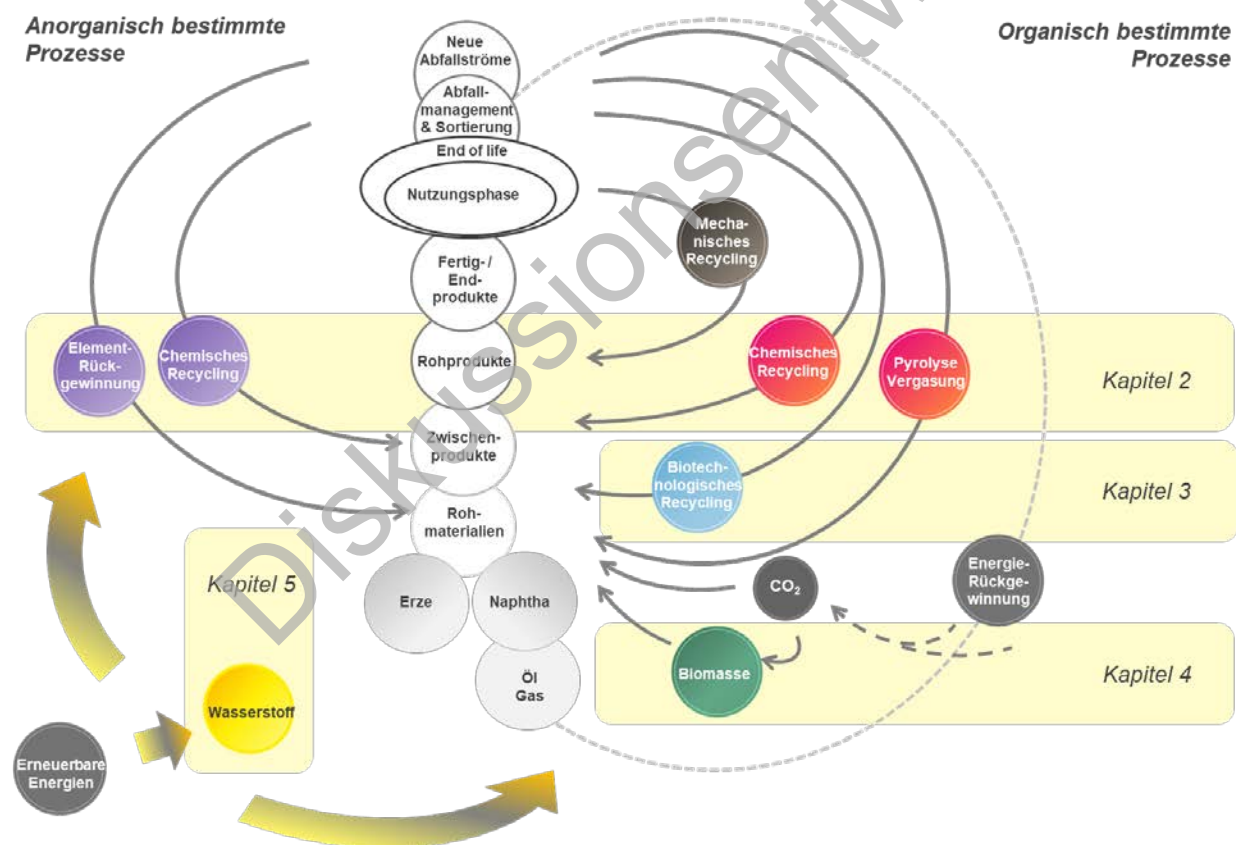


Abb. 1: Einordnung der Recyclingverfahren und Bezug zu den Kapiteln dieses Papiers (Bildquelle: Covestro Deutschland AG)

2. Chemische Recyclingprozesse

Kunststoffe, die direkten Recyclingverfahren nicht zugänglich sind, oder solche, die aufgrund von Verunreinigungen oder Vermischung mit anderen Kunststoffen hierfür nicht infrage kommen,

erfordern dezidierte chemische Verfahren, die häufig auf hydrolytischen Kernprozessen basieren. Oft bedingen diese pH-Wert Einstellungen, sowohl im Löseprozess selbst als auch in den nachfolgenden Trenn- und Aufarbeitungsschritten, woraus ein signifikanter Salzeintrag in die wässrigen Restströme resultiert. Verbunden mit den häufig ebenfalls hohen organischen Stoffeinträgen ergeben sich erhebliche Herausforderungen für die Behandlung der entsprechenden Abwässer wie auch die Schließung von Wasserkreisläufen. Die Schwierigkeit, derartige hoch mit Salz, Kohlenstoff und häufig auch Stickstoff belasteten Prozesswasserströme aufzubereiten, ist zwar prinzipiell auch heute schon in der Prozessindustrie bekannt, aus der Skalierung (Volumenstrom und Frachten) zeichnet sich aber eine erheblich höhere Relevanz als derzeit ab.

Beispielhaft sei das neue Verfahren der Gr3n Recycling zur Depolymerisierung von Polyethylenterephthalat (PET) gezeigt (Abb. 2).

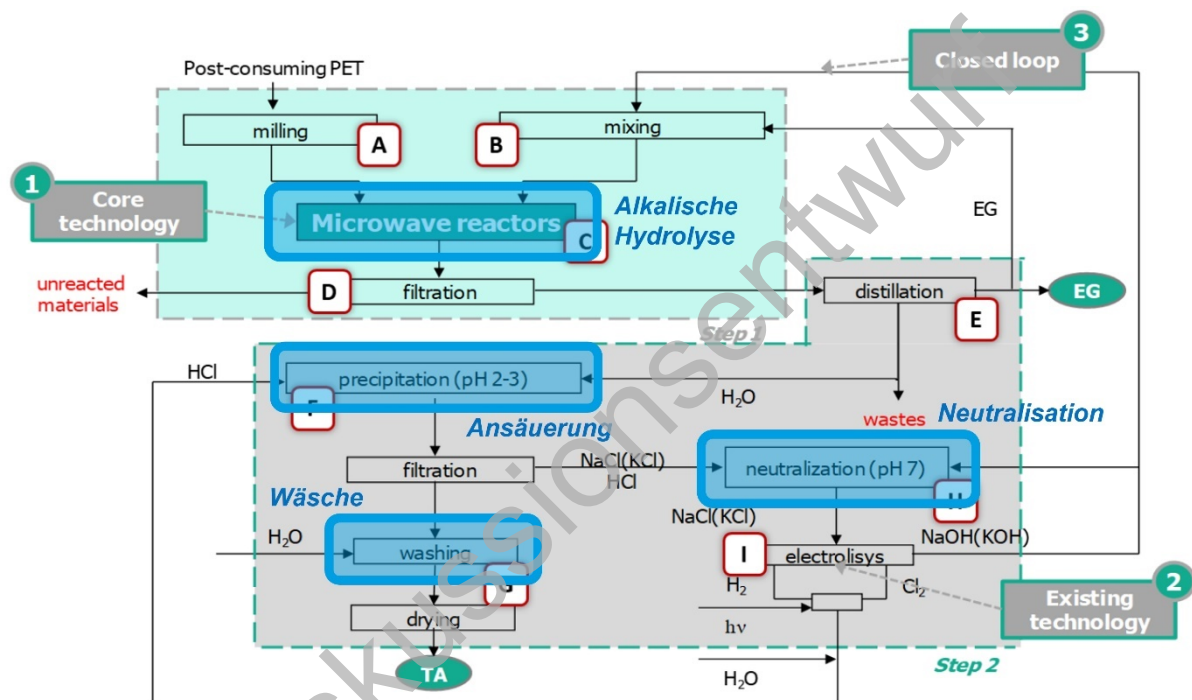


Abb. 2: Beispielhaftes Verfahrensschema zur Depolymerisierung von Polyethylenterephthalat (Bildquelle: Gr3n, 2021, ergänzt um Wasser-Relevanz)

Eine übergreifende Quantifizierung gestaltet sich derzeit noch schwierig, da Daten zumeist nur aus frühen Entwicklungsstufen vorliegen und die dort zu findenden Hilfsstoffbedarfe (z. B. Bäckström et al., (2017) 4 g Salpetersäure pro g Polymer) bei einer großtechnischen Umsetzung der Prozesse die Rentabilität und ökologische Vorteilhaftigkeit stark gefährden würden.

Ähnliches gilt für das Recycling von Verbundwerkstoffen (z. B. Hochleistungs-Leichtbauwerkstoffe oder Komposite für die Elektromobilität). Für diese sind derzeit als stoffliche Verwertung Pyrolyse-, Karbonisierungs- oder Vergasungsverfahren in Entwicklung. Bei hydrothermalen Prozessrouten ist die Relevanz des Wassers offensichtlich, mit signifikanten Herausforderungen in der Prozess- und Abwasserbehandlung (z. B. Stobernacka et al., 2020). Bei den meisten der derzeit verfolgten Ansätze findet die Reaktion allerdings nicht in wässriger Phase statt. Dennoch können aus den Nebenprozessen und der nachfolgenden Aufarbeitung ebenfalls hoch belastete wässrige Ströme resultieren, für die bislang keine geeigneten Aufbereitungskonzepte existieren. Dasselbe lässt sich für das Recycling polymetallischer Komposite in elektronischen Bauelementen, Batteriezellen oder Leichtbaulegerungen schließen. In aktuellen Verfahrensentwicklungen zur Fragmentierung von

Batteriezellen wird Wasser als Übertragungsmedium und Lösungsmittel eingesetzt, um Schadstoffe zu passivieren und Materialverbände aufzutrennen. Dabei gelangen neben Werkstoff-Fragmenten auch gelöste Batterieinhaltsstoffe (z. B. Lithium, Fluor/Fluorid) in das Übertragungsmedium Wasser (Zimmermann, 2020, Wenz et al., 2021). Transferraten von bis zu 4 % (Salz im Wasser / Batteriemasse) und Leitfähigkeiten bis 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ werden berichtet (Lyon et al., 2022). Auch in den nachfolgenden hydrometallurgischen Aufbereitungsprozessen der Trennprodukte kommt es zur Verlagerung von Inhaltsstoffen in das Prozesswasser (Abb. 3).

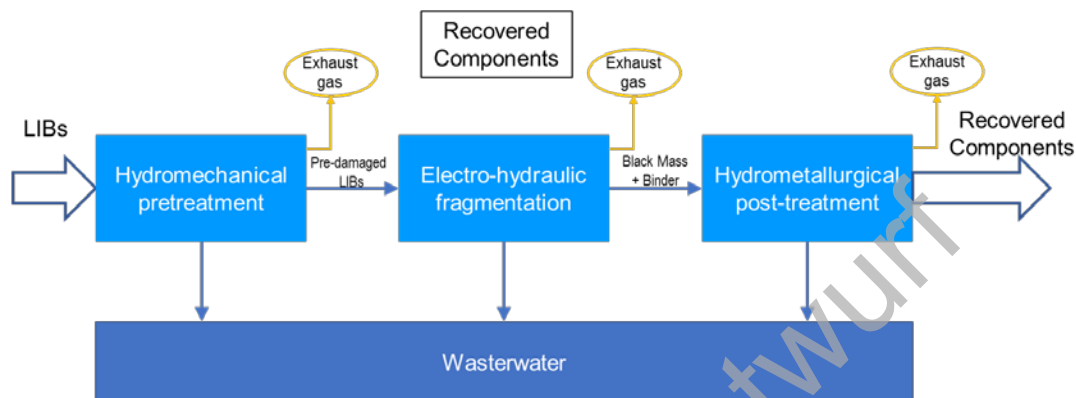


Abb. 3: Beispielhaftes Verfahrensschema zum nasschemischen Batterierecycling (Bildquelle: Zimmermann, 2020)

In der Photovoltaikbranche ist Wasser für die Produktion kristalliner, siliziumbasierter Solarzellen relevant bei Ätz-, Reinigungs- und Oberflächenbehandlungsprozessen auf dem Weg vom Wafer zur fertigen Zelle sowie als Kühlmittel bei verschiedenen Schneidprozessen und der Kristallisation. Von großem Interesse für die Kreislaufführung sind die Spülwässer, welche einerseits aus aufwändig produziertem Reinstwasser bestehen und andererseits Stoffe aus den Ätzprozessen (K^+ , F^- , NO_3^-) sowie Silikate enthalten (Drouiche et al., 2013). Insbesondere letztere sind eine Herausforderung beim Recycling der Spülwässer, da sie sich leicht im Wasserkreislauf anreichern und in der Prozesswasserbehandlung Scaling verursachen können. Positiv können sich hier Produktionsumstellungen auswirken: Durch die bereits in Teilen durchgeführte Umstellung der Ätzprozesse von HF- und HNO_3 -basierteren Ätzschritten auf KOH-basierte Ätzschritte entfällt in der Behandlung der Abwässer die aufwendige Entfernung von Nitrat und Fluorid.

Ein weiteres Beispiel für die Wasserrelevanz von zunehmender Kreislaufschließung ist die Rückgewinnung von Schwermetallen durch Aufarbeitung von Filteraschen aus der thermischen Abfallbehandlung. Bei der Rückgewinnung von Zink mit Massenanteilen im Bereich von 20 – 120 g/kg (Schlumberger und Bühler, 2013, Tang und Steenari, 2015) kommt eine komplexe Prozesskette aus hydrometallurgischen und nasschemischen Verfahren (Säureaufschluss, Fällung, Solventextraktion) zum Einsatz (Schlumberger und Bühler, 2013), die darüber hinaus nachgeschalteter klassischer Abwasserbehandlungsverfahren mit unter anderem Aktivkohleadsorption und Ionenaustausch bedarf. Eine erste großtechnische Anlage zur Rückgewinnung von 2000 t Zink/a soll 2025 in der Schweiz in Betrieb gehen.

Nicht zuletzt stellen sich auch im Rahmen der Transformation der Stahlindustrie hin zu einer CO_2 -freien Prozessindustrie vergleichbare Aufgaben, die mit der Aufbereitung von Kreislaufstoffen verbunden sind. Durch die Anpassung der Produktionsprozesse und dem damit einhergehenden Wegfall z.B. des Sinterprozesses müssen bisher dort verwendete eisenreiche Kreislaufstoffe für den Einsatz in der Direktreduktion u.a. mit hydrometallurgischen Verfahren aufbereitet werden. Dies resultiert in

signifikanten fett- und ölhaltigen Prozesswassermengen, die in einer Größenordnung von 2 - 5 m³ je Tonne behandelten Kreislaufstoff entstehen. Für eine wirtschaftliche und umweltgerechte Prozessführung muss das Prozesswasser aufbereitet und im Kreislauf geführt werden.

Die Zusammensetzung der Prozesswässer bei Recyclingverfahren bringt demnach vollkommen neue Herausforderungen mit sich. Insbesondere für anorganische Rohstoffe soll an dieser Stelle aber deutlich betont werden, dass auch die bergbauliche Gewinnung (z. B. von Metallen und seltenen Erden) sehr Wasserressourcen-intensiv ist. Insofern können sich aus globaler Perspektive sowohl Rohstoff- oder Produkt-bezogener Wasserfußabdruck als auch die Auswirkungen auf Gewässer sogar verringern. Hier zeigt sich der Einfluss der Verlagerung globaler Wertschöpfungsketten auf das industrielle Wassermanagement, auch wenn Quantifizierung und Bewertung derzeit noch am Anfang stehen.

3. Biotechnologische Recyclingprozesse

Neben den chemischen Verfahren werden vielfältige biotechnologische Ansätze verfolgt, um Kunststoffe zu recyceln, einschließlich des Einsatzes enzymatischer Verfahren. Dies geht einher mit der zunehmenden Nutzung biotechnologischer Prozesse insgesamt, teilweise als Substitution anderer Prozesse (Biologisierung). Dabei sind biotechnologische Verfahren nicht zwingend an nachwachsende Rohstoffe gekoppelt, ebenso wenig wie die Nutzung letzterer an eine biotechnologische Umsetzung (siehe nächstes Kapitel).

Erfolgreiche Beispiele für den Einsatz biotechnologischer Produktionsverfahren in der chemischen Grundstoffindustrie, in diesen Fällen auf Basis nachwachsender Rohmaterialien, sind die Produktion von Rhamnolipiden auf Basis der Fermentation von Zuckern (Evonik, 2022) und die Produktion von Hexamethyldiamin unter Einsatz von Biotechnologie (Abb. 4, Covestro, 2022).

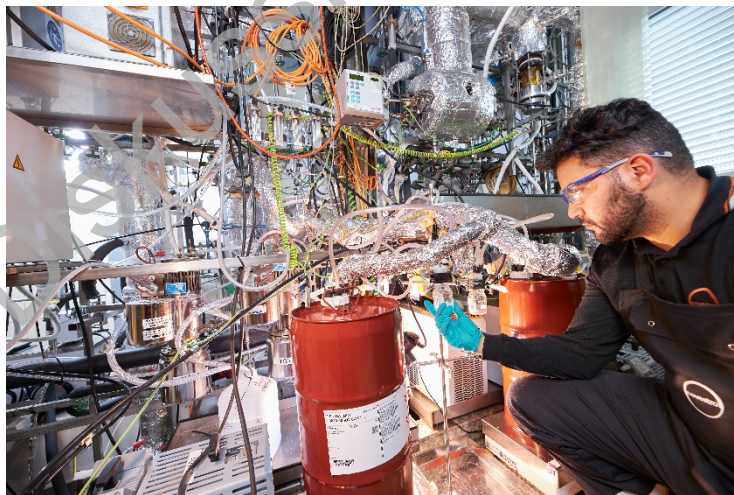


Abb. 4: Pilotanlage zur Herstellung von Hexamethyldiamin mit biotechnologischen Verfahren (Bildquelle: Covestro AG)

Biotechnologische Verfahren sind häufig mit einem hohen Wassergebrauch verbunden. Zudem ist zu erwarten, dass die bislang für biotechnologisch erzeugte Produkte (z. B. Lysin) etablierten Entsorgungswege für wässrige Restströme, z. B. Nutzung/Ausbringung in der Landwirtschaft oder anaerobe Umsetzung zu Biogas, nicht einfach auf Recyclingprozesse in der chemischen Industrie übertragen werden können. Vielmehr ist durch die Skalierung und regionale Rahmenbedingungen

abzusehen, dass vermehrt eine spezifische Aufbereitung der wässrigen Restströme bis hin zu Einleit- oder Rückführungsqualität erforderlich sein wird.

4. Prozesse auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Neben dem Weg über Recyclingverfahren kann der Kohlenstoffkreislauf auch über die Nutzung nachwachsender Rohstoffe und somit über den globalen CO₂-Kreislauf geschlossen werden. Während dies im Bereich der alternativen Treibstoffe – wenn auch global differenziert – schon umfangreich in großem Maßstab realisiert ist (z. B. Bioethanol in Brasilien und neuerdings zweite Generation in Rumänien), steht die Entwicklung zur Bereitstellung von Rohstoffen für die chemische Industrie noch am Anfang. Dennoch eröffnet die so genannte BioÖkonomie auch für die Gewinnung und das Recycling von Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe neue Perspektiven. Beispielhaft sei die Produktion einer Anilinvorstufe durch Fermentation zuckerhaltiger Rohstoffe (Covestro, 2021) genannt und auf die Beispiele in Kap. 3 verwiesen.

Auch hier ist allerdings zu erwarten, dass die bislang für bio-basierte Treibstoffe (z. B. Bioethanol) etablierten Entsorgungswege, insbesondere die Nutzung/Ausbringung in der Landwirtschaft, nicht einfach auf die Rohstoffbereitstellung für die chemische Industrie übertragen werden können. Wie beim Einsatz biotechnologischer Verfahren werden Skalierung und regionale Rahmenbedingungen vermehrt eine spezifische Aufbereitung der wässrigen Restströme bis hin zu Einleit- oder Rückführungsqualität erforderlich machen, sowie eine Rückgewinnung von Inhaltsstoffen als qualitativ hochwertige Rohstoffe, z. B. Dünger. Dafür wird zusehends an membranbasierten Verfahren mit und ohne elektrischem Ladungspotential gearbeitet, die für die (Rück)Gewinnung von Wasser und Rohstoffen aus Restströmen einsetzbar sind (z. B. Sayegh et al., 2021 und 2022).

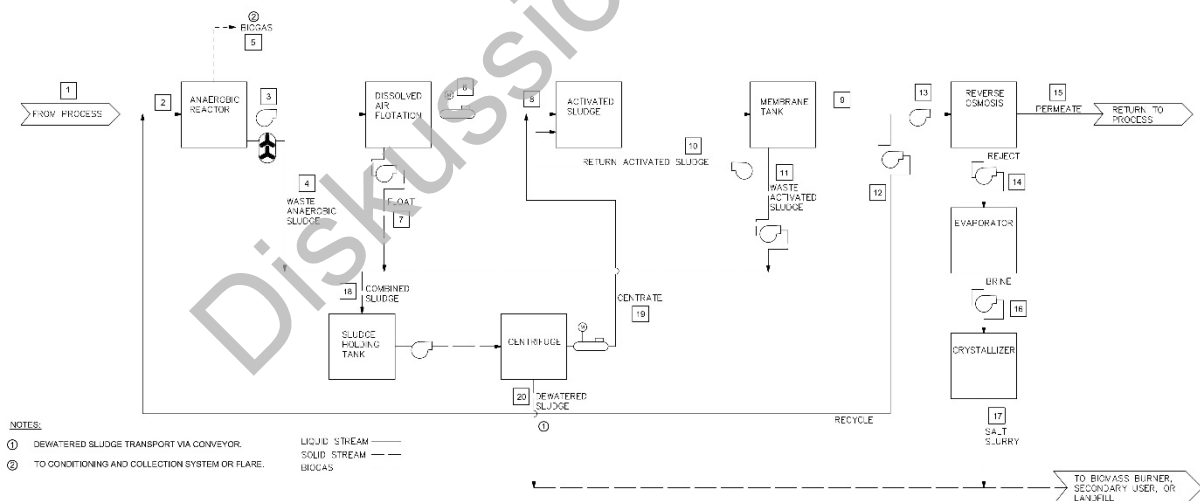


Abb. 5: Abwasserbehandlungskonzept für eine 700 kta – Bioethanolanlage der 2. Generation (Cellulosebasiert) nach NREL (Steinwinder et al., 2011)

Zu den spezifischen Wassermengen und -qualitäten beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie liegen noch wenige öffentliche Informationen vor. Es kann aber angenommen werden, dass die Zusammensetzung der wässrigen Restströme prinzipiell ähnlich ist zu denen, wie sie in der biobasierten Treibstoffherstellung anfallen. Beispielsweise wird für eine 700 kta – Bioethanolanlage der 2. Generation (Cellulosebasiert) durch das amerikanische National Renewable Energy Laboratory (NREL; Steinwinder et al. (2011)) eine Abwassermenge von 400 m³/h mit einer CSB-Konzentration von 85 g/l erwartet und das in Abb. 5 wiedergegebene Behandlungskonzept

vorgeschlagen. Bestimmt wird dieses Konzept neben der hohen organischen Fracht von der hohen Salzkonzentration von ca. 10 g/l, die durch die Aufsalzung im Verlauf des Bioethanolprozesses hervorgerufen wird.

Die Abwassermenge von 400 m³/h für die NREL-Bioethanolanlage liegt in der Größenordnung mittlerer bis großer Chemiestandorte, die organische Fracht um ein Vielfaches höher (Blöcher, 2021). Auch wenn dieses Beispiel und der grobe Vergleich sicher keine allgemeingültige Aussage zulassen, zeigt es doch, dass die Auswirkungen einer bio-basierten Chemieproduktion auf das Wasser erheblich sein können. Dies lässt sich auch aus entsprechenden Datenbanken zu Umweltauswirkungen (GaBi) ablesen, wo die Wasser-bezogenen Kennzahlen (insbesondere *blue water consumption*) für Bioethanol teilweise um eine Größenordnung höher liegen als die für konventionell erzeugtes Ethanol. Unklar ist allerdings, inwieweit Prozess-Aspekte durch den Einfluss der landwirtschaftlichen Erzeugung überlagert sind.

Schließlich, aber nicht zuletzt sei angemerkt, dass der zunehmende Einsatz sekundärer Biomasse als Rohstoff höheren Aufwand im Prozess bedeutet, häufig in Form von Aufschlussverfahren in wässriger Phase. Dies hat Auswirkungen auf Wasserbedarf und -belastung, wobei letztere auch durch schwer oder nicht abbaubare Nebenprodukte gekennzeichnet sein kann.

Abseits der klassischen nachwachsenden Rohstoffe gewinnen aber auch biotechnologische Prozesse zunehmend an Bedeutung, die grundsätzlich Wasser-basiert sind.



Abb. 6: Pilotanlage zur Aufarbeitung von Rapssaaten (Bildquelle: Fraunhofer CBP)

Ein innovatives Beispiel ist ein neu entwickelter patentierter Prozess zur ethanolischen, milden Extraktion geschälter Rapssaat (Abb. 6, Ethana, 2022). Die alternative Aufbereitungslinie soll in herkömmliche Ölmühlen integrierbar sein und durch die Verarbeitungsstrategie neben dem Öl, hochwertige Sekundärstoffe (z.B. Sinapinsäure, Tocopherole) leichter zugänglich machen. Beim Prozess fallen Prozesswässer verschiedener Art an, sei es bei der Trocknung der Saaten, der weiteren Verarbeitung der Sekundärstoffe oder auch durch die Anlagenreinigungsprozesse. Die entsprechenden Herausforderungen werden derzeit ermittelt.

5. „Fossil Free Production“ als Ergänzung der Circular Economy

Die Umstellung der Produktionsweise in der Prozessindustrie bei der Transition zur *Circular Economy* wird begleitet von einem zweiten fundamentalen Strategiewechsel, hin zu einer Abkopplung von fossilen Rohstoffen – *Fossil Free Production*. Bei der Herstellung von grünem Wasserstoff spielt Wasser eine entscheidende Rolle. Je nach Qualität und Herkunft der Wasserressourcen (z. B. Süßwasser / Meerwasser) lassen sich hier Bedarfe von ca. 9 – 22,5 kg Wasser je kg Wasserstoff abschätzen. Herausfordernd ist hier der Umgang mit den anfallenden Konzentraten, die im Sinne des Circular Economy Ansatzes wieder Ausgangspunkt für die Gewinnung anorganischer Rohstoffe (z.B. Molybdän, Magnesium, Scandium, Vanadium, Gallium, Bor, Indium, Lithium, Rubidium) sein können (Sea4Value, 2022, PROCESSNet, 2015).

Der Wasserstoff kann zum einen direkt in der Prozessindustrie genutzt werden (z. B. Stahl). Zum anderen lassen sich in weiteren Prozessschritten durch Einbindung von CO₂ in Verbindung mit Power to X -Prozessen wichtige Grundstoffe für die Chemieproduktion (z.B. Methanol) bereitstellen. Alle Prozessschritte erfordern ein angepasstes Roh-, Prozess- und Abwassermanagement, das begleitend zu der Etablierung solcher Prozesse entwickelt, optimiert und bereitgestellt werden muss.

Für beide Bereiche, sowohl die Wasserstoffproduktion selbst als auch die Einbindung in unterschiedliche Wertschöpfungsketten, muss das Wassermanagement in einer integrierten Form eingebunden sein.

Zukunftsweisend ist auch die Verbindung mit biotechnologischen Produktionsprozessen, wie der Nutzung von Kohlenstoffdioxid aus Punktquellen (z.B. Fermentationen oder Verbrennungsprozessen) bei gleichzeitiger Verwertung von Nährstoffen aus Prozesswässern oder Abwässern beispielsweise für die Herstellung von Polymeren aus Mikroalgen. Mikroalgen benötigen neben Wasser, Nährstoffen und Licht CO₂ (ca. 2 kg CO₂ pro 1 kg Biomassebildung). Aktuell werden Mikroalgen z. B. als Rohstoffbasis für Kunststofffilamente zur Herstellung nachhaltiger textiler Erzeugnisse im Sportbekleidungsbereich erschlossen (Abb. 7, AlgaeTEX, 2022). Dabei stellen die produzierten Fettsäuren den Ausgangspunkt für Polyamide und Algenstärke den für Polyethylen dar. Hierfür soll eine neue Bioreaktorgeneration eingesetzt werden, deren besonderer Vorteil dank integrierter Wasserwiederverwendung im geringen Wasserbedarf der Produktion (8 m³ / t Algenbiomasse²) liegt.

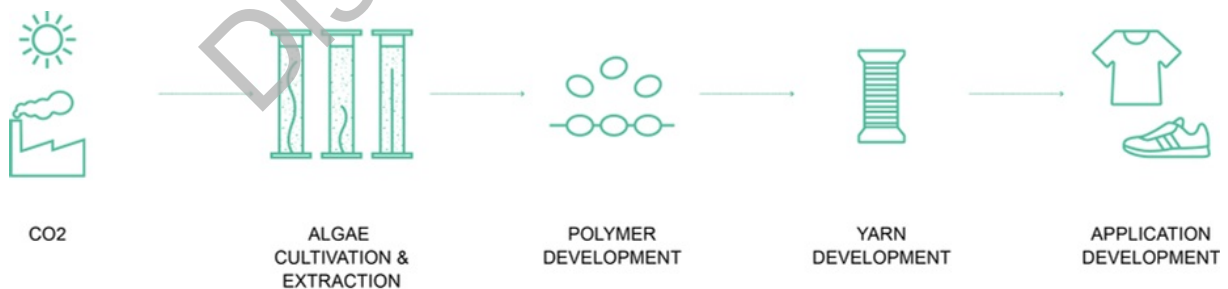


Abb. 7: Prozessschritte für die Erschließung von Mikroalgen als Rohstoffbasis für Kunststofffilamente zur Herstellung nachhaltiger textiler Erzeugnisse (Bildquelle: AlgaeTex, 2022)

² Wasserbedarf bei der Produktion von Soja als Vergleichsgröße: 2.500 m³ / t Soja

6. Fazit und Handlungsbedarfe

Die Umstellung der Produktionsweise in der Prozessindustrie auf Zirkularität wird signifikante Auswirkungen auf Wasserbedarfe und das industrielle Wassermanagement haben. Chemische Recyclingverfahren ebenso wie Prozesse auf Basis nachwachsender Rohstoffe und biotechnologische Verfahren lassen wässrige Restströme erwarten, die durch sowohl hohen Volumenstrom als auch hohe organische und Salz-Frachten gekennzeichnet sind. In der Skalierung einer *Circular Economy* bedingt dies erhebliche Herausforderungen für das industrielle Wassermanagement.

Daraus ergeben sich folgende Handlungsbedarfe:

- 1) Stärkere Berücksichtigung der Wasserthemen in den Konzepten und Entwicklungen zur Zirkularität in der Prozessindustrie, insbesondere beim Schließen der Kohlenstoffkreisläufe in der chemischen Industrie.
- 2) Qualitative und quantitative Bewertung der Auswirkungen der *Circular Economy* auf das industrielle Wassermanagement, einschließlich der Fragen, bei welchen Prozessen Wasser als „Enabler“ im (nicht Wasser bezogenen) Stoffkreislauf beitragen kann (z. B. Wassernutzung bei der Wertstoffrückgewinnung) und inwieweit der Wasser-Energie-Nexus positiv beeinflusst werden kann.
- 3) Explizite Entwicklung übergreifender technologischer Ansätze und Verfahren zur Aufbereitung von Abwässern aus neuen Verfahren der *Circular Economy*, insbesondere solchen des chemischen (z. B. Hydrolysen) und biotechnologischen Recyclings sowie Prozessen auf Basis nachwachsender Rohstoffe.
- 4) Quantifizierung und Evaluierung von Wasserbedarf, Abwasserfrachten, Rückgewinnungspotenzialen und Behandlungskonzepten für verschiedene *Circular Economy* Konzepte, sowie Erarbeitung von entsprechenden Lösungsansätzen.
- 5) Betrachtung globaler Verlagerungseffekte (z.B. Wasserfußabdruck, Wasserbedarfe und Wasserqualitäten) mit ihren regionalen Auswirkungen.

Die Adressierung dieser Themen ist essenziell, um im Zuge des Übergangs zur *Circular Economy* ein integriertes Wassermanagement realisieren zu können (ProcessNet, 2014). Dies gilt für den industriellen Bereich selbst ebenso wie für das Zusammenspiel mit kommunalem Wassermanagement und dem Management natürlicher Wasserressourcen.

7. Literatur

AlgaeTex (2022): <https://www.biotexfuture.de/algaetex> (abgerufen 2022-04-19)

Bäckström, E., Odelius, K. and Hakkarainen, M. (2017): Trash to Treasure: Microwave-Assisted Conversion of Polyethylene to Functional Chemicals. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56(50), 14814-14821.

Blöcher, C. (2020): Chemische Industrie, Chemieparcs (Kapitel 8.1). In: K.-H. Rosenwinkel, U. Austermann-Haun, S. Köster, M. Beier (Hrsg.): Taschenbuch der Industrieabwasserreinigung. Vulkan-Verlag, Essen. 509-542

Circular Economy Initiative Deutschland (Hrsg.) (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland, acatech/SYSTEMIQ (Kadner, S., Kobus, J., Hansen, E., Akinci, S., Elsner, P., Hagelüken, C., Jaeger-Erben, M., Kick, M., Kwade, A., Kühl, C., Müller-Kirschbaum, T., Obeth, D., Schweitzer, K., Stuchtey, M., Vahle, T., Weber, T., Wiedemann, P., Wilts, H., von Wittken, R.), München/London

Covestro (2021): <https://www.covestro.com/en/sustainability/flagship-solutions/bio-based-aniline> (abgerufen 2021-12-19)

Covestro (2022): Covestro und Genomatica produzieren wichtigen Chemierohstoff mit Biotechnologie. Presse-Information Covestro AG und Genomatica, 19.01.2022

- DECHEMA (2022): Motivationspapier Circular Economy <https://dechema.de/circulareconomy.html> (abgerufen 2022-03-01)
- Deloitte (2017): Chemie 4.0 – Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch. VCI
- Drouiche, N., Djouadi-Belkada, F., Ouslimane, T., Kefaifi, ., Fathi, Jihane, Ahmetovic, E. (2013) Photovoltaic solar cells industry wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 51:31-33, 5965-5973, DOI: 10.1080/19443994.2012.763217
- Ethana (2022): <https://ethana.de/projektvorstellung/projektziele/> (abgerufen 2022-04-19)
- Evonik (2022): <https://personal-care.evonik.com/en/evonik-pioneers-industrial-scale-manufacturing-of-biosurfactants-168535.html> (abgerufen 2022-03-01)
- Gr3N (2021): <https://www.demeto.eu/mission> (abgerufen 2021-11-12)
- Lyon, T., Mütze, T., Peuker, U.A. (2022): Decoating of Electrode Foils from EOL Lithium-Ion Batteries by Electrohydraulic Fragmentation. *Metals* 2022, 12, 209. <https://doi.org/10.3390/met12020209>
- ProcessNet (2014): Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_Industr_Wassertechnik_2014-called-by-dechema-original-page-124930-original-site-dechema_eV-view_image-1.pdf (abgerufen 2022-03-01)
- ProcessNet (2015): Einordnung von Zero Liquid Discharge im industriellen Wassermanagement https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Diskussionspapier_ZLD_2015.pdf (abgerufen 2022-03-01)
- Sayegh, A., Shylaja Prakash, N., Pedersen, T.H., Horn, H. and Saravia, F. (2021) Treatment of hydrothermal liquefaction wastewater with ultrafiltration and air stripping for oil and particle removal and ammonia recovery. *Journal of Water Process Engineering* 44, 102427
- Sayegh, A., Shylaja Prakash, N., Horn, H. and Saravia, F. (2022) Membrane distillation as a second stage treatment of hydrothermal liquefaction wastewater after ultrafiltration. *Separation and Purification Technology* 285, 120379.
- Sea4Value (2022): Development of radical innovations to recover minerals and metals from seawater desalination brines, H2020 Project, <https://sea4value.eu/> (abgerufen 2022-02-04)
- Schlumberger, S., Schuster, M., Ringmann, S., Koralewska, R. (2007): Recovery of high purity zinc from filter ash produced during the thermal treatment of waste and inerting of residual materials. *Waste Manage. Res.* 25, 547–555
- Schlumberger, S. und Bühler, J. (2013): Metallrückgewinnung aus Filterstäuben der thermischen Abfallbehandlung nach dem Flurec-Verfahren. in: *Aschen Schlacken Stäube - aus Abfallverbrennung und Metallurgie - Karl J. Thomé-Kozmiensky.*- Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S.378-395, ISBN 978-3-935317-90-3
- Stobernacka, N., Mayerb, F., Maleka, C., Bhandarib, R. (2020): Evaluation of the energetic and environmental potential of the hydrothermal carbonization of biowaste: Modeling of the entire process chain. *Bioresource Technology* 318, 12403
- Steinwinder, T., Gill, E., Gerhardt, M.; Brown and Caldwell (2011): Process Design of Wastewater Treatment for the NREL Cellulosic Ethanol Model. Subcontract Report NREL/SR-5100-51838
- Tang, J., Steenari, B.-M. (2015): Solvent extraction separation of copper and zinc from MSWI fly ash leachates. *Waste Management*, Vol. 44, October 2015, pp. 147-154, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.028>
- Wenz, R., Brückner, F., Horn, D. Zimmerman, J., Bokelmann, K., Weidenkaff, A., Schebek, L. (2021): Characterization of Process Water from Lithium-Ion Battery Recycling. International Conference on Resource Chemistry ICRC, March 08-09,2021 (Posterpräsentation)
- Zimmermann, J. (2020): Li-Ion battery recycling - a hydro-mechanical process. Vortrag, 25th International Congress for Battery Recycling ICBR 2020, 16.09.-18.09.2020, Salzburg, Austria https://icm.ch/images/exclusive/icbr/2020/session_6-2-fraunhofer_institution_iwks-jrg_zimmermann.pdf (abgerufen 2022-03-01)