

Industrielles Abwasser als alternative Quelle für die Wasserstoffproduktion

Industrielles Abwasser könnte helfen, die Produktion von grünem Wasser trotz der begrenzten Verfügbarkeit von Wasser zu steigern.

Dr.-Ing. Robert Lutze, Dr.-Ing Tobias Blach, Alexander Ghazinuri – EnviroChemie GmbH, In den Leppsteinswiesen 9, 64380 Roßdorf, Deutschland

Einleitung

Schätzungen zufolge werden bis 2050 rund 40 Prozent der Weltbevölkerung in Regionen leben, die von Wasserknappheit betroffen sind. Gleichzeitig wird der Wasserbedarf aufgrund von Klimawandel und Bevölkerungswachstum um bis zu 30 Prozent steigen. Selbst ehemals wasserreiche Regionen in Europa haben heute mit Dürreperioden und sinkenden Grundwasserspiegeln zu kämpfen. Zudem gilt es auch zu beachten, dass eine ausreichende und sichere Wasserversorgung eng mit der Nahrungsmittel- und Energieversorgung verknüpft ist. Wenn unterschiedliche Nutzungsinteressen aufeinandertreffen, kann es somit zu Verteilungskonflikten kommen.

Zusätzlich verschärft wird die Situation durch die Umstellung der Energie- und Chemieindustrie auf grünen Wasserstoff, für dessen Herstellung viel Wasser benötigt wird: Für den Elektrolyseprozess werden etwa 10 Liter Wasser pro Kilogramm Wasserstoff (l/kg H₂) als Ausgangsstoff und insgesamt 30–70 l/kg H₂ als Ausgangsstoff und Kühlung benötigt, abhängig von der verwendeten Elektrolyseurtechnologie und den lokalen klimatischen Bedingungen [1]. Die folgende Tabelle zeigt den potenziellen Wasserbedarf basierend auf dem geschätzten Produktionsanstieg von grünem Wasserstoff in den kommenden Jahren. Bis 2050 könnte der Bedarf an sauberem Wasserstoff auf 585 Mt pro Jahr steigen [2], was einem jährlichen Wasserbedarf als Ausgangsstoff von 5.850 Millionen m³ zur Folge hätte – eine Menge, die dem Trinkwasserverbrauch von etwa 134 Millionen Menschen entspricht. Bezieht man den Wasserverbrauch für die Kühlung mit ein, verzehnfacht sich dieser Wert und entspricht dem Wasserverbrauch von einer Milliarde Menschen.

Tabelle 1: Potenzieller Wasserverbrauch für die Produktion von grünem Wasserstoff in den kommenden Jahren

	Globale Nachfrage nach sauberem Wasserstoff (Mio. t H ₂ /a) ¹	Nachfrage nach Wasser als Ausgangsstoff ² (Mio. m ³ /a)	Anzahl der Personen, die diese Wassermenge verbrauchen (Personenäquivalent) ³
2024	< 5	50	1.100.000
2030	~ 60	600	13.700.000
2050	585	5.850	134.000.000

¹ Laut McKinsey Energy Solutions Global Energy Perspective (2023) [2]

² Berechnet mit 10 l/kg H₂

³ Berechnet auf Basis eines Trinkwasserverbrauchs von 120 l/(Person*d)

Einführung alternativer Wasserversorgungslösungen zur Entlastung der Trinkwassernetze

Aufbereitung von Abwässern mit geringer anorganischer Belastung, z. B. Minenwasser oder Oberflächenwasser

Zur Aufbereitung anorganisch und organisch gering belasteter Minenabwässer wird eine Prozesskette aus Vorfiltration, Ozondosierung, keramischer Ultrafiltration, Aktivkohlefiltern und Umkehrosmose vorgeschlagen (siehe Abbildung 2). Im Zentrum dieses Prozessablaufs steht die keramische Membranfiltration mit vorgeschalteter Ozonbehandlung. Das Ozon zerstört organische Abwasserinhalte und verringert das Verschmutzungspotenzial der Membran erheblich. So minimiert die CembrOzone-Lösung die Membranverschmutzung und maximiert gleichzeitig die Leistung und Lebensdauer der Membran. Ein Aktivkohlefilter zur Entfernung von Restozon und eine anschließende Umkehrosmose sorgen für die erforderliche Wasserqualität.

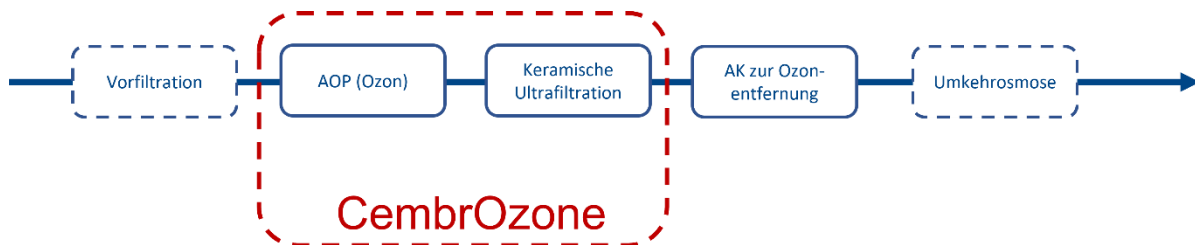


Abbildung 2: Flussdiagramm der CembrOzone-Lösung

Bei einer Mine in Schweden wird das anorganisch und organisch gering belastete Grubenabwasser ($\text{TOC} < 5 \text{ mg/l}$ und 16 NTU) in Technikmodulen aufbereitet, was eine modulare Bauweise der Anlage ermöglicht (siehe Abbildung 3). Der Nettodurchfluss der Anlage beträgt $200 \text{ l/(m}^2\text{h)}$ und der Betriebsdruck ist aufgrund der speziellen Siliziumkarbid (SiC)-Membran mit $-0,1$ bis $-0,25 \text{ bar}$ sehr niedrig. Das System benötigt $3\text{--}5 \text{ g O}_3/\text{m}^3$, was einen Gesamtenergieverbrauch von $0,15\text{--}0,25 \text{ kWh/m}^3$ inklusive Peripheriegeräte ergibt. Hinzu kommt der erforderliche Energieaufwand, um das Wasser auf die vom Elektrolyseur benötigte Qualität aufzubereiten.



Abbildung 3: EnviroChemie-Modulanlage zur Behandlung von Minenabwasser (links) und Beispiel für den modularen Aufbau einer EnviroChemie-Anlage (rechts)

Die Anlage ist auf einen Permeatvolumenstrom von $4.800 \text{ m}^3/\text{d}$ ausgelegt, was nach einer stark vereinfachten Methode auf $480 \text{ t H}_2/\text{d}$ umgerechnet werden kann.

Diese Technologiekombination eignet sich auch zur energieeffizienten Aufbereitung von Oberflächenwasser.

Aufbereitung von Abwässern mit geringer organischer Belastung, z. B. Spülwasser oder Brüdenkondensate [5]

Am Produktionsstandort einer großen Molkerei in Deutschland werden verschiedene Milchprodukte hergestellt, darunter Magermilchkonzentrat, Kondensmilch und Milchpulver. Bei der Produktion fällt Brüdenkondensat an. Gemeinsam mit der Molkerei hat EnviroChemie ein Aufbereitungskonzept entwickelt, um dieses Brüdenkondensat im Produktionsbereich wiederzuverwenden.



Abbildung 4: Flussdiagramm der Aufbereitungsstrategie für organisch gering belastete Ströme auf Trinkwasserqualität

Das Brüdenkondensat weist geringe organische ($\text{TOC} < 50 \text{ mg/l}$) und anorganische Verunreinigungen auf (elektrische Leitfähigkeit $< 15 \mu\text{S/cm}$). Die Aufbereitung beginnt mit einem aeroben biologischen Prozess, bei dem gelöste organische Verbindungen durch Mikroorganismen, die in Biofilmverbindungen wachsen, biologisch abgebaut werden. Dem aeroben Bioreaktor ist als zweite Stufe ein Festbettreaktor nachgeschaltet, in dem die Feststoffe reduziert und gleichzeitig die organische Belastung und Stickstoffverbindungen weiter abgebaut werden. Das gereinigte Wasser aus dem Festbettreaktor ist von hoher Qualität, kann aber durch nachfolgende Aufbereitungsschritte weiter verbessert werden. Damit das aufbereitete Wasser den Trinkwasserqualitätsstandards entspricht, muss ein mehrstufiges Membranverfahren mit einer Heißwasserdesinfektion kombiniert werden. Die biologische Vorbehandlung hat den Vorteil, dass kleine organische Verbindungen abgebaut werden, die sonst durch eine Umkehrosmosemembran gelangen könnten. Zudem wird das Wasser lagerfähig gemacht, wobei das Risiko eines erneuten mikrobiellen Wachstums / einer mikrobiellen Kontamination geringer ist.



Abbildung 5: 3D-Modell der installierten Anlage, die jährlich 188.000 m^3 Wasser in Trinkwasserqualität produziert und dabei Brüdenkondensat als Wasserquelle nutzt

In der Molkerei werden mit dieser Lösung jährlich 188.000 m³ Prozesswasser bereitgestellt. Der zur Aufbereitung erforderliche Energieaufwand beträgt ca. 1,2 kWh/m³ Betriebswasser. So ließe sich ein Elektrolyseur installieren, der jährlich 20.000 Tonnen Wasserstoff produziert und dabei die Trinkwasserversorgung entlastet.

Industrielles Abwasserrecycling zur Behandlung von Abwässern mit hoher organischer Belastung (End of Pipe)

Abwässer mit hoher organischer Belastung erfordern oft eine aufwendige Aufbereitung und mehrere Prozessschritte für das Abwasserrecycling. Die bestehende Abwasserbehandlungsanlage eines Kartoffelverarbeitungsunternehmens in Deutschland, die nur über eine biologisch-aerobe Aufbereitungsstufe verfügte, konnte beispielsweise durch Flotation, anaerobe Vergärung, Ultrafiltration und Umkehrosmose erweitert und modernisiert werden (siehe Abbildung 6). Durch die Erweiterung der Anlage und Rückführung des Permeats aus der Umkehrosmose in die Produktion konnte der Wasserverbrauch um 30–40 % gesenkt werden.



Abbildung 6: Flussdiagramm des Abwasserrecyclings zur Behandlung von Abwässern mit hoher organischer Belastung

In der Aufbereitungsanlage werden 1.800 m³/d mit einem CSB von 4.170 mg/l, einem TOC von 1.540 mg/l und einem Chloridgehalt von 310 mg/l aufbereitet. Im wiederverwendeten Wasser wurden die Qualitätskriterien von TOC < 4 mg/l, Chlorid < 50 mg/l und coliformen Bakterien von 0 KBE/100 ml eingehalten.

Abbildung 7 zeigt den spezifischen Energieverbrauch während der Modernisierungsphasen. Durch die Erweiterung der bestehenden Anlage um ein Flotations- und ein anaerobes biologisches Aufbereitungssystem (2015 bis 2017) konnte der spezifische Energieverbrauch auf ca. 35 % des Bezugswerts (2013, 2014) gesenkt werden. Dies wurde durch Energiegewinnung aus dem Methan erreicht, das bei der anaeroben Vergärung organischer Substanzen entsteht. Durch die Modernisierung der Anlage zur Wasserwiederverwendung im Jahr 2018 wurde der spezifische Energieverbrauch auf ca. 60 % des Bezugswerts (2013, 2014) gesteigert. In der anschließenden Optimierungsphase hat sich gezeigt, welches Potenzial betriebliche Verbesserungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs haben und wie wichtig diese sind. Durch Optimierungen wie beispielsweise eine chemische Reinigung zur Verlängerung der Filterzyklen der Ultrafiltration konnte der spezifische Energieverbrauch im Vergleich zur Altanlage im Jahr 2013/2014 um 50 % auf 3,5–3,7 kWh/m³ gesenkt werden. Aufgrund der hohen Qualität eignet sich das gereinigte Abwasser gut als Grundlage für die Weiterverarbeitung zu Wasserstoff.

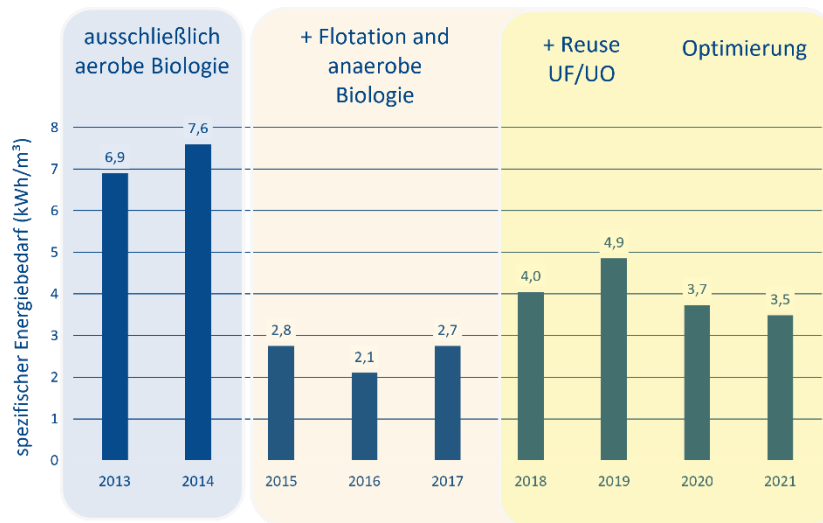


Abbildung 7: Energieverbrauch bei der Modernisierung einer Abwasserbehandlungsanlage für die Kartoffelverarbeitungsindustrie

In diesem Beispiel stehen nach Abzug von 40 % für die Wasserwiederverwendung 1.080 m³/d Betriebswasser zur weiteren Verwendung zur Verfügung. Bei einer angenommenen Rückgewinnungsrate von 75 % in der Umkehrosmose könnten aus den 800 m³/d Wasser rund 80 t H₂/d produziert werden.

Zusammenfassung

Die vorgestellten Fallstudien zeigen, dass industrielles Abwasser eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung alternativer Wasserquellen für die Produktion von grünem Wasserstoff spielen kann. Besonders betont wird die Bedeutung eines ganzheitlichen, systemischen Ansatzes für die lokale und integrierte Wasserstoffproduktion. Darüber hinaus zeigen die Fallstudien, dass durch die geeignete Kombination und Optimierung verschiedener Technologien nicht nur ausreichend Wasser in der erforderlichen Qualität bereitgestellt werden kann, sondern auch energetisch vorteilhafte und somit wirtschaftliche Lösungen erzielt werden können. Die vorgestellten Lösungen bieten vielversprechende Ansätze für Unternehmen, um die Herausforderungen bei der Wasserstoffproduktion zu meistern.

Tabelle 2: Wasserquelle und Energieverbrauch

Wasserquelle	Energieverbrauch (kWh/m³)
Oberflächenwasser (aus Seen oder Flüssen) ^[3]	0,37
Grundwasser ^[3]	0,48
Abwasserbehandlung ^[3,4]	0,62–1,96
Wasserwiederverwendung ^[3]	1,0–2,5
Meerwasser ^[3]	2,58–8,5
Vorgestellte Alternativen	
Minenwasser/Oberflächenwasser	0,1–0,25
Abwasser, Kartoffelverarbeitungsindustrie	3,5–3,7
Brüdenkondensataufbereitung, Molkereiindustrie	1,2

Literatur

- [1] Internationale Energieagentur (IEA), 2024. Global Hydrogen Review. www.iea.org.
- [2] McKinsey & Company, 2024. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>.
- [3] Nassrullah, H., Anis, S., Hashaikh, R., Hilal, N., 2020. Energy for desalination: A state-of-the-art review. Centre for Water Advanced Technologies and Environmental Research (CWATER)
- [4] Schaum, C., Lensch, D., Cornel, P., 2015. Water reuse and reclamation: a contribution to energy efficiency in the water cycle. Journal of Water Reuse and Desalination, 05.2, S. 83–94.
- [5] Lutze, R., Weisser, T., Poertner, N., Kieferle, J.: Sustainable Processing: Water Reuse in Dairy Processing. In: McSweeney, P.L.H., McNamara, J.P. (Eds.), Encyclopedia of Dairy Sciences, Vol. 4. Elsevier, Academic Press (2022), S. 855–873.

März 2025