



Nutzung von biologisch gereinigtem Abwasser für die Wasserstoffproduktion

Durch den **Wandel der Energieversorgung hin zu grünem Wasserstoff** steigen dessen Bedeutung und Nachfrage – dies zeigt sich auch in der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. In Deutschland soll demzufolge bis 2030 eine Elektrolysekapazität von insgesamt 10 Gigawatt (GW) aufgebaut werden [1]. Um diese Wasserstofferzeugung **dabei unabhängig von lokalen Frischwasserressourcen** zu gestalten, betrachtet das Projekt KA4H₂ die Kopplung von Wasserelektrolyseuren und kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg sowie die Nutzung von biologisch gereinigtem Abwasser als Ausgangsquelle. Aufgrund der hohen Anforderungen von Elektrolyseuren an die Wasserqualität **liegt der Schwerpunkt auf der Aufbereitung von Kläranlagenablauf** hin zu Reinstwasser sowie dessen Einfluss auf den Kläranlagenprozess und die lokale Umwelt.

von: Jan Singer, Yair Morales, Dr.-Ing. Florencia Saravia, Prof. Dr. Harald Horn (alle: DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie), Prof. Dr.-Ing. Tobias Morck, Dr.-Ing. Philipp Otter (beide: Universität Kassel) & Jürgen Schmidtke (Umwelttechnik BW GmbH)

Abb. 1: Windkraft- und Solarkraftanlagen auf dem Gelände eines Klärwerks: Reinstwasser aus Kläranlagen kann als Ausgangsstoff für die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse dienen.



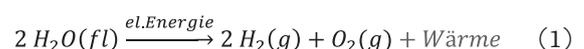
Quelle: Maarten Zeehandelaar/stock.adobe.com

Das Projekt KA4H₂ wird von der Universität Kasel (Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft), der Umwelttechnik BW GmbH sowie der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (Wasserchemie und Wassertechnologie) bearbeitet.

Wasserverbrauch

Bei der Wasserelektrolyse wird mithilfe von elektrischer Energie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten (Formel 1). Werden dabei erneuerbare Energien verwendet, dann spricht man auch von grünem Wasserstoff. Zwei Elektrolysearten kommen am häufigsten zum Einsatz: die seit Jahrzehnten etablierte alkalische Elektrolyse (AEL)

und die Proton Exchange Membrane-Elektrolyse (PEM). Vorteil der jüngeren PEM-Technologie ist eine Unempfindlichkeit gegenüber Lastwechsel, weshalb sie sich gut für die Nutzung von Strom aus volatilen erneuerbaren Energieträgern eignet.



Über die Reaktionsgleichung lässt sich ein theoretischer Wasserverbrauch von 9 L Wasser pro kg Wasserstoff berechnen. Von Elektrolyseurherstellern werden mindestens 10 L Reinstwasser (engl.: ultra-pure water, kurz: UPW) pro kg Wasserstoff angegeben [2]. Hier ist zu beachten, dass das Wasser – anders als z. B. bei der Kühlung in Kraftwerken – als Rohstoff dient und verbraucht wird. ▶

Elektrolyseure haben sehr hohe Ansprüche an die Wasserreinheit, da diese die Qualität des produzierten Wasserstoffs beeinflusst und einen stabilen und langlebigen Betrieb des Elektrolyseurs ermöglicht [3]. Die PEM-Elektrolyse benötigt typischerweise UPW mit einer Leitfähigkeit unter $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ und einem gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) von $< 50 \mu\text{g}/\text{l}$. Dies entspricht den Reinstwasser-Standards des ASTM Typ 1 (American Society for Testing and Materials). Für AEL reicht eine Leitfähigkeit von $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ (ASTM Typ II) oder kleiner aus. Um diese hohen Qualitäten gewährleisten zu können, wird eine mehrstufige UPW-Aufbereitung benötigt.

UPW-Produktion aus Kläranlagenablauf

Die Aufbereitung von biologisch gereinigtem Abwasser gestaltet sich in der Regel aufwendiger als bei Frischwasserquellen. Im Vergleich zu Leitungswasser weist biologisch gereinigtes Abwasser erhöhte Mengen an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), Stickstoff- und Phosphatverbindungen, Bakterien sowie Fest- und Spurenstoffen auf, welche vor einer Verwendung im Elektrolyseur abgetrennt werden müssen.

Die UPW-Aufbereitung wird in eine Vorbehandlung, Entsalzung und Nachbehandlung aufgeteilt (Abb. 2). Je nach Anforderung kommen dabei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz oder werden miteinander kombiniert. Eine Übersicht der gängigen Verfahren, ihrer Anwendung sowie der benötigten Chemikalien während des Betriebs ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die Vorbehandlung dient zum Schutz und zur Entlastung der Entsalzung und zielt hauptsächlich auf die Entfernung von größeren Partikeln, Bakterien und organischen Stoffen ab. Verfahren wie Koagulation und Flockung, Adsorption an Aktivkohle, Mehrschichtfiltration sowie Mikro- und Ultra-

filtration dienen in der Regel zur Schwebstoffentfernung und Trübungsreduktion. Weiterhin reduzieren diese Prozesse zu einem Teil auch DOC. Gerade die Ultrafiltration wird bei der Weiter- oder Wiederverwendung von Kläranlagenablauf immer häufiger eingesetzt, da sie durch ihre kleine Porengröße Bakterien, Viren und Proteine zurückhalten kann. Je nach Zusammensetzung des Kläranlagenablaufs kommen weitere Prozesse (wie die Enthärtung und Desinfektion) hinzu.

Die Entsalzung spielt die zentrale Rolle bei der Entfernung gelöster Stoffe, insbesondere ein- und mehrwertiger Ionen. Die Umkehrosmose (RO) ist eine führende Technologie, bei der Wasser unter hohem Druck durch eine semipermeable Membran gepresst wird. Dabei bleiben Salze und weitere Stoffe zurück. Die RO benötigt Chemikalien für die Reinigung und Antiscalanten zur Vorbeugung einer Verblockung der Membranen. Weitere Technologien zur Entsalzung sind die Membrandestillation (MD) und die Multi-Effekt-Destillation (MED). Beide nutzen für die Entsalzung Wärmeenergie mit einem Temperaturniveau unter $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Da die Reinheit nach der Entsalzung meist noch nicht ausreicht, steht als letzter Schritt eine Nachbehandlung an. Durch Ionenaustauscherharze (IX) oder Elektrodeionisation (EDI) wird eine sehr geringe Leitfähigkeit gewährleistet und das UPW kann für die Elektrolyse verwendet werden. Weiterhin kann eine UV- oder Ozonbehandlung zum Einsatz kommen, um eine Wiederverkeimung des UPW zu verhindern.

Die meiste Energie wird bei der UPW-Aufbereitung für die Entsalzung benötigt. Bei MD und MED ist diese im Vergleich zur RO relativ hoch. Der spezifische Energieverbrauch beträgt bei RO $2\text{--}3 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$, bei MD $0,6\text{--}1,8 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$ plus $49\text{--}350 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ und bei MED $2\text{--}2,5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$ plus $40\text{--}65 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ [4]. Speziell im Zusammenspiel mit der abzuführenden Überschusswärme bei der Wasserelektrolyse können die thermischen Prozesse allerdings eine Alternative zu RO darstellen.

Bezogen auf den Gesamtprozess der Wasserstoffherzeugung beträgt der Anteil der UPW-Aufbereitung am Energieverbrauch weniger als 1 Prozent [5].

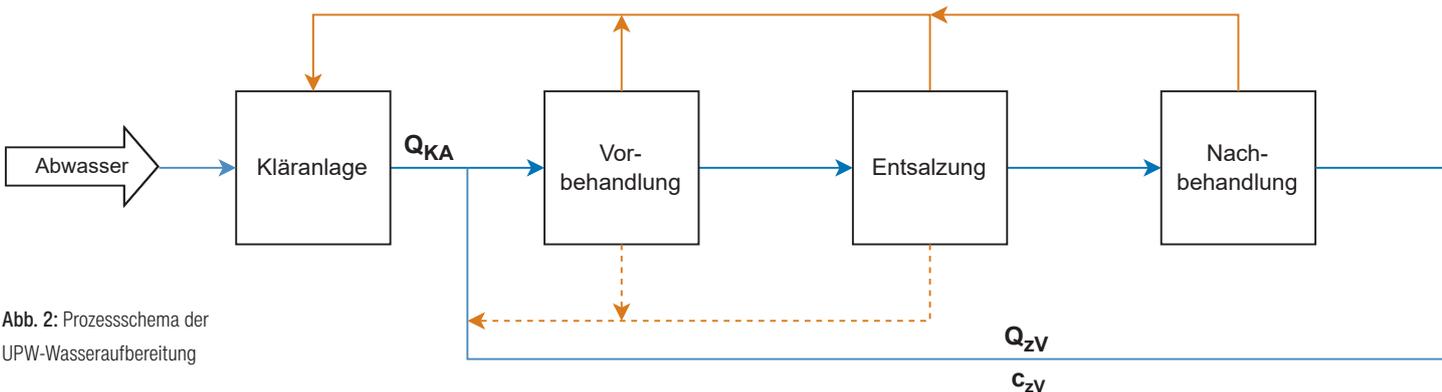


Abb. 2: Prozessschema der UPW-Wasseraufbereitung

Tabelle 1: Prozesse zur UPW-Aufbereitung: Anwendung und benötigte Chemikalien

	Prozess	Reduktion von	benötigte Chemikalien
Vorbehandlung	Siebung	partikuläre Stoffe	-
	Koagulation und Flockung	Trübstoffe, DOC, gel. Stoffe, Phosphat	Fällmittel (Al-/Fe-Salze), Flockungshilfsmittel
	Adsorption an Aktivkohle	DOC, Spurenstoffe	Aktivkohle
	Mehrschichtfilter	partikuläre Stoffe, Trübstoffe	-
	Chlorung/Entchlorung	Keime, Mikroorganismen	bspw. Chlordioxid/Natriumbisulfit
	Enthärtung (Ionenaustausch)	Ca ²⁺ & Mg ²⁺	Regenerationschemikalien
	Ultrafiltration (UF)	partikuläre Stoffe, Trübung	Reinigungschemikalien
Entsälzung	Umkehrosiose (RO)	gelöste Stoffe (z. B. Salze, DOC)	Reinigungschemikalien (Säure, Lauge), Aufbereitungschemikalien (z. B. Antiscalante)
	Membrandestillation (MD)		
	Multi-Effekt-Destillation (MED)		
Nachbehandlung	Entgasung	Kohlendioxid	-
	Ionenaustauscher (IX)	Ionen	Reinigungs- und Regenerationschemikalien
	Elektrodeionisation (EDI)	Ionen	-
	Desinfektion: UV/Ozon	Keime	(H ₂ O ₂)/Ozon

DOC = gelöster organischer Kohlenstoff, Al = Aluminium, Fe = Eisen, Ca = Calcium, Mg = Magnesium, H₂O₂ = Wasserstoffperoxid

Quelle: DVGW-EBI

Einfluss auf die Kläranlage

Über die Formel (2) lässt sich der Verbrauch an UPW (Q_{UPW}) eines Elektrolyseurs bei voller Kapazität berechnen. P_{el} gibt dabei die elektrische Leistung an und der spezifische Energiebedarf (SE_{el}) beschreibt die elektrische Energie, die zur Produktion von 1 kg Wasserstoff benötigt wird. Dieser Wert variiert je nach Elektrolyseur und liegt momentan im Bereich von 48 bis 60 kWh pro kg Wasserstoff, was einem Wirkungsgrad von 60 bis 70 Prozent entspricht [6]. Das bedeutet, dass ein Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt wird, welche aus dem Prozess abgeleitet werden

muss. Über die Lebensdauer des Elektrolyseurs steigt der benötigte Energiebedarf pro kg Wasserstoff, weshalb dementsprechend mehr Wärme abgeleitet werden muss.

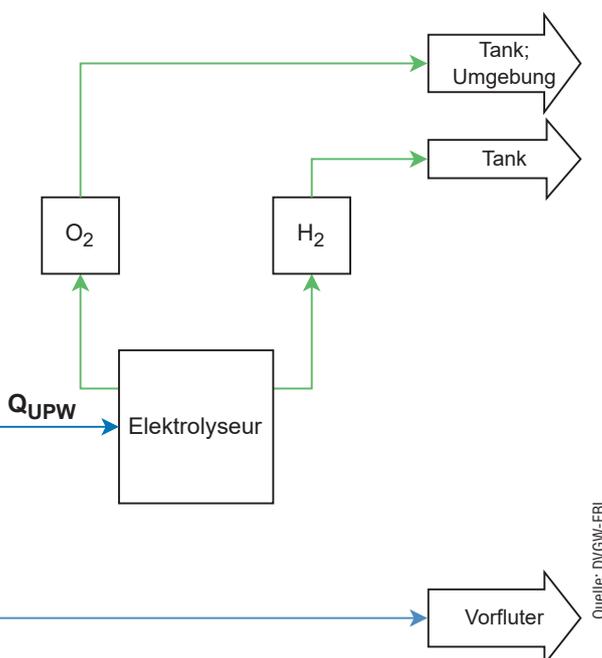
Die Formel (3) berechnet die theoretische Menge an Kläranlageablauf, welche täglich bei Trockenwetter anfällt. Der Einwohnerwert (EW-Wert) stellt eine Rechengröße für die Abwasserreinigung dar, wodurch Belastungen für Kläranlagen abgeschätzt werden können.

$$Q_{UPW} = \frac{10 L_{UPW}/kg_{H_2}}{SE_{el}} * P_{el} \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (2)$$

$$Q_{KA} = EW\text{-Wert} * KA\text{-Größe} \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (3)$$

Im oberen Diagramm in **Abbildung 3** ist der benötigte Mengenteil an UPW vom Kläranlagenablauf Q_{UPW}/Q_{KA} über die Kläranlagengröße aufgetragen. Die einzelnen Kurven beschreiben dabei die Verläufe für unterschiedliche Elektrolyseurgrößen. Für die Berechnung wurde ein SE_{el} von 52,5 kWh/kg H₂ und ein EW-Wert von 150 L/(EW*d) gewählt. In Baden-Württemberg beträgt der Anteil an Kläranlagen einer Größe von 100.000 EW oder kleiner ungefähr 95 Prozent, dies ist im Diagramm über die gestrichelte vertikale Linie dargestellt [8].

Über das Diagramm kann auch eine erste Abschätzung zur Auswahl einer passenden Elektrolyseurgröße vorgenommen werden. So benötigt beispielsweise ein 100-MW-Elektrolyseur bei Vollast ca. 6 Prozent des Kläranlagenablaufs einer 50.000-EW-Kläranlage. Es ist zu beachten, dass ein Elektrolyseur beim ausschließlichen Betrieb mit er- ▶



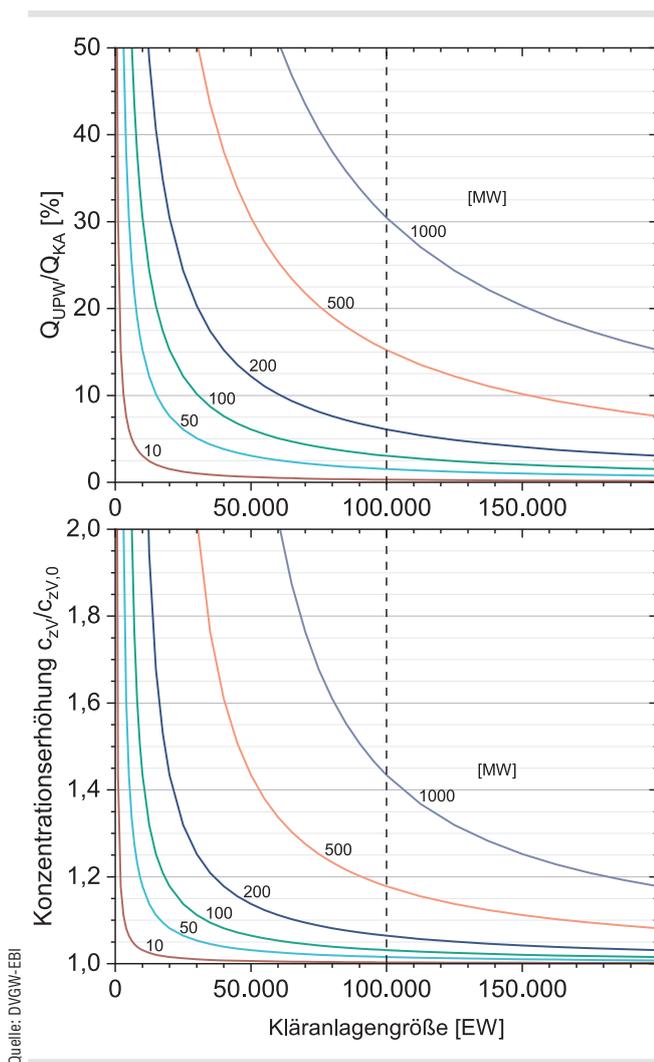


Abb. 3: Diagramm zum Abschätzen der benötigten Abwassermengen und des Einflusses auf die Konzentration im Kläranlagenablauf

neuerbaren Energien auf eine jährliche Nutzung von 1.000 bis 3.000 Volllaststunden kommt [7], weshalb die benötigte UPW-Menge über einen längeren Zeitraum geringer ist. Weiterhin wurde ein möglicher Wasserbedarf zur Kühlung des Elektrolyseurs nicht betrachtet.

Bei allen Technologien zur Entsalzung entstehen sogenannte Konzentrate, welche je nach Ausbeute der Prozesse unterschiedlich hohe Konzentrationen aufweisen. Ein typischer Wert für die Ausbeute eines RO-Prozess sind 70 Prozent – das bedeutet, dass 70 Prozent als entsalztes Wasser abgetrennt werden und die zurückgehaltenen Stoffe sich in den verbleibenden 30 Prozent anreichern. Unter der Annahme, dass das Konzentrat in die Kläranlage zurückgeführt wird, lassen sich Konzentrationserhöhungen im Ablauf ab-

schätzen. Auf der Y-Achse im unteren Diagramm der Abbildung 3 ist die Konzentrationsänderung des Kläranlagenstroms bei der Einleitstelle (c_{zV}) zur ursprünglichen Konzentration ohne UPW-Aufbereitung ($c_{zV,0}$) aufgetragen. So erhöht sich beispielsweise bei einer Kläranlagengröße von ca. 50.000 EW und einer Elektrolyseurgröße von 100 MW die Konzentration um das 1,06-fache der ursprünglichen Konzentration.

Zusätzlich zu den erhöhten Konzentrationen befinden sich im Konzentrat und den Rückspülwässern auch Chemikalien, welche für den UPW-Aufbereitungsprozess zum Einsatz kommen können. Dies sind bei einer Vorbehandlung mit UF beispielsweise chemische Reiniger wie Zitronensäure und Natronlauge. Bei der Entsalzung mit RO, MD oder MED können neben Reinigungschemikalien zusätzlich noch Antiscalanten eingesetzt werden. Diese verhindern die Bildung von Kalk- und Mineralablagerungen auf den Membranen und sorgen für einen stabilen Entsalzungsprozess. Antiscalanten bestehen meist auf Basis von Polyphosphonaten oder Polyacrylsäuren, es sind aber auch schon biologisch abbaubare Antiscalanten auf dem Markt verfügbar. Bei der Regeneration von Ionenaustauschern fallen Ströme an, welche ebenfalls zu einer weiteren Aufkonzentration des Abwassers führen. EDI benötigt diese nicht. Aufgrund der erhöhten Konzentrationen und zusätzlichen Chemikalien in den Konzentraten kann es von Vorteil oder sogar verbindlich sein, diese wieder dem Zulauf der Kläranlage zuzuführen, um einen Teil der Inhaltsstoffe wieder zu reduzieren.

Weiterhin kann eine vorhandene vierte Reinigungsstufe positive Auswirkungen auf die nachgeschaltete Aufbereitung für die UPW-Produktion haben. Aufgrund der Reduktion von Mikroschadstoffen und organischen Verbindungen sinkt die Belastung durch diese in der Vorbehandlung und Entsalzung, was perspektivisch zu einer Verringerung der benötigten Chemikalien führt. Zusätzlich kann sich die vierte Reinigungsstufe positiv auf die Rückführung und Behandlung der Konzentrate auswirken.

Inwieweit die aufkonzentrierten Stoffe oder Antiscalanten durch die Rückführung weiter abgebaut werden, welchen Einfluss die Konzentrate auf die Kläranlagenprozesse haben und wie genau sich eine vierte Reinigungsstufe auswirkt, muss allerdings noch genauer untersucht werden.

Ausblick

Die Kopplung von Kläranlagen und Elektrolyseuren kann in Zukunft ein Teil der Lösung hin zu einer nachhaltigeren



Die Kopplung von Kläranlagen und Elektrolyseuren kann in Zukunft ein Teil der Lösung hin zu einer nachhaltigeren und grüneren Energieversorgung sein.

und grüneren Energieversorgung sein. So gibt es neben der Nutzung des biologisch gereinigten Abwassers und einer hierdurch unabhängigen Wasserversorgung der Elektrolyse noch weitere Vorteile. Erste Studien zeigen eine mögliche Verwendung des entstehenden Sauerstoffs zur Belüftung in den Belebungsbecken oder zur Ozonerzeugung für eine vierte Reinigungsstufe. Weiterhin werden zurzeit Ideen eines gemeinsamen Wärmekonzepts von Elektrolyseur, Kläranlage und Wärmenetz entwickelt.

Danksagung

Das vorgestellte Projekt KA4H₂ wird vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert. Die Autorinnen und Autoren bedanken sich an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung. ■

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS 2023).
- [2] Saravia, F., Graf, F., Schwarz, S., Gröschl, F.: Genügend Wasser für die Elektrolyse (Factsheet), 2023.
- [3] Becker, H., Murawski, J., Shinde, D.V., Stephens, I. E. L., Hinds, G., Smith, G.: Impact of impurities on water electrolysis: a review, in: Sustainable Energy Fuels 7 (2023), S. 1.565–1.603.
- [4] González, D., Amigo, J., Suárez, F.: Membrane distillation: Perspectives for sustainable and improved desalination, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 80 (2017), S. 238–259.
- [5] Morales, Y., Samanta, P., Tantish, F., Horn, H., Saravia, F.: Water management for Power-to-X offshore platforms: an underestimated item, in: Sci Rep 13 (2023), 12286.
- [6] Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Bessarabov, D. G., Millet, P.: Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology, in: International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020), S. 26.036–26.058.
- [7] Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., Kiemel, S., Zimmermann, F., Miehe, R., Wahren, S.: Studie IndWEde – Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme (Studie), 2018.
- [8] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Broschüre „Kommunales Abwasser – Lagebericht 2023“.

Die Autoren

Jan Singer ist Projektingenieur an der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Yair Morales ist Gruppenleiter Wasseraufbereitung an der DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT.

Prof. Dr. Harald Horn ist Teilinstitutsleiter am EBI des KIT und Geschäftsführer Wasserchemie und Wassertechnologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT.

Prof. Dr.-Ing. Tobias Morck ist Leiter des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft im Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen an der Universität Kassel.

Dr.-Ing. Philipp Otter ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft im Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen an der Universität Kassel.

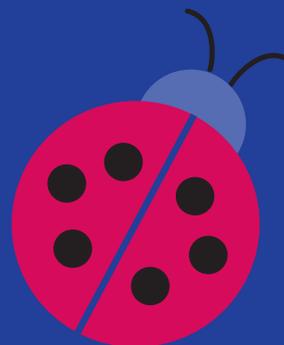
Jürgen Schmidtke ist Projektleiter bei der Umwelttechnik BW GmbH in Stuttgart.

Dr.-Ing. Florencia Saravia ist Leiterin Wasserchemie und Wassertechnologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT.

Kontakt:

Florencia Saravia
DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT
Engler-Bunte-Ring 1-7
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-47894
E-Mail: saravia@dvgw-ebi.de
Internet: www.dvgw-ebi.de

berufswelten-energie-wasser.de



Zum Glück gibt's die Berufswelten Energie & Wasser!

Ohne die Berufe der Energie- und Wasserwirtschaft sähen wir ganz schön alt aus. Doch die Branche braucht dringend Nachwuchskräfte. Nutzen Sie unsere zahlreichen Angebote für Ihr Arbeitgebermarketing!

Berufswelten
Energie & Wasser