

Skizze der integralen Wasserstoffherzeugung am Klärwerk Steinhäule und der regionalen Sektorenkopplung



H2ZVK:

Integrale H₂-Machbarkeitsstudie am Standort Klärwerk Steinhäule

Durch die **Transformation der Energiewirtschaft hin zur Klimaneutralität** steigt auch die Bedeutung von und die prognostizierte Nachfrage nach grünem Wasserstoff. Neben dem Import und der Offshore-Erzeugung wird davon ausgegangen, dass dezentrale Wasserstoffproduktionsanlagen in küstenfernen Regionen eine wichtige Rolle spielen werden. Ein möglicher **Standort hierfür sind Kläranlagen**, da der Betrieb eines Elektrolyseurs dort mehrere Synergieeffekte mit sich bringt. Dies wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie „H2ZVK“ am Klärwerk Steinhäule in Ulm/Neu-Ulm untersucht. Der Fokus der Studie lag dabei auf der Analyse konkreter Standortpotenziale, die sich im Wesentlichen aus der Flächenverfügbarkeit, der Genehmigungsfähigkeit, einer leistungsstarken Stromversorgung und den Wasserstoffvertriebsmöglichkeiten zusammensetzen. **Mit Hinblick auf die Nutzung von Synergieeffekten** liegt ein zusätzliches Hauptaugenmerk auf der Erzeugung von Reinstwasser aus gereinigtem Kläranlagenablauf zur Versorgung des Elektrolyseurs, dem Abwärmenutzungspotenzial vor Ort und der Verwertung des Elektrolysesauerstoffs in der biologischen Reinigungsstufe. **Aufbauend auf den Potenzialen wird eine Simulation der Energie- und Stoffströme** und eine Grobkostenrechnung für unterschiedliche Elektrolysegrößen (5, 10 und 20 Megawatt) durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse werden Aussagen zu erwartbaren Gesamtinvestitions- und Wasserstoffgestehungskosten getätigt.

von: Jan Singer, Yair Morales, Prof. Dr. Harald Horn, Dr.-Ing. Florencia Saravia (alle: DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie), Florian Weiß, Dr. Christian Kley (beide: Steinbeis Innovationszentrum energieplus), Jonathan Fuchs, Erwin Schäfer (beide: Zweckverband Klärwerk Steinhäule) & Dr. Aennes Abbas (Umwelttechnik BW GmbH)

Das Klärwerk Steinhäule an der Donau (Abb. 1) befindet sich an der Landesgrenze zwischen Baden-Württemberg und Bayern. Auf einer Fläche von 25 ha werden hier etwa 40 Mio. m³ Abwasser pro Jahr gereinigt, wobei die Ausbaugröße 440.000 Einwohnerwerten entspricht. Die Kläranlage ist mit einer vierten Reinigungsstufe ausgestattet, welche nach dem „Ulmer Verfahren“ mithilfe von Pulveraktivkohle Spurenstoffe entfernt. Der anfallende Klärschlamm wird in der angeschlossenen Monoverbrennungsanlage des Zweckverbandes Klärschlammverwertung Steinhäule thermisch verwertet. Zukünftig soll der Klärschlamm vor der Monoverbrennung in einer Hochlastfaulungsanlage behandelt werden, um Klärgas – eine Mischung aus CH₄ und CO₂ – zu erhalten, das anschließend einer effizienten Nutzung zugeführt werden soll. Das Klärwerk verfügt darüber hinaus über ein großes Potenzial zur Errichtung von Fotovoltaik-Anlagen, um die Eigenversorgung zu erhöhen. Bislang besteht eine Fotovoltaik-Leistung von 472,6 kW_p. Da Kläranlagen mitunter die größten Energieverbraucher einer Kommune sind, zahlen sich Effizienzmaßnahmen in diesem Bereich folglich in vielen Fällen aus.

Standortpotenzialanalyse

Die Analyse der Standortpotenziale umfasst die Prüfung der spezifischen Anforderungen, die für den Aufbau eines Elektrolyseurs und der zugehörigen H₂-Infrastruktur notwendig sind.

Anhand dieser Anforderungen wurde der Standort Klärwerk Steinhäule auf seine Eignung hin untersucht und bewertet. Weiterhin wurde abgeleitet, welche Möglichkeiten des Wasserstoffvertriebs theoretisch erschließbar sind. Hierzu wurden folgende Anforderungen standortübergreifend geprüft:

Flächenverfügbarkeit

Kläranlagen verfügen in der Theorie häufig über ein Flächenpotenzial, das sich zur Errichtung einer Elektrolyseanlage eignet. Die tatsächliche Verfügbarkeit kann jedoch durch zukünftig notwendige Erweiterungsmaßnahmen (wie beispielsweise den Bau einer vierten Reinigungsstufe) eingeschränkt werden.

Im spezifischen Fall des Klärwerks Steinhäule stehen zwei geeignete Flächen mit Größen zwischen 3.500 und 5.000 m² zur Verfügung. Diese Flächen bieten – abhängig von der gewählten Elektrolysetechnologie und dem Platzbedarf weiterer Komponenten der Anlage – die Möglichkeit, einen Elektrolyseur mit einer Nennleistung von 20 Megawatt (MW) zu errichten.

Genehmigungsfähigkeit

Die immissionsschutzrechtliche Genehmigungsfähigkeit ist seit der Novellierung der vierten Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchV) erst ab einer elektrischen Nennleistung von 5 MW oder einer Lagerkapazität von 3 t Wasserstoff relevant. Dies betrifft auch die Machbarkeitsuntersuchung, ►

Abb. 1: Luftaufnahme des Klärwerks Steinhäule und der thermischen Klärschlammverwertung



Quelle: ZVK Steinhäule

da für das kleinste untersuchte Szenario auf eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung verzichtet werden kann. Unter der Voraussetzung, dass die Mengenschwelle der Störfallverordnung gemäß 12. BImSchV von 5 t Wasserstoff im Betriebsbereich der Elektrolyse nicht überschritten wird, müssen die weiteren Szenarien lediglich per vereinfachtem Verfahren genehmigt werden.

Grundsätzlich weisen Kläranlagen günstige Voraussetzungen für die Erlangung einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung auf und diese Einschätzung trifft auch auf die potenziell verfügbaren Flächen auf dem Gelände des Klärwerks Steinhäule zu.

Stromversorgung

Bei der bereitzustellenden Stromversorgung ist zu beachten, dass die notwendige Anschlussleistung der Gesamtanlage deutlich über der umgangssprachlichen „Leistungsbezeichnung“ liegt. Dies ist u. a. auf die Peripherie zurückzuführen, die zusätzliche elektrische Verbraucher wie den Rückkühler, die Wasseraufbereitung und die Wasserstofftrocknung umfasst. Darüber hinaus steigt mit zunehmender Degradation der Stacks der spezifische Energieverbrauch pro produziertem Kilogramm Wasserstoff. Ein Hersteller einer 1-MW-Container-

anlage der PEM-Technologie fordert beispielsweise einen Netzanschluss von insgesamt 1,475 MW. Umfasst das vorgesehene Konzept eine Trailerabfüllung, so sind zusätzliche Leistungsanforderungen für die Verdichtung vorzusehen. Eine mögliche Abwärmenutzung erfordert je nach vorgesehendem Temperaturniveau eine Wärmepumpe, die die Leistungsanforderung an den Standort weiter erhöht.

Da der momentane Netzanschluss nicht ausreicht, wird eine Netzvoranfrage für 30 MW an den Verteilnetzbetreiber gestellt. Nach erster Einschätzung ist eine neue Mittelspannungsleitung des nächsten Umspannwerks notwendig.

Wasserstoffvertrieb

Da sich der Standort am Klärwerk Steinhäule weniger für eine öffentliche Wasserstofftankstelle eignet, liegt der Fokus auf der Belieferung von Kunden und H₂-Tankstellen mit Wasserstofftrailern sowie auf der Einspeisung in das Erdgasnetz. Das Klärwerk liegt in der Nähe der Gasübernahmestation der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm (SWU), daher ist dort dieses Einspeisepotenzial aufgrund des hohen Durchsatzes am ehesten realisierbar.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde intensiv herausgearbeitet, wel-

chen Wasserstoffbedarf es in der Region Ulm aktuell und in der Zukunft geben kann. Dazu wurde über verschiedene Wege der Kontakt zu potenziellen Wasserstoffabnehmern gesucht, u. a. über die Innovationsregion Ulm, die Initiative H₂-Wandel und die IHK Ulm.

Ein überregionaler Händler und Hersteller von technischen Gasen hat grundsätzliches Interesse am Projekt und kann sich auch eine Beteiligung vorstellen. Dies gilt ebenfalls für die SWU, die darüber hinaus über eigene Untersuchungen hinsichtlich des Wasserstoffbedarfs in Ulm und Neu-Ulm verfügen. Eine Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz wird auch seitens der SWU als vielversprechend eingeschätzt. Aufgrund des begrenzten Zeitrahmens zur Durchführung der Machbarkeitsstudie konnten jedoch noch keine vorvertraglichen Vereinbarungen getroffen werden.

Elektrolyseleistung – Ergebnis der Standortpotenzialanalyse

Aufbauend auf den Ergebnissen der Standortpotenzialanalyse erfolgt die Anlagendimensionierung und die Ermittlung der Stoff- und Energieströme mithilfe einer dynamischen Simulation. Daraus resultieren drei Szenarien mit einer Nennleistung von 5, 10 und 20 MW, die auch als modulare Ausbaustufen verstanden werden können. Die Ergebnisse der Betriebssimulationen der Szenarien für jeweils ein Jahr sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Synergieeffekte der Kopplung

Wasserversorgung des Elektrolyseurs mit gereinigtem Abwasser

Elektrolyseure benötigen laut Herstellerangaben üblicherweise 10 bis 11 Liter Reinstwasser pro kg produziertem Wasserstoff und haben sehr hohe Ansprüche an die Reinstwasserqualität. Um eine Unabhängigkeit von Frischwasser zu untersuchen, wurde ein Konzept zur Aufbereitung des gereinigten Kläranlagenablaufs erstellt.

Eine Analyse der am Klärwerk überwachten Abwasserparameter sowie der

Tabelle 1: Wichtige Leistungskennzahlen der Simulationsergebnisse pro Jahr

	Szenario S - 5 MW	Szenario M - 10 MW	Szenario L - 20 MW
Volllaststunden	4.569 h	4.684 h	4.686 h
Aktivstunden	7.561 h	7.561 h	7.561 h
produzierte Menge Wasserstoff	415 t	850 t	1.709 t
produzierte Menge Sauerstoff	3.317 t	6.803 t	13.674 t
benötigte Reinstwassermenge	4.560 m ³	9.350 m ³	18.800 m ³
benötigter Kläranlagenablauf ¹	7.600 m ³	15.600 m ³	31.300 m ³
gesamter Strombezug	25,8 GWh	52,6 GWh	107,9 GWh
nutzbare Abwärme der Elektrolyse	4,54 GWh	9,25 GWh	18,36 GWh

¹ Erklärung im Kapitel „Wasserversorgung des Elektrolyseurs mit gereinigtem Abwasser“

Quelle: DVGW-EBI

Energieflussdiagramm 5 MW – Szenario S

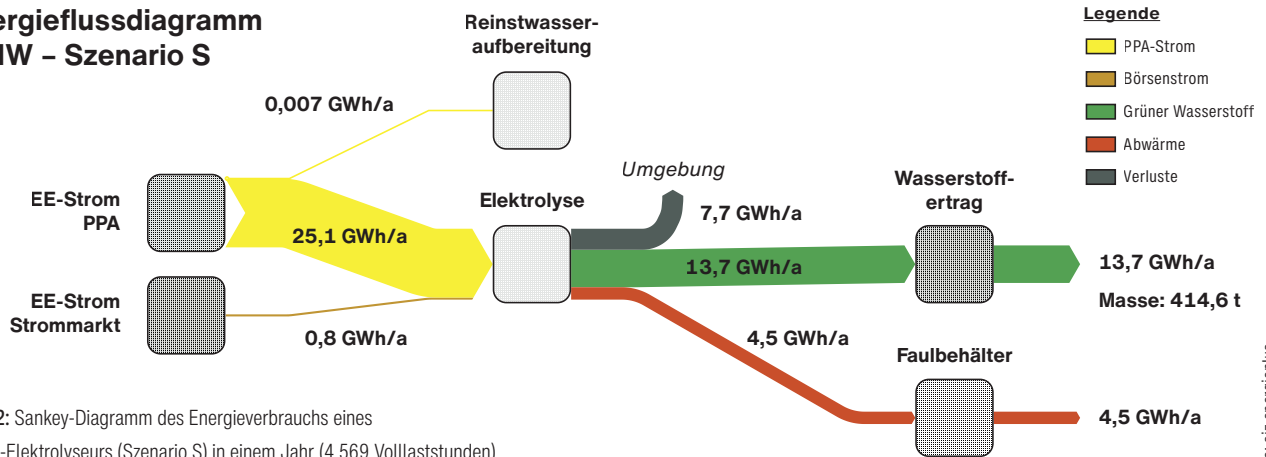


Abb. 2: Sankey-Diagramm des Energieverbrauchs eines 5-MW-Elektrolyseurs (Szenario S) in einem Jahr (4.569 Volllaststunden)

Quelle: sz energieplus

in der vorliegenden Studie gemessenen Wasserproben zeigt, dass die Ablaufqualität gut für eine Nutzung als Rohwasser für die Reinstwasseraufbereitung geeignet ist. Die benötigten Verfahren, um aus Kläranlagenablauf Reinstwasser zu erzeugen, sind bereits heute kommerziell verfügbar. Zusätzlich sorgt die vor Ort bereits vorhandene vierte Reinigungsstufe dafür, dass speziell der Vorbehandlungsschritt vor der Entmineralisierung weniger aufwendig gestaltet werden kann.

Bei der Reinstwasseraufbereitung entstehen – neben dem Reinstwasser – Konzentrate und Rückspülwasser. Beim untersuchten Konzept wird mit einer Reinstwasserausbeute von 60 Prozent geplant. Die restlichen 40 Prozent des Zulaufs zur Reinstwasseraufbereitung, bestehend aus Konzentraten und Rückspülwässern, werden zurück in die Kläranlage geleitet.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass der Anteil des Kläranlagenablaufs, welcher für die Wasserelektrolyse bis 20 MW benötigt wird, nur < 0,1 Prozent am Gesamtablauf der Kläranlage ausmacht. Die ermittelten Energieverbräuche einer Aufbereitung liegen bei etwa 1,5 Kilowattstunden (kWh) pro m³ Reinstwasser, was im Gesamtenergieverbrauch der Elektrolyse weniger als 0,1 Prozent ausmacht [1].

Abwärmennutzung

Das Abwärmepotenzial einer Elektrolyseanlage resultiert aus der Notwen-

digkeit, die Elektrolysestacks zu kühlen. Die beim Betrieb anfallende Abwärme kann bei kleineren Containeranlagen in der Regel über auf dem Dach angebrachte Rückkühler an die Umgebungsluft abgegeben werden. Durch die Integration eines Wärmetauschers in den Kühlkreislauf kann die thermische Energie jedoch auch beispielsweise an ein Wärmenetz abgegeben werden. Für die ökonomische Abwärmennutzung ist zum einen das Temperaturniveau der Abwärmequelle und zum anderen die zeitliche Verfügbarkeit der Leistung relevant. Das Temperaturniveau des Kühlkreislaufs der Elektrolyseure hängt von der jeweiligen Stacktemperatur ab und unterscheidet sich je nach Elektrolysetechnologie und Hersteller. Ein typisches auskoppelbares Temperaturniveau liegt zwischen 45 und 60 °C [2]. Die zeitliche Verfügbarkeit der Abwärme korreliert stark mit der Betriebsstrategie und dem dahinterliegenden Geschäftsmodell.

Der Hauptwärmebedarf der Kläranlage besteht in der Beheizung der geplanten Hochlastfaulung. Die Faulbehälter müssen auf einer Temperatur von ~38 °C gehalten werden, was je nach Jahreszeit der aktuellen Vorplanung entsprechend einen Leistungsbedarf von rund 800 bis 1.200 kW_{th} erfordert.

Die Kläranlage verfügt über mehrere (Ab-)Wärmequellen, die sowohl für interne Prozesse als auch für externe Wärmebedarfe genutzt werden kön-

nen. Da sich die Wärmequellen hinsichtlich Temperaturniveau, Leistung und zeitlicher Verfügbarkeit stark unterscheiden, besteht ein großes Potenzial in einer Gesamtkonzeptionierung, bei der Wärmequellen mit niedrigerem Temperaturniveau beispielsweise für die Hochlastfaulung genutzt werden und Wärmequellen mit höherem Temperaturniveau (z. B. mit Faulgas betriebene Blockheizkraftwerke (BHKW)) ein Wärmenetz versorgen.

Sauerstoffnutzungspotenzial

Der bei der Elektrolyse entstehende Sauerstoff wird häufig in die Atmosphäre abgelassen, da eine Aufbereitung und ein Transport für eine Nutzung meist teurer sind als der Marktwert. Bei der Machbarkeitsstudie wird daher der Einsatz des Sauerstoffs in den Belebungsbecken untersucht, um die Energiekosten für die Belüftung potenziell zu reduzieren. Diese stellt im Normalfall den größten Energiebedarf einer Kläranlage dar. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass der Sauerstoffbedarf in den Belebungsbecken den produzierten Elektrolysesauerstoff übersteigt. Eine Überlegung ist daher die Nutzung eines Hybridsystems, bei welchem der Elektrolysesauerstoff getrennt von der traditionellen Belüftungsleitung in die Becken eingetragen wird. So kann sichergestellt werden, dass über die bisherige Belüftung weiterhin eine ausreichende Sauerstoffversorgung und Durchmischung der Becken vorhanden ist, auch wenn die Sauerstoffmen-

gen aus dem Elektrolyseur durch einen dynamischen Betrieb schwanken.

Wirtschaftliche Betrachtung

Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse liefert Gesteherungskosten des grünen Wasserstoffs zwischen 8,33 und 6,38 Euro/kg für eine modulare Elektrolyseanlage am Standort. Den höheren Preis bildet hierbei eine 5-MW-Elektrolyseanlage ab, deren Wasserstoff verdichtet und mittels Trailer zu Kunden transportiert wird. Die Gesteherungskosten von 6,38 Euro/kg wiederum resultieren aus einem Szenario, in dem der Großteil des produzierten Wasserstoffs ins Gasnetz eingespeist wird.

Aus der Darstellung der Investitionskosten wird ersichtlich, dass neben der Elektrolyse auch die H₂-Infrastruktur (bestehend aus Verdichter, Wasserstoffspeicher und Tailerabfüllstationen) einen wesentlichen Teil der Investitionen ausmacht. Mit zunehmender Elektrolysegröße spielen zusätzlich die Kosten für die elektrische Versorgung eine Rolle.

Ergebnisse und Ausblick

Der im Rahmen der Machbarkeitsstudie untersuchte Standort am Klärwerk Ulm-Steinhäule bietet geeignete genehmigungsrechtliche Voraussetzungen, ausreichend Flächen, eine gute infrastrukturelle Anbindung und die Nähe zu potenziellen Wärme- und Wasserstoffnutzern. Der bestehende Netzanschluss (4 MW) müsste

INFORMATION

Der ausführliche Abschlussbericht zu der hier vorgestellten Machbarkeitsstudie ist auf der Webseite des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg veröffentlicht und kann über den QR-Code abgerufen werden.



für den Betrieb einer 20-MW-Elektrolyseanlage auf bis zu 30 MW ausgebaut werden. Zusätzlich könnten bestehende und geplante Fotovoltaikanlagen auf dem Klärwerksgelände bis zu 6,5 Gigawattstunden pro Jahr erneuerbaren Strom erzeugen. Die Reinstwasserversorgung durch die weitere Aufbereitung des Kläranlagenablaufs kann dafür sorgen, dass keine Frischwasserressourcen für die Elektrolyse benötigt werden. Die anfallenden Konzentrate und Rückspülwasser werden dabei ins Klärwerk zurückgeführt.

Die Studie zeigt außerdem, dass die Nebenprodukte Abwärme und Sauerstoff der Elektrolyse genutzt werden könnten. Abwärme mit Temperaturen zwischen 45 und 60 °C könnte sowohl für interne Prozesse (wie die Beheizung der geplanten Hochlastfäulung) als auch für externe Anwendungen wie einen möglichen Anschluss an das naheliegende Wärmenetz verwendet werden. Ein weiterer Vorteil der Abwärmennutzung besteht darin, dass in der Regel keine Energie für die Luftkühlung oder Wasser

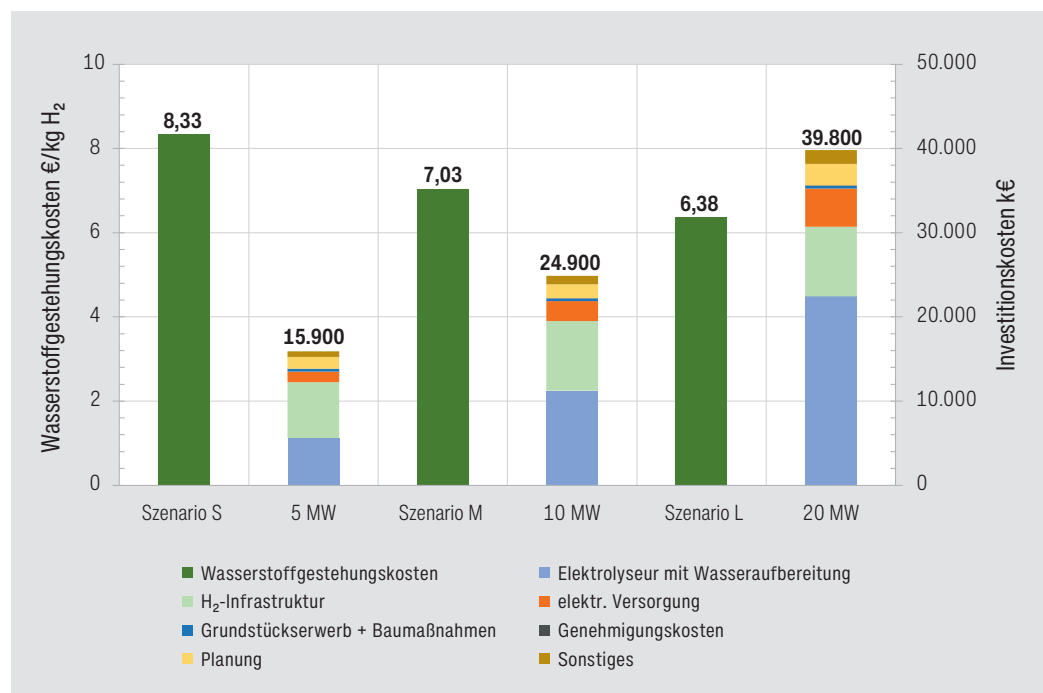


Abb. 3: Diagramm mit Wasserstoffgestehungs- und Investitionskosten der einzelnen Szenarien

Quelle: DVGW-EBI

für die Kühlung benötigt wird [3]. Der anfängliche Sauerstoff kann vollständig in der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage genutzt werden, wodurch der Betrieb zusätzlich optimiert wird und Energiekosten für die Gebläsestation der Kläranlage reduziert werden können.

Zusammenfassend kommt die Studie H2ZVK zu dem Ergebnis, dass die Errichtung einer Elektrolyseanlage am Klärwerk Steinhäule technisch umsetzbar ist. Die Nutzung von Kläranlagenablauf, Abwärme, Sauerstoff und regenerativer Energiequellen kann die Effizienz und Nachhaltigkeit des Elektrolyseurs steigern, was das Klärwerk Steinhäule zu einem vorteilhaften Standort für die Errichtung und den Betrieb des Selbigen macht. Zur Umsetzung sind zum aktuellen Zeitpunkt weitere Planungen und Abstimmungen mit relevanten Stakeholdern erforderlich.

Das Projekt H2ZVK ist auch im Hinblick auf andere Kläranlagenstandorte interessant, da die gewonnenen Erkenntnisse dort übertragen werden können. Ein Elektrolyseur am Kläranlagenstandort wäre dabei ein weiterer Schritt in Richtung einer dezentralen Wasserstoffversorgung [4, 5], der Wasserwiederverwendung und der Energiewende.

Danksagung

Die Machbarkeitsstudie wurde im Rahmen des Förderprogramms „Regionale Wasserstoff Konzepte (RWK)“ des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg durchgeführt. Die Autorinnen und Autoren bedanken sich an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung. ■

Literatur

[1] 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, 12286. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38933-w>.

[2] Fisch, N., Kley, C., Trippe, B., Marx, S.: Klimaneutrale Quartiere mit PV- und Elektrolyseanlage, in: HZwei 23. (Heft 1), S. 35-37.

[3] Saravia, F., Gehrman S., Schwarz, S., Koch M.: Factsheet: Gesamtwasserbedarf der Elektrolyse, Bonn 2024.

[4] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023.

[5] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Erster Fortschrittsbericht zur Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg, 2023.

Die Autoren

Jan Singer ist Projektingenieur im Bereich Wasserchemie und Wassertechnologie in der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

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

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

Florian Weiß ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Steinbeis-Innovationszentrums energieplus.

Dr. Christian Kley ist SU-Leiter am Steinbeis-Innovationszentrum energieplus.

Jonathan Fuchs ist Abteilungsleiter Verfahrenstechnik beim Zweckverband Klärwerk Steinhäule.

Erwin Schäfer ist Betriebsleiter beim Zweckverband Klärwerk Steinhäule.

Dr. Aennes Abbas ist Projektleiter Wasserwirtschaft bei der Umwelttechnik BW GmbH.

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

Kontakt:

Dr.-Ing. Florencia Saravia
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut
des Karlsruher Instituts für Technologie
Engler-Bunte-Ring 1-9
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-47894
E-Mail: saravia@dvwg-ebi.de
Internet: www.dvbw-ebi.de

Besuchen Sie uns online: shop.wvgw.de