

Dezentrale Umsetzung der Energie- und Verkehrswende mit Wasserstoffsystemen auf Kläranlagen

Mark F. Jentsch und Sebastian Büttner

Wasserstoff, Sektorenintegration, Mobilität, Kläranlage, Elektrolyse, Kreislaufmotor

Der Umbau der elektrischen Netzinfrastruktur erfordert neue Konzepte zum dezentralen Lastmanagement, um regional vorhandene erneuerbare Erzeugerstrukturen in der Wind- und Solarenergie sinnvoll zu ergänzen. Auf einer kommunalen Kläranlage in Südthüringen wird hierzu seit Anfang 2019 ein neuartiges Power-to-Gas-System erprobt. Dieses erlaubt es, lastabhängig erneuerbare Elektrizität zu nutzen, um Wasser mit einem Druckelektrolyseur in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten, mit dem Ziel der Wasserstoffnutzung für Mobilitätszwecke oder, alternativ, zur späteren Rückverstromung über einen Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotor. Der für die Fahrzeugbetankung nicht benötigte, überschüssige Sauerstoff wird in der biologischen Reinigungsstufe einer eigens errichteten Versuchskläranlage genutzt. Der Beitrag zeigt die Integrationsmöglichkeiten verschiedener Sektoren im Rahmen einer integrierten Energie- und Mobilitätswende auf und gibt einen Ausblick auf die volkswirtschaftlichen Potenziale in Deutschland.

Implementation of a distributed energy and mobility system based on hydrogen on sewage works

The conversion of the electrical grid infrastructure requires new concepts for distributed load management in order to complement regional renewable energy generation capacity in wind and solar energy. For this purpose, a novel power-to-gas system is being tested at a municipal wastewater treatment plant in southern Thuringia since the beginning of 2019. Depending on the demand profile of the electrical grid this system allows for a use of renewable electricity to break down water into hydrogen and oxygen with a pressure electrolyser, with the aim of using hydrogen for mobility purposes or, alternatively, for later conversion back to electricity via a closed-cycle hydrogen engine. The excess oxygen, which is not needed for fuelling vehicles, is used in the aeration basin of a specially built experimental wastewater treatment plant. This paper demonstrates the possibilities for integrating different sectors within the framework of a transition of the current energy and mobility system towards a more sustainable structure and gives an outlook on the economic potentials in Germany.

1. Hintergrund integrierte Energiewende

Die Energiewende in Deutschland wird geprägt durch den Übergang von einer auf fossilen und nuklearen Energieträgern beruhenden Energieversorgung hin zu einer Energiebereitstellung auf Basis erneuerbarer Energien sowie Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz [1]. Um diesen Transformationsprozess erfolgreich zu bewältigen, müssen neben der Energieerzeugung auch die Nachfrageseite und die effektive Zwischenspeicherung

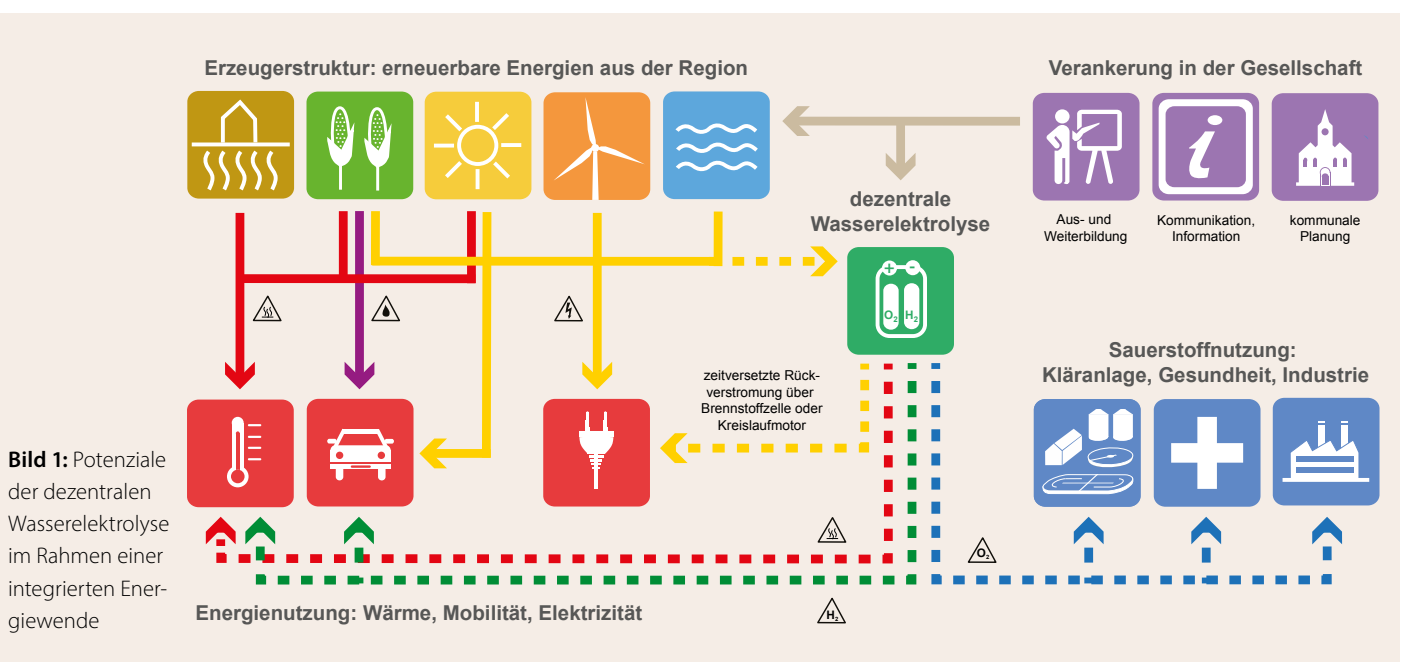
von insbesondere elektrischer Energie berücksichtigt werden. Eine integrierte Energiewende muss daher die unterschiedlichen Infrastrukturbereiche Energiewirtschaft, industrielle Prozesse, Gebäude und Verkehr in einem Gesamtsystem für die Bereitstellung von Elektrizität, Wärme und Kraftstoffen zusammenführen [2]. Diese Integration der verschiedenen Sektoren bedingt zeitnah die Einführung von Power-to-X-Technologien und deren Etablierung am Markt, um das fluktuierende Dargebot er-

neuerbar erzeugter Elektrizität aus Windkraft und Photovoltaik in speicherbare Sekundärenergieträger zu überführen [3]. Hierfür bietet sich insbesondere Wasserstoff an, der im Rahmen der Wasserelektrolyse unter Nutzung von Elektrizität erzeugt wird [4].

Power-to-Gas-Anlagen zur Wasserstoffherzeugung bieten den entscheidenden Vorteil, dass Sie sich dezentral implementieren lassen. Hierdurch kann der im Rahmen der Energiewende erforderliche Ausbau des Elektrizitätsnetzes zur Verteilung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien zumindest in Teilen reduziert werden. Dies kann auch insofern Abhilfe schaffen, als dass der Netzausbau derzeit keine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung besitzt [3, 5]. Da bereits jetzt durch fehlende Stromtrassen und die damit verbundene Abregelung von Erneuerbaren-Energie-Anlagen Zusatzkosten für die Verbraucher entstehen [4], sind aus volkswirtschaftlicher Sicht zeitnah umsetzbare Lösungen gefragt, wie sie durch Power-to-Gas-Anlagen geboten werden. Bis 2030 wird dementsprechend von einem Bedarf an Power-to-Gas-Anlagen von 3 bis 16 GW installierter Leistung in Deutschland ausgegangen [6]. Durch die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft auf Basis der Wasserelektrolyse ist darüber hinaus eine Kopplung der Strom- und Gaswirtschaft möglich, indem Wasserstoff entweder in geringen Mengen in das Erdgasnetz eingespeist, oder aber mit Hilfe einer CO₂-Quelle in Methan umgewandelt wird [7, 8]. Für die Methanisierung bieten sich hierbei zum Beispiel die CO₂-intensive Zement- oder Stahlindustrie an [9]. Allerdings ist, sofern möglich, eine direkte Nutzung des Wasserstoffs solchen Lösungen in der Gaswirtschaft vorzuziehen, um die Umwandlungsverluste zu minimieren. Für

die direkte Wasserstoffnutzung kommen beispielsweise bei einer geringen Verfügbarkeit von Strom aus Wind und Sonne die Rückverstromung über Brennstoffzellen- oder Wasserstoffmotoren-BHKW aber insbesondere auch die Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff in Betracht.

Der Aufbau von integrierten Lösungen der Energiewende wie der Bau von dezentralen Elektrolyseanlagen bedingt die Wahl von geeigneten Standorten für diese Anlagen. Bisher befinden sich vor allem Standorte direkt an Erneuerbaren-Energien-Anlagen und hierbei insbesondere Windparks in der Planung beziehungsweise Realisierung [10-12]. Dies erschwert jedoch unter Umständen die Umsetzung von integrierten Ansätzen über verschiedene Sektoren, da zumeist keine Nutzungsoptionen für den beim Elektrolyseprozess ebenfalls anfallenden Sauerstoff sowie die Prozesswärme vorhanden sind. Kläranlagen als Elektrolysestandort bieten hier einen Ansatz, da sowohl ein Bedarf an Sauerstoff für die Abwasserreinigungsprozesse als auch Verwendungsmöglichkeiten für die entstehende Prozesswärme in anaeroben Faulungsanlagen bestehen. Somit bietet der Standort Kläranlage Möglichkeiten zur Sektorenintegration über die Sektoren Energiewirtschaft, Abwasserreinigung und Mobilität, die in dieser Form einmalig sind und der Idee einer integrierten Energiewende entsprechen [13]. **Bild 1** zeigt schematisch die grundsätzlichen Potentiale der dezentralen Wasserelektrolyse im Rahmen einer integrierten Energiewende auf, die neben der technischen Umsetzung auch Maßnahmen in den Bereichen der Bildung, Kommunikation und kommunalen Planung umfassen muss, um nachhaltig Erfolg zu haben.



2. Potenziale der integrierten Wasserstoff-erzeugung und -nutzung auf Kläranlagen

Die Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff mittels Wasserelektrolyse auf Kläranlagen ist bereits in den frühen 2000er Jahren diskutiert worden, wobei gleichzeitig große Potenziale in der Wasserstoffherstellung über die Wasserdampfreformierung aus dem beim anaeroben Faulungsprozess zur Schlammbehandlung entstehenden Biogas gesehen wurden, was in einer entsprechenden großtechnischen Versuchsanlage in Bottrop umgesetzt wurde [14, 15]. Vor dem Hintergrund des hierzu zusätzlich erforderlichen Umwandlungsschrittes von Methan zu Wasserstoff und der ausgereiften Gasmotorentchnik für Biogasanlagen ist dieser Ansatz aus heutiger Sicht jedoch eher kritisch zu sehen [13, 16]. Heute befinden sich daher Ideen zur Optimierung der Biogasausbeute aus der anaeroben Faulung auf Kläranlagen mittels Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse in der Diskussion, um im Sabatier-Prozess oder aber über Mikroorganismen bei der Faulung entstehendes CO₂ in Methan umzusetzen und ins Erdgasnetz einzuspeisen [17, 18]. Weiterhin sind Hochtemperatur-Brennstoffzellensysteme zur Stromerzeugung aus Faulgas bereits auf Kläranlagen zur Anwendung gekommen [13]. Große Potenziale für Wasserstoffanwendungen auf Kläranlagen bestehen derzeit jedoch vor allem im Rahmen der sich in der Diskussion befindenden Reinigung von Mikroschadstoffen im Abwasser über eine Behandlung mit Ozon [19, 20], das sich über einen Ozongenerator aus Elektrolysesauerstoff herstellen lässt. Die Instabilität von Ozon bedingt hierbei eine Herstellung direkt vor Ort auf der Kläranlage, so dass diese auch zum Standort von Wasserstoffanwendungen wird, sei es zur Optimierung der Gasausbeute aus einer Faulungsanlage wie oben beschrieben oder zur direkten Nutzung für die Rückverstromung oder Mobilitätsanwendungen.

Die weltweit erste Umsetzung eines Wasserelektrolysesystems mit einer kombinierten Wasserstoff- und Sauerstoffnutzung auf einer Kläranlage erfolgte in den Jahren 2002/03 auf der Kläranlage Barth in Mecklenburg-Vorpommern [21]. Installiert wurden ein PEM-Elektrolyseur sowie eine Photovoltaikanlage mit 97 kWp zur bilanziell klimaneutralen Versorgung des Elektrolyseurs mit Elektrizität, wobei der erzeugte Wasserstoff eine Nutzung in einem auf Brennstoffzellenbetrieb umgerüsteten Midibus (mittelgroßen Bus) erfuhr [21-24]. Ausgangspunkt für den Bau der Anlage war jedoch nicht die Wasserstoffnutzung, sondern die Erhöhung der Abwasserfrachten durch den Anschluss zusätzlicher Kunden sowie von zwei Campingplätzen an die bestehende Kläranlage, mit dem Ziel, Spitzenlasten in der Abwasserfracht durch eine gezielte Zugabe von Reinsauerstoff aus der Wasserelektrolyse abzudecken [22, 25, 26]. Die Reinsauerstoffzugabe stellt hierbei eine gängige Praxis zur Abfederung von Überlastzeiten in der biologi-

schen Reinigungsstufe von kommunalen Kläranlagen dar und kommt beispielsweise in touristisch geprägten Regionen mit ausgeprägten saisonalen Abwasserlasten zum Einsatz, wenn es droht, dass die zulässigen Konzentrationen für Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen im Ablauf der Kläranlage nicht mehr eingehalten werden können.

Wie bereits von Schröder [14] und Gramlich et al. [13] dargestellt wurde, bieten Kläranlagen wegen ihres Sauerstoffbedarfs grundsätzlich günstige Voraussetzungen als Standort für die Wasserelektrolyse und können darüber hinaus in einem veränderten Energiemarkt zukünftig eine aktive Rolle als Elektrizitätserzeuger und flexible Last übernehmen [20]. Auf der Erzeugerseite stehen hierbei vor allem Gasmotoren-BHKW und perspektivisch Brennstoffzellen-BHKW, während Elektrolyseanlagen sowie gezielte Lastabwürfe zum Beispiel bei der Luftenbringung über Gebläse in die biologische Reinigungsstufe zur Flexibilisierung des Elektrizitätsnetzes beitragen können.

Die derzeit in Deutschland vorhandenen etwa 9.300 Kläranlagen [27] sind in Relation zur Einwohnerzahl dezentral über das gesamte Bundesgebiet verteilt, wodurch die Kläranlagengröße in der Regel auch im Verhältnis zur Höhe des lokalen Bedarfs an Elektrizität steht. Daraus ergeben sich im Zusammenspiel mit Rückverstromungsanlagen (BHKW) die folgenden grundsätzlichen Potenziale für den Einsatz der Wasserelektrolyse auf kommunalen Kläranlagen in einem vornehmlich auf erneuerbaren Energien beruhenden, integrierten Energiesystem:

- die effektive Nutzung regional erzeugter, unter Umständen anderwärtig nicht nutzbarer fluktuierender erneuerbarer Elektrizität durch dezentral verfügbare Wasserelektrolyseanlagen,
- ein netzdienlicher Einsatz von Wasserelektrolyseanlagen im Elektrizitätsnetz [6] durch das Vorhalten einer gezielt schaltbaren Last zum Lastmanagement auf der Mittelspannungsebene,
- die Nutzung des Elektrolysewasserstoffs in Wasserstoffmotoren- oder Brennstoffzellen-BHKW zur weiteren lokalen Netzstabilisierung durch das Vorhalten von Erzeugerkapazität / positiver Regelleistung,
- die Möglichkeit der Eigenversorgung großer zyklisch oder kontinuierlich laufender elektrischer Verbraucher auf Kläranlagen mit den eigenen BHKW zur Netzentlastung in Phasen der Nichtverfügbarkeit erneuerbarer Elektrizität,
- die Nutzung von in der Regel bereits vorhandenen leistungsfähigen Trafostationen mit Zugang zum Mittelspannungsnetz, die aus Gründen der Versorgungssicherheit bei großen Kläranlagen oftmals redundant ausgeführt sind und Leistungen bis in den Megawatt-Bereich bereitstellen können,
- die Reduzierung des Bedarfs an aufwändigen neuen Leitungsinfrastrukturen durch die Integration von fle-

xiblen Erzeugerinfrastrukturen und Lasten in eine bestehende Infrastruktur,

- die Anbindung an das regionale Erdgasnetz zur Einspeisung nicht genutzter Wasserstoffmengen,
- die Möglichkeit, eine dezentrale Versorgungsinfrastruktur zur Belieferung von Tankstellen mit Wasserstoff in unmittelbarer Nähe von Ballungsräumen aufzubauen, wodurch lange Transportketten wie bei Mineralöl entfallen und die lokale Wertschöpfung und der lokale Wasserstoffverbrauch begünstigt werden,
- die Betankung von Fahrzeugflotten der kommunalen Aufgabenträger mit selbst hergestelltem Wasserstoff (Kanalreinigungsfahrzeuge und andere Fahrzeuge zur Bewirtschaftung der Abwasserinfrastruktur),
- die Nutzung des Elektrolysesauerstoffs zur Ozonerzeugung für die Reinigung von Mikroschadstoffen im Abwasser [19] oder zur Substitution der konventionell in die biologische Reinigungsstufe eingebrachten verdichteten Luft und damit eine Einsparung von bis zu 55 % des gesamten Verbrauchs elektrischer Energie auf kommunalen Kläranlagen [28],
- die Möglichkeit zur Nutzung der Prozesswärme aus der Wasserelektrolyse zur Optimierung der Betriebstemperatur in der anaeroben Faulung zur Klärgasgewinnung (sofern vorhanden),
- das Vorhandensein von Personal, das dauerhaft vor Ort ist sowie mit Fragen der Betriebssicherheit und Überwachung sowie im Umgang mit kritischen Stoffen geschult ist (Abwasser, explosive Gase etc.) [13],
- die vergleichsweise einfachen Umsetzungsmöglichkeiten, da grundlegende Infrastrukturen wie eine hohe elektrische Anschlussleistung, ein ausreichendes Platzangebot, Sicherheitseinrichtungen, eine Umzäunung auf Kläranlagen in der Regel bereits vorhanden sind.

Das Gesamtsystem dezentrale Wasserelektrolyse auf Kläranlagen kann somit als maßgeblicher Aufgabenträger in einer neu strukturierten Energiewirtschaft fungieren, ohne dass komplett neue Infrastrukturen geschaffen werden müssen. Für eine flächendeckende Implementierung eines solchen Systems ist jedoch eine industrielle Verfügbarkeit von Elektrolysesystemen erforderlich, was derzeit nur bedingt gegeben ist. Kläranlagen bieten die Möglichkeit, Elektrolyseure in verschiedenen Leistungsstufen zu integrieren und können damit den von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie geforderten Markthochlauf zu einer Gigawatt-Industrie unterstützen [29]. Um den Markt zu aktivieren, müssen jedoch die regulatorischen Rahmenbedingungen hierfür geschaffen werden [6, 29], beispielsweise bei den Strombezugskosten für die Wasserelektrolyse [29], durch eine verpflichtende Behandlung von Mikroschadstoffen im

Abwasser und / oder eine Besteuerung von CO₂-Emissionen. Die derzeitigen Barrieren liegen nicht im Bereich der Technologie, sondern des Marktes, der durch politische Maßnahmen zum Markthochlauf unterstützt werden muss, damit Power-to-X-Anlagen wirtschaftlich betreibbar werden. Insofern ist die derzeitige Situation in diesem Marktsegment vergleichbar mit der Situation vor der Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, das zum Beispiel bei Photovoltaik- und Windkraftanlagen zu Kostenreduktionen durch Skaleneffekte geführt hat.

3. Umsetzung eines dezentralen Wasserelektrolysesystems auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch

Seit der Erprobung des Wasserelektrolysesystems auf Basis eines PEM-Elektrolyseurs auf der Kläranlage in Barth in den frühen 2000er Jahren [21, 25] sind keine vertiefenden Untersuchungen zur Umsetzung von Wasserelektrolyseanlagen auf Kläranlagen mehr erfolgt. Weiterhin fehlen bisher vergleichende Betrachtungen zum tatsächlichen Nutzen einer Reinsauerstoffbegasung in der biologischen Reinigungsstufe von kommunalen Kläranlagen konventioneller Bauart oder zum Zusammenspiel von Wasserelektrolyse, Wasserstoffmobilität, Rückverstromung und Sauerstoffnutzung im Rahmen einer integrierten Energiewende. Um diese Wissenslücken zu schließen, wurde 2014/15 das in **Bild 2** dargestellte System zur dezentralen Wasserstoffherzeugung und -nutzung auf kommunalen Kläranlagen konzipiert. Seit Januar 2019 sind wesentliche Komponenten dieses Systems im Rahmen eines vom BMBF geförderten F&E-Vorhabens auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch im Süden Thüringens gemeinsam in Betrieb (siehe Danksagung). Hierbei handelt es sich um die derzeit bundesweit einzige Power-to-Gas-Anlage, auf der der entstehende Elektrolysesauerstoff eine weitergehende Nutzung in der Abwasserbehandlung erfährt [30]. Dieser wird nämlich in einer eigens errichteten Versuchskläranlage zur Substitution der normalerweise eingeblasenen Luft verwendet. Das Gesamtsystem, bestehend aus Elektrolyseur, Betankungseinheit, Rückverstromungseinheit und Versuchskläranlage, ist als Demonstrator ausgeführt und wird im Verbund betrieben und evaluiert. Die Kläranlage dient hierbei als Lieferant sämtlicher für die Umsetzung des Konzeptes notwendiger Infrastruktur. Die dezentrale Wasserstoffherzeugung gewährleistet derzeit den Betrieb einer Flotte von drei und ab Mitte 2019 sechs Brennstoffzellenfahrzeugen in der Region Sonneberg.

Wie in **Bild 2** zu sehen ist, steht ein durch eine Niederspannungs-/Hochstromversorgung mit Elektrizität versorgter Druckelektrolyseur im Zentrum des Systems. Dieser ist modular nach dem Prinzip der alkalischen Elektro-

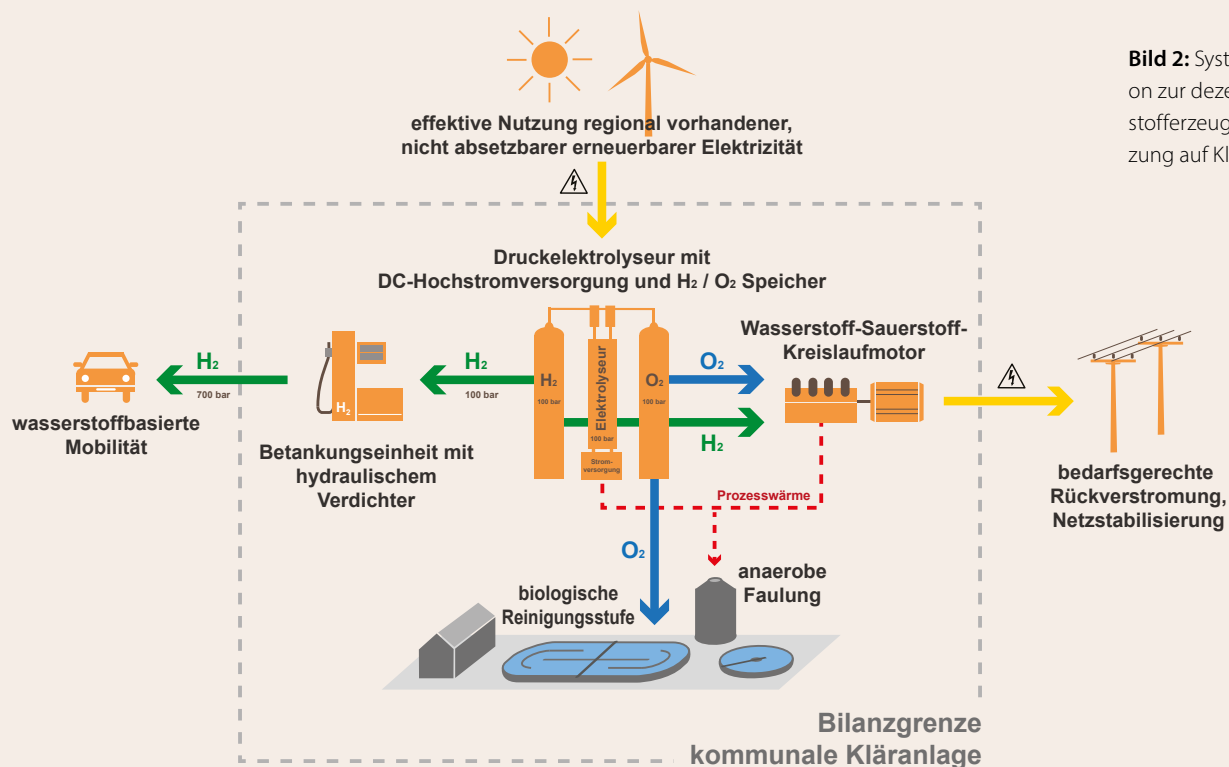


Bild 2: Systemkonfiguration zur dezentralen Wasserstoffherzeugung und -nutzung auf Kläranlagen

lyse aufgebaut und erreicht einen maximalen Betriebsdruck von 100 bar, so dass der entstehende Wasserstoff und Sauerstoff jeweils bei einem Druck von 100 bar vorliegen. Ein Modul besteht hierbei aus sechs Elektrolyseureinheiten und ist, wie in **Bild 3** zu sehen ist, in einem 20-Fuß-Container untergebracht. Als Elektrolyt kommt eine Kaliumhydroxidlösung zum Einsatz. Der Container enthält zudem eine Reinigungskaskade, um den Elektrolysewasserstoff auf die erforderliche Qualität für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen einzustellen, d. h. Wasserstoff 5.0 mit einer Gasreinheit $\geq 99,999\%$. Die elektrische Leistung je Modul beträgt netto, das heißt ohne Peripherie, 63 kW und kann ausgehend von diesem Wert durch Zusammenschalten mehrerer Module bis in den Megawatt-Bereich skaliert werden.

Die Bereitstellung des für die Elektrolyse notwendigen Gleichstroms erfolgt durch eine leistungselektronische Niederspannungs-/Hochstromversorgung, die einen regelbaren Bereich von 0-15 V und 0-5000 A zur Versorgung der Elektrolyseurmodule gewährleistet. Um den Strom mit einer maximalen Welligkeit von 3 % bereitstellen zu können, wird er zunächst hochfrequent transformiert und danach gleichgerichtet und geglättet. Der dabei erreichbare Wirkungsgrad liegt über 91 %. Neben dem Bezug des Stromes aus dem dreiphasigen 400V-Niederspannungsnetz ist optional auch die Einkopplung von Elektrizität beispielsweise aus einer Photo-

voltaikanlage sowohl auf der Wechselstrom- als auch Gleichstromebene möglich. Die digitale Steuerung der Spannungsquelle ermöglicht darüber hinaus auch die Steuerung des Elektrolyseurs. Die Stromversorgung ist luftgekühlt ausgeführt, während die Kühlung der Elektrolyseureinheiten über einen Kühlmittelkreislauf erfolgt. Aufgrund eines fehlenden Wärmebedarfs auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch erfolgt im Rahmen der Erprobung des Systems keine Nutzung der Prozesswärme.

Ergänzt wird das System durch eine Betriebstankstelle zur Betankung von Wasserstoff-PKW sowie eine Rückverstromungseinheit auf Basis einer speziell auf Wasserstoff umgerüsteten Verbrennungskraftmaschine. Die Betankungseinheit arbeitet mit einem speziell entwickelten zweistufigen hydraulischen Verdichter, der den für PKW üblichen Betankungsdruck von maximal 700 bar gewährleistet. Die Zylinder des Verdichters sind dabei koaxial zueinander und vertikal stehend angeordnet. Bei diesem Verfahrensprinzip wird der eigentliche Wasserstoffverdichter als Kolbenmaschine ausgeführt aber nicht direkt angetrieben, sondern über eine Hydraulikflüssigkeit, die über eine Hydraulikpumpe im System bewegt wird. Der eingesetzte hydraulische Verdichter ist hierbei ausgesprochen wartungsarm. Die Gründe hierfür sind der einfache Aufbau im Vergleich zu einer Kombination aus ionischem Verdichter und Kolbenverdichter, das Flächenverhältnis und die Realisierung eines niedrigen, variablen



▲ **Bild 3:** Druckelektrolyseurmodul (hinten im Bild) und Betankungseinheit (vorn im Bild) direkt nach ihrer Aufstellung auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch im Herbst 2018 (Bildquelle: Andre Funke, Wasserwerke Sonneberg)

► **Bild 4:** Vorstellung des neu entwickelten Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotors (Zero-Emission-Kreislaufmotor) auf der 11. Dessauer Gasmotoren-Konferenz (Bildquelle: WTZ Roßlau gGmbH)



Hydraulikdrucks bei skalierbarem Durchmesser und skalierbarer Hublänge. Darüber hinaus besteht im Gegensatz zu anderen Verdichtungssystemen kein direkter Kontakt zwischen Antriebsfluid und Wasserstoff.

Für eine Entkopplung vom Elektrolyseprozess sowie die Realisierung mehrerer aufeinander folgender Tankvorgänge sind in der Betriebstankstelle ein Vorlagebehälter für die Druckstufe 100 bar sowie ein Zwischenspeicher für 300 bar installiert. Aus dem 300 bar Zwischenspeicher erfolgt zu Beginn der Betankung ein Überströmen bis zum Druckausgleich. In der Folge wird dann die weitere Befüllung des Fahrzeugs über den hydraulischen Verdichter bis zum Betankungsdruck von 700 bar durchgeführt. Die Betankung selbst erfolgt über ein standardisiertes Dispensersystem. Für einen PKW lassen sich mit der Betriebstankstelle Betankungszeiten von unter 15 min realisieren. Dies ist zwar länger als bei öffentlichen Wasserstofftankstellen, die mit ionischen Verdichtern ausgestattet sind, resultiert dafür aber in geringeren Investitionskosten für die Verdichtung. Die Anlagenkomponenten der Betriebstankstelle sind, wie **Bild 3** entnommen werden kann, ebenfalls in Standardcontainern untergebracht.

Die bedarfsgerechte Rückverstromung des Wasserstoffs wird über den in **Bild 4** gezeigten, neu entwickelten Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotor (Zero-Emission-Kreislaufmotor) realisiert, der auf der 11. Dessauer

Gasmotoren-Konferenz im April 2019 erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde und den weltweit ersten voll funktionsfähigen Motor seiner Art repräsentiert. Dieser Motor arbeitet nach dem Prinzip der Wasserstoff-Direkt einblasung unter Zugabe von Elektrolysesauerstoff mit geschlossenem Ansaug- und Abgaskreislauf und ist dadurch bis auf die Abgabe des Reaktionsproduktes Wasser vollkommen emissionsfrei. Da durch dieses Kreislaufprinzip sowohl Kohlenstoff als auch Stickstoff vollständig im Verbrennungsprozess fehlen, können weder Kohlenstoffdioxid (CO₂) noch Stickoxide (NO_x) gebildet werden. Dies stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber konventionellen Gasmotoren dar, da bei diesen durch die Verbrennung mit Umgebungsluft grundsätzlich Stickoxide entstehen, und zwar unabhängig vom verwendeten Brennstoff. Das zur Anwendung kommende Glühstift-Brennverfahren des Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotors erreicht zudem im Vergleich zu konventionellen luftansaugenden Verbrennungsmotoren maßgebliche Effizienzvorteile, die in ersten Prüfstandsuntersuchungen in Wirkungsgraden von nahezu 50 % resultiert haben. Damit repräsentiert der Motor bei einem vergleichbaren Wirkungsgrad eine kostengünstige Alternative zur Brennstoffzelle, was ihn für den Einsatz in Wasserstoff-BHKW prädestiniert. Durch die Kreislaufführung ist es außerdem prinzipiell möglich, das bei der Verbrennung entstehende Wasser der Elektrolyse wieder zur Verfügung zu stel-

len, wodurch sich Möglichkeiten für kompakte Anlagen zum Netzmanagement eines vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Elektrizitätsnetzes ergeben. Nach weiteren Versuchen im Prüfstand in Dessau-Roßlau sind für Ende 2019 erste Testläufe gemeinsam mit den restlichen Komponenten auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch geplant.

Der bei der Elektrolyse entstehende Sauerstoff, der für die in **Bild 2** links dargestellte Wasserstoffmobilität nicht benötigt wird, wird in einer Versuchskläranlage genutzt, um die Effekte der Reinsauerstoffeinbringung auf die Behandlung von kommunalem Abwasser zu quantifizieren und ein hierfür optimiertes Betriebsregime zu eruieren. Die Anlage befindet sich seit Herbst 2016 in Betrieb. Sie besteht, wie in **Bild 5** zu sehen ist, aus zwei separaten Behandlungsstraßen mit jeweils einem Belebungsbecken (hinten im Bild) zur biologischen Abwasserbehandlung und jeweils einem Nachklärbecken (vorn im Bild), in dem sich der Belebtschlamm aus der biologischen Reinigungsstufe absetzt, um anschließend in das entsprechende Belebungsbecken zurückgeführt zu werden. Die maximale Füllhöhe der Belebungsbecken beträgt 4,50 m und liegt damit im Bereich der Füllhöhe großer Kläranlagen. Beide Behandlungsstraßen, mit denen zusammen das Abwasser von etwa 275 Personen (nach den sogenannten Einwohnerwerten) gereinigt werden kann, sind mit jeweils einer konventionellen Belüftungseinheit für Umgebungsluft und einer Belüftungseinheit für den Reinsauerstoffbetrieb ausgestattet. Hierdurch lässt sich in paralleler Fahrweise ein vergleichender Betrieb realisieren, was für die Bewertung der Reinigungsleistung von entscheidender Bedeutung ist, da sich Abwasser je nach Jahreszeit und Wetterlage nicht homogen darstellt. Ein Vergleich im zeitversetzten Betrieb wäre hingegen aufgrund der zu erwartenden unterschiedlichen Konzentrationen von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen im Abwasserzulauf der Kläranlage nicht möglich.

Die Bauweise der Versuchskläranlage folgt bewusst einer konventionellen Anlagenkonfiguration für Druckbelüftungssysteme mit dem Ziel herauszufinden, inwieweit durch einfache Nachrüstungen bestehender Kläranlagen stoffliche und energetische Prozessoptimierungen durch eine Reinsauerstoffbegasung aus der Wasserelektrolyse erreicht werden können. Vergleichende Untersuchungen in 2017 haben dementsprechend bereits gezeigt, dass die Regelung im Reinsauerstoffbetrieb analog zu Regelungsregimen in der konventionellen Belüftung erfolgen kann [31]. Während bei der Reinsauerstoffbelüftung ein geringerer Sauerstoffverbrauch für eine vergleichbare bis bessere Reinigungsleistung als bei der konventionellen Belüftung erzielt werden konnte, reichte die eingebrachte Reinsauerstoffmenge jedoch aufgrund des geringeren Volumens im Gegensatz zur Umgebungsluft nicht zur

hydraulischen Umwälzung des Belebungsbeckens aus, so dass ein zusätzliches Aggregat zur Durchmischung des Belebungsbeckens installiert werden musste [31]. Bei den Untersuchungen wurde zudem deutlich, dass durch die Reinsauerstoffbelüftung mehr Abwasser behandelt werden kann, so dass Nachrüstungen bestehender Kläranlagen bei Lasterhöhungen durch zusätzliche neue Anschlussnehmer eine interessante Option darstellen.

Das auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch installierte Gesamtsystem ist insbesondere durch den modularen Aufbau des Druckelektrolyseurs für eine dezentrale, netzentlastende Energiespeicherung geeignet und kann entsprechend dem lokalen Wasserstoff- und Sauerstoffbedarf skaliert werden. Zudem bietet die alkalische Elektrolyse Kostenvorteile gegenüber der PEM-Elektrolyse in einem vergleichbaren Leistungsbereich. Der hohe Druck der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff von 100 bar stellt sich wegen der eingesparten Verdichtungsarbeit als energetisch günstig für die Speicherung und die Fahrzeugbetankung dar. Weiterhin bieten sich Möglichkeiten zur Integration übergeordneter, intelligenter Steuerungsfunktionen zur Steuerung des Gesamtsystems Elektrolyseur, Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotor und Wasserstoff- / Sauerstoffspeicher, um eine Optimierung des Betriebs der Komponenten in Abhängigkeit von Angebot (Elektrizität) und Nachfrage (Wasserstoff + Sauerstoff, Rückverstromung) sowie zum effektiven Speichermanagement zu erreichen. Im Bereich der Abwasserreinigung sind darüber hinaus durch den hohen anliegenden Druck des Sauerstoffs neuartige Reaktionsbehälter für die



Bild 5: Versuchskläranlage auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch zum vergleichenden Betrieb der biologischen Reinigungsstufe mit Elektrolysesauerstoff und Umgebungsluft (Bildquelle: Andre Funke, Wasserwerke Sonneberg)

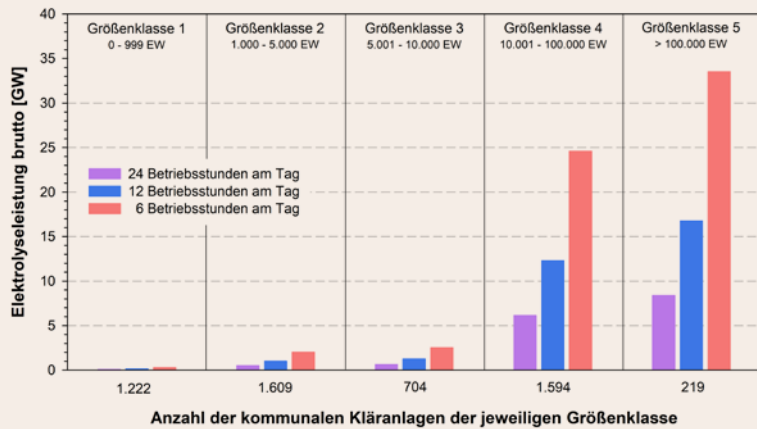


Bild 6: Auf den am 30. Leistungsvergleich der DWA beteiligten kommunalen Kläranlagen installierbare Gesamtleistung für die Wasserelektrolyse zur Deckung des Sauerstoffbedarfs in Abhängigkeit der täglichen Betriebsstunden der Elektrolyseanlagen (Datengrundlage: DWA [27])

Reinsauerstoffbelüftung mit deutlich höheren Wassertiefen denkbar. Dies könnte zukünftig vor allem für Kläranlagen in Ballungsräumen mit beengten Platzverhältnissen von Interesse sein.

4. Skalierung des Gesamtsystems am Beispiel der Kläranlage Sonneberg-Heubisch

Um die übergeordneten Potenziale des in **Bild 2** gezeigten dezentralen Systems für die Umsetzung einer integrierten Energiewende zu bewerten, ist die Skalierung auf einen großtechnischen Maßstab erforderlich. Hierzu wurden die Ergebnisse für den Sauerstoffbedarf der Versuchskläranlage aus den in den Jahren 2017 und 2018 durchgeführten Untersuchungen für die Reinsauerstoffbelüftung auf den Betrieb der gesamten Kläranlage Sonneberg-Heubisch übertragen. Ausgehend vom Sauerstoffbedarf der Kläranlage wurde hierbei eine sauerstoffgeführte Dimensionierung der Elektrolyse unterstellt, um die Anlage immer mit ausreichend Sauerstoff versorgen zu können.

Die Kläranlage Sonneberg-Heubisch hat mit einer Ausbaugröße von 48.000 Einwohnerwerten einen mittleren Sauerstoffbedarf von ca. 355 Nm³ Sauerstoff pro Stunde. Sie stellt damit eine typische Kläranlage der Größenklasse 4 dar, die Anlagen zwischen 10.001 und 100.000 Einwohnerwerten umfasst. Würde der oben beschriebene Druckelektrolyseur zur Deckung dieses Sauerstoffbedarfs ausgelegt und betrieben, entstünden bei einem kontinuierlichen Betrieb mit einer Elektrolyseleistung von brutto, das heißt inklusive Peripherie, 5,63 MW ca. 64 kg

Wasserstoff pro Stunde. Mit dieser Wasserstoffmenge könnten stündlich 10,1 Brennstoffzellen-PKW vom Typ Hyundai Nexa vollständig aufgetankt werden, so dass bei einem kompletten Verbrauch des erzeugten Wasserstoffs für Mobilitätszwecke rein rechnerisch etwa 88.600 vollständige PKW-Betankungen pro Jahr auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch möglich wären.

Bei den rund 14.100 konventionellen Mineralöltankstellen in Deutschland im Jahr 2018 [32] und einer durchschnittlichen Fahrleistung von etwa 13.900 km pro PKW im Jahr 2017 [33] ergeben sich bei einer angenommenen durchschnittlichen Reichweite von etwa 700 km pro Tankfüllung, was der Reichweite eines Hyundai Nexa entspricht, bei den vorhandenen ca. 45,3 Mio. PKW auf deutschen Straßen [33] durchschnittlich rund 63.900 vollständige PKW-Tankfüllungen pro Tankstelle und Jahr. Die Deckung des Sauerstoffbedarfs der Kläranlage Sonneberg-Heubisch aus der Wasserelektrolyse würde folglich dazu führen, dass Wasserstoff in einer Menge hergestellt würde, die die jährlichen vollständigen PKW-Betankungen einer durchschnittlichen deutschen Tankstelle überschreiten würde. Eine Kläranlage der Größenordnung von Sonneberg-Heubisch mit 50.000 angeschlossenen Einwohnerwerten würde demnach in einem solchen Szenario eine vollwertige PKW-Tankstelle darstellen.

Überträgt man die Berechnung für die Kläranlage Sonneberg-Heubisch auf die am 30. Leistungsvergleich der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) [27] beteiligten Abwasserinfrastrukturen der Größenklassen 4 und 5, was kommunale Kläranlagen >10.001 Einwohnerwerte umfasst, so ergibt sich rechnerisch die Möglichkeit, über die Installation von Elektrolyseuren zur Reinsauerstoffversorgung von Kläranlagen den deutschen PKW-Individualverkehr von 630,5 Mrd. km im Jahr 2017 [33] zu ca. 27,4 % mit Treibstoff in Form von Wasserstoff zu versorgen (Referenzfahrzeug: Hyundai Nexa). Die dafür notwendige Gesamtleistung für die Elektrolyse beläuft sich, wie **Bild 6** zeigt, bei einem angenommenen 24-Stunden-Betrieb auf brutto 14,5 GW. Da ein 24-Stunden-Betrieb der Elektrolyse jedoch nicht netzdienlich im Sinne einer integrierten Energiewende ist und zudem auftretende Wartungs- und Fehlzeiten nicht berücksichtigt werden, wäre allerdings eine weit höhere tatsächliche installierte Elektrolyseleistung zu erwarten. Bei einer realistischeren Betriebsdauer der Elektrolyse von zwischen sechs und 12 Stunden pro Tag wären gemäß **Bild 6** daher für sämtliche am Leistungsvergleich beteiligten deutschen Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 installierte elektrische Elektrolyseleistungen im Bereich von brutto rund 29 bis 58 GW anzunehmen. Wie **Bild 6** außerdem zeigt, wäre der mögliche Beitrag kleinerer Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 zur Vorhaltung von

Elektrolysekapazität trotz der relativ großen Anzahl an Anlagen im Vergleich gesehen gering. Insgesamt gibt es in Deutschland rund 1.800 Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 [27], was entsprechend den oben gemachten Berechnungen in mindestens 1.800 Wasserstofftankstellen resultieren würde, die in Abhängigkeit von der Einwohnerdichte über das Bundesgebiet verteilt wären. Da Kläranlagen jedoch aufgrund Ihrer Lage nicht zwangsläufig gut erreichbare Tankstellenstandorte sind, wäre der Aufbau einer jeweils lokal organisierten Logistik zur Wasserstoffverteilung und damit die Belieferung einer größeren Anzahl an Tankstellen voraussichtlich die im Regelfall bessere Option.

Wenngleich ein kompletter Umbau sämtlicher großer Kläranlagen auf eine Reinsauerstoffbelüftung wenig wahrscheinlich erscheint, zeigen die oben aufgeführten Berechnungen jedoch die grundsätzlichen Potenziale der dezentralen Wasserelektrolyse auf Kläranlagen zur Harmonisierung des Elektrizitätsnetzes. So äußern sich, wie **Bild 7** zeigt, Überkapazitäten der erneuerbaren Elektrizitätserzeugung insbesondere in den Elektrizitätspreisen in den verbrauchsschwachen frühen Morgenstunden und an den Wochenenden. Dies kann so weit gehen, dass negative Spotmarkt-Elektrizitätspreise an den Strombörsen auftreten. Lastspitzen sorgen hingegen im Tagesverlauf in der Regel für ein starkes Ansteigen der Preise. Die teils extremen Schwankungen im Elektrizitätsangebot durch die fluktuierende Einspeisung von Elektrizität aus Wind und Sonne könnten in Zukunft durch einen am Tagesgang orientierten Betrieb der Elektrolyse ausgeglichen werden. Neben der Betankung von Fahrzeugen ist hierbei bei einem entsprechenden Bedarf im Elektrizitätsnetz auch eine angepasste Rückverstromung von Elektrolyse-Wasserstoff über Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotoren eine Option, die im Zusammenhang mit der Wasserelektrolyse auf Kläranlagen dezentral möglich wäre. Selbst wenn dies nur 10 % der installierten Elektrolyse-Bruttoleistung auf Kläranlagen ausmachen würde, wäre mit 2,9 bis 5,8 GW installierter Leistung deutschlandweit eine positive Regelleistung in der Größenordnung von zwei bis vier Großkraftwerken zur Netzstabilisierung verfügbar.

Wenn deutschlandweit großmaßstäblich Wasserelektrolyseanlagen anstatt für die Reinsauerstoffnutzung in der biologischen Reinigungsstufe der Abwasserbehandlung für die Ozonerzeugung zur Reinigung von Mikroschadstoffen in einer neu einzurichtenden sogenannten vierten Reinigungsstufe installiert würden, verringern sich die Potenziale für die elektrische Elektrolyseleistung auf 4 bis 6 % des Ursprungswertes. Somit stünden insgesamt nur zwischen 1,16 bis 3,48 GW an Bruttoelektrolyseleistung über Deutschland verteilt zur Verfügung. Dies würde eine Marktaktivierung in einem weit geringeren

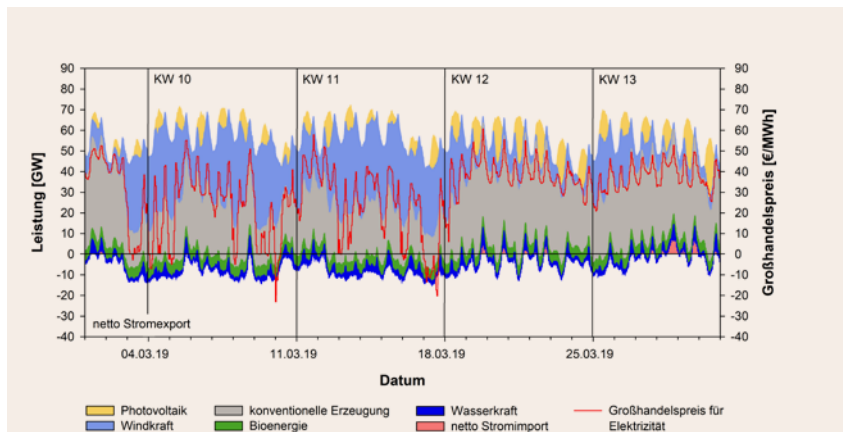


Bild 7: Stromerzeugung und Großhandelspreis für Elektrizität in Deutschland im März 2019 (Datenquelle: Bundesnetzagentur / SMARD.de [35])

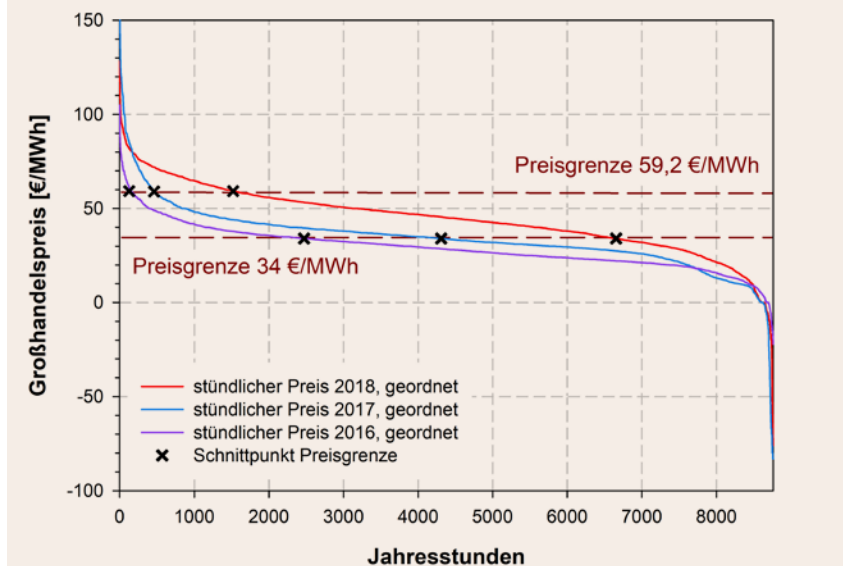


Bild 8: Geordnete Jahresdauerlinien der Großhandelspreise für Elektrizität in Deutschland/Österreich/Luxemburg (ab 01.10.2018 Deutschland/Luxemburg) in den Jahren 2016 bis 2018 (Datenquelle: Bundesnetzagentur / SMARD.de [35])

Umfang bedeuten und könnte somit lediglich zur Initiierung des Markthochlaufs beitragen, ihn aber nicht langfristig tragen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das als Demonstrator auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch installierte Gesamtsystem bei einer entsprechenden Hochskalierung in der Lage wäre, dezentral eine emissionsfreie wasserstoffbasierte Mobilität in einer für den Markthochlauf erforderlichen geografischen Verteilung über ganz Deutschland zu ermöglichen. Gleichzeitig könnten auch auf lokaler Ebene negative als auch positive Regelleistung in einer für die Energiewirtschaft relevanten Größenordnung bereitgestellt werden.

5. Herausforderungen für die Umsetzung

Für eine Umsetzung des aufgezeigten Systems für die dezentrale Wasserelektrolyse stellen sich unter den derzeitigen Rahmenbedingungen Herausforderungen, die zum großen Teil nicht auf der technischen Ebene zu bewältigen sind. Die Komponenten Elektrolyseur, Wasserstofftankstelle und Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotor benötigen zur Erreichung der Wirtschaftlichkeit hohe Betriebsstundenzahlen, was nur bei einem häufig wiederkehrenden Dargebot nicht absetzbarer erneuerbarer Elektrizität, einer ausreichend hohen Anzahl an Wasserstofffahrzeugen beziehungsweise einem hohen Bedarf an Elektrizität aus der Wasserstoff-Rückverstromung gegeben ist. Zudem ist es insbesondere für die Elektrolyse wichtig, die Anzahl von Kaltstartzyklen zu minimieren [29]. Diese Situation ist nur gegeben, wenn Überangebote erneuerbarer Elektrizität nicht nur kurzfristig vorliegen, sondern im Rahmen des Umbaus der Elektrizitätsversorgung hin zu einem hauptsächlich auf erneuerbaren Energien beruhenden System häufig über einen längeren Zeitraum auftreten. Dies wird wesentlich von den zukünftigen Entwicklungen der Erzeugerkapazität abhängen. Weiterhin sind geeignete Markt- und Vergütungsmodelle zu entwickeln, um den Bau von Power-to-Gas-Anlagen im Sinne des Markthochlaufs attraktiv zu machen.

Entscheidend für den Markthochlauf ist der mit dem erzeugten Elektrolysewasserstoff erzielbare Preis. Der Preis, der für den Sauerstoff bei einer Umsetzung des aufgezeigten Systems auf Kläranlagen erzielt werden könnte, fällt hingegen kaum ins Gewicht, da er maximal den Kosten für die substituierte konventionelle Belüftung über Gebläse entsprechen darf, welche pro kg eingebrachten Sauerstoff sehr gering ausfallen. Das Gesamtsystem muss die Wasserstoffherzeugung inklusive Betankung für einen Preis von maximal 9,50 €/kg H₂ erlauben, um für die PKW-Betankung wettbewerbsfähig zu sein. Dies entspricht dem Wasserstoffpreis an öffentlichen Wasserstofftankstellen in Deutschland [34]. Für die auf der Demonstrationsanlage in Sonneberg-Heubisch zum Einsatz kommende Druckelektrolyse ergibt sich ein spezifischer elektrischer Energiebedarf von etwas unter 90 kWh/kg H₂, wodurch sich für das beschriebene System ein maximaler Elektrizitätspreis von ca. 106 €/MWh ableitet, um mit dem derzeit üblichen Wasserstoffpreis an Tankstellen konkurrieren zu können. Die spezifischen Investitionskosten der Elektrolyseanlage und Betankungseinrichtung für 4000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr und eine Abschreibungsdauer von 15 Jahren werden bei den derzeitigen Kostenstrukturen mit ca. 72 €/MWh angenommen. Daraus ergibt sich eine Differenz von 34 €/MWh, die maximal für den Strombezug für die Elektrolyse zur Verfügung steht. In **Bild 8** sind die Großhandelspreise für die Jahre 2016 bis 2018 in einer geordneten

Jahresdauerlinie dargestellt. Daraus wird deutlich, dass der Preis für die am Spotmarkt gehandelte Elektrizität sehr volatil ist. Während im Jahr 2016 noch in 6.288 Stunden des Jahres ein Preis von unter 34 €/MWh vorlag, waren es im Jahr 2017 nur noch 4.452 Stunden und 2018 sogar lediglich 2.105 Stunden [35], in denen die Wirtschaftlichkeit für die Versorgung von Wasserstoffmobilität gegeben gewesen wäre, vorausgesetzt, dass neben den Strombezugskosten keine weiteren Abgaben und Umlagen zu zahlen wären. Wenn die Investitionskosten der Elektrolysesysteme im Rahmen der Industrialisierung halbiert werden könnten, würde sich das Preisfenster für den Strombezug auf 59,2 €/MWh vergrößern, womit sich auch die Verfügbarkeit von Elektrizität für die Elektrolyse erhöhen würde. Hierbei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass sich die Kosten der Elektrizität für den als Letztverbraucher eingeordneten Elektrolyseur durch die verschiedenen gesetzlichen Umlagen (EEG, KWK), Netzentgelte und Abgaben erhöhen, so dass unter diesen Bedingungen ein wirtschaftlicher Betrieb nicht gegeben ist. Dies unterstreicht den Bedarf eines spezifisch auf Power-to-Gas-Anlagen zugeschnittenen Abgabenmodells, um den Markt zu aktivieren. Hier ist der Gesetzgeber gefragt.

6. Fazit und Ausblick

Durch den erfolgreichen Betrieb der Versuchskläranlage konnte nachgewiesen werden, dass kommunale Kläranlagen durch die Nutzungsmöglichkeit von Sauerstoff in der biologischen Reinigungsstufe grundsätzlich als dezentral über das gesamte Bundesgebiet verteilte Standorte für die Implementierung von Wasserelektrolyseanlagen geeignet sind. Zudem bieten sie aufgrund Ihrer leistungsfähigen elektrotechnischen Infrastruktur die Möglichkeit, Elektrolyseleistung in einer für das regionale Elektrizitätsnetzmanagement relevanten Größenordnung bereitzustellen. Durch die Verteilung kommunaler Kläranlagen in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl entstehen zudem gute Synergieeffekte mit dem lokalen Bedarf an Mobilität, der zum großen Teil durch motorisierte Verkehrsmittel des Individualverkehrs gedeckt wird [36]. Wegen der Größe der Kläranlagen im Umfeld größerer Städte können nämlich höhere Elektrolyseleistungen zur Deckung des Sauerstoffbedarfes der biologischen Reinigungsstufe installiert werden, was wiederum auch höhere Erzeugungsmengen an Wasserstoff gewährleistet. Dieser kann entsprechend zur Bedarfsdeckung wasserstoffbasierter und emissionsfreier Mobilität beitragen. Daraus ergibt sich das in Abschnitt 4 aufgeführte theoretische Gesamtleistungspotenzial der Wasserelektrolyse auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland von 29-58 GW. Wenn nur ein Drittel dieser Elektrolyseleistung installiert würde, könnte dementsprechend der bis 2030 prognostizierte

Bedarf an Power-to-Gas-Anlagen von 3 -16 GW [6] bereits gedeckt werden.

Das System zur Einbringung des Elektrolysesauerstoffs in Abwasser kann sehr einfach parallel zu bestehenden Systemen zur Einbringung von Luft installiert werden und ermöglicht damit auch den parallelen Betrieb der Versorgung der biologischen Reinigungsstufe mit Luft und Elektrolysesauerstoff. Dadurch können mit der in **Bild 2** gezeigten Anlagenkonfiguration unterschiedliche Bedarfsmodelle bedient werden – sauerstoffgeführt, wasserstoffgeführt oder zur lokalen Stabilisierung des Elektrizitätsnetzes durch Bereitstellung von positiver und negativer Regelleistung. Zudem besteht die Möglichkeit, die Elektrolyseleistung auf Kläranlagen schrittweise an die Entwicklung des Wasserstoffbedarfs anzupassen. Damit kann das System eine maßgebliche Rolle beim Markthochlauf von Power-to-Gas-Technologien spielen. Es können beispielsweise zunächst Fahrzeuge der kommunalen Aufgabenträger vom Servicefahrzeug des Abwasserzweckverbands bis zum Brennstoffzellenbus eines lokalen ÖPNV-Unternehmens über eine auf dem Gelände installierte Betriebstankstelle mit Wasserstoff versorgt werden. Die gesamte Wasserstoffinfrastruktur befindet sich dabei in einem geschützten Bereich und wird von qualifiziertem Personal betrieben.

Neben Sauerstoff und Wasserstoff ist auf kommunalen Kläranlagen perspektivisch auch die Nutzung der Abwärme des Elektrolyseprozesses und des Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislaufmotors in der anaeroben Schlammstabilisierung (Faulung) möglich, wodurch sich eine Verwertung aller Elektrolyseprodukte realisieren lässt, um eine Maximierung des Gesamtwirkungsgrades zu erreichen.

Durch den Betrieb des Demonstrationssystems auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch und die Evaluierung der Einzelkomponenten im Verbund sollen im weiteren Untersuchungsablauf bis Mitte 2020 Messwerte generiert werden, durch die eine genauere Maßstabsübertragung verschiedener Betriebsvarianten ermöglicht wird. Auf Grundlage der Versuchsdaten sollen darauf aufbauend Geschäftsmodelle aufgestellt werden, die im Rahmen einer integrierten Energie- und Verkehrswende tragfähig sind. Insbesondere die regulatorischen Rahmenbedingungen stehen hierbei im Fokus, da die Strombezugskosten für die Wasserelektrolyse die Wettbewerbsfähigkeit von Power-to-Gas-Anlagen derzeit stark limitieren und damit die Marktaktivierung hemmen.

Dank

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Verbundvorhaben „LocalHy - Dezentrale Wasserelektrolyse mit kombinierter Wasserstoff und Sauerstoffnutzung aus erneuerbarer Energie“ wird mit Mitteln des Bundesministeri-

ums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der „Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany (HYPOS)-Initiative“ unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0705 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Projektpartner und deren Aufgaben bei der Umsetzung des Gesamtsystems zur dezentralen Wasserelektrolyse auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch sind wie folgt: AVX / Kumatec Hydrogen GmbH & Co. KG (Druckelektrolyseur, Verbundkoordination), isle Steuerungstechnik und Leistungselektronik GmbH (Niederspannungs-Hochstromversorgung), sera ComPress GmbH (Betankungseinheit mit hydraulischem Verdichter), WTZ Roßlau gGmbH (Wasserstoff/Sauerstoff-Kreislaufmotor), Wasserwerke Sonneberg (Bereitstellung der Infrastruktur und Bewirtschaftung Versuchskläranlage), Fraunhofer CSP (Gesamtsystembewertung), Bauhaus-Universität Weimar (Konzeption Versuchskläranlage und Systemuntersuchung aus abwassertechnischer Sicht).

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>
- [2] dena (Hrsg.): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, 2018
- [3] Bruckner, T. und Kondziella, H.: Sektorenkopplung: Die nächste Stufe der Energiewende. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn, 2019
- [4] Diewald, W.: Eine zukunftsorientierte Energie- und Industriepolitik muss auf Wasserstoff aus erneuerbaren Energien setzen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen / gwf Gas + Energie Sonderpublikation „Energiespeicher & Sektorenkopplung“ 2 (2018) Nr. 2, S. 17-19
- [5] Goldmann, R.: Im Schnecken tempo zur Stromautobahn. ZDF Nachrichten, 14.08.2018. <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/netzausbau-widerstand-gegen-stromautobahnen-100.html>
- [6] BDEW (Hrsg.): Infrastrukturen verbinden – Die Bedeutung der Gasinfrastruktur und von Power-to-Gas für die Energiewende. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Berlin, 2018
- [7] Shell (Hrsg.): Shell Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂. Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2017
- [8] Verleger, S., Graf F. und Schoof R.: STORE&GO: Power-to-Gas als Eckpfeiler eines decarbonisierten Energiesystems. Energiewirtschaftliche Tagesfragen / gwf Gas + Energie Sonderpublikation „Energiespeicher & Sektorenkopplung“ 2 (2018) Nr. 2, S. 11-13
- [9] dena (Hrsg.): Systemlösung Power to Gas. Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, 2015
- [10] Geitmann, S.: Mobilitätswende kann doch nicht so schwer sein – Zwanzig H₂-Stationen für Schleswig-Holstein. HZwei 19 (2019) Nr. 1, S. 22-23

- [11] *Petersen, H. und Geitmann, S.*: Windstrom pusht H₂-Mobilität – Grüner Wasserstoff für Industrie und Fahrzeuge. HZwei 19 (2019) Nr. 1, S. 22-23
- [12] *Preuß, O.*: Aus dem Himmel in den Tank. Welt: 22.04.2019
- [13] *Gramlich, E., Gredigk-Hoffmann, S., Illing F., Mariakakis, I. Schulte, P., Schulzke, T., Weber, M. und Weichgrebe, D.*: Wasserstoffbasierte Energiekonzepte - Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-10.1 „Wasserstoffbasierte Energiekonzepte“. Ka Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 (2016) Nr. 8, S. 679-683
- [14] *Schröder, M.*: Produktionsunternehmen Kläranlage – Baustein der zukünftigen Infrastruktur zur Energie- und Wasserstoffversorgung. Ka Korrespondenz Abwasser, Abfall 49 (2002) Nr. 10, S. 1380-1387
- [15] *Mrasek, V.*: Energie aus der Kläranlage – Neue Wege der Wasserstoffproduktion auf dem Fachkongress „Zukunftsenergien“ in Essen. Deutschlandfunk, 11.02.2004
- [16] *Mrasek, V.*: Sprit aus der Kläranlage – Aus Faulgas wird Biokraftstoff, Serie: Tolle Idee! Was wurde daraus? Deutschlandfunk, 08.05.2018
- [17] *Schäfer, M., Gretzschel, O., Schmitt, T.G. und Knerr, H.*: Wastewater treatment plants as system service provider for renewable energy storage and control energy in virtual power plants – A potential analysis. Energy Procedia 73 (2015) S. 87-93
- [18] *Trautmann, N., Weichgrebe D., Nelting, K., Stopp P, Vogel, B. und Cuff, G.*: Abschlussbericht zum Vorhaben „Methan aus erneuerbaren Energien – biologische Umwandlung von Wasserstoff aus der Elektrolyse zu Methan“. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 2018
- [19] UBA (Hrsg.): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer (Texte 85/2014). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2014
- [20] *Schäfer, M., Gretzschel, O. und Schmitt, T.G.*: Sektorkopplung und Speicherung Erneuerbarer Energien durch Kläranlagen. Wasser und Abfall 20 (2018) Nr. 10, S. 14-17
- [21] energieportal24.de (Hrsg): Wasserstofftankstelle in Barth/Mecklenburg-Vorpommern. Strobel Verlag GmbH & Co. KG, Arnsberg, 2003. http://www.energieportal24.de/artikel_488.htm
- [22] DWV (Hrsg.): Neues vom Wasserstoff – Vorpommern vorn. Wasserstoff-Spiegel (2001) Nr. 4, S. 1
- [23] *Geitmann S.*: Schadstofffrei in die Vorpommersche Boddenlandschaft – Neuer Brennstoffzellen-Bus für Ostsee-Bad Barth. HZwei 6 (2006) Nr. 4, S. 19
- [24] *Hinz M.*: Das Wasserstoff-Sauerstoff-Projekt in der Kläranlage der Stadt Barth. In: *Lehmann, J. und Luschtinetz, T.* (Hrsg.) Tagungsband 13. Symposium Nutzung Regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, Stralsund, 2.-4. November 2006, S. 41-44
- [25] ARGE Wasserstoff-Initiative-Vorpommern (Hrsg.): Solarer Wasserstoff in Mecklenburg-Vorpommern - Utopie oder Zukunftstechnologie, 2001. http://www.tangram-server.de/wti-mv/fileadmin/downloads/pro_ARGE.pdf
- [26] DWV (Hrsg.): Neues vom Wasserstoff – Barth. Wasserstoff-Spiegel (2002) Nr. 4, S. 1
- [27] DWA (Hrsg.): 30. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, 2018
- [28] UBA (Hrsg.): Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 2009
- [29] *Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., Kiemel, S., Miehe, R., Wahren, S. und Zimmermann, F.* Studie IndWEde – Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2018
- [30] DVGW (Hrsg.): Wo aus Wind und Sonne grünes Gas wird ... Eine Übersicht der Power-to-Gas-Projekte in Deutschland. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, 2019
- [31] *Büttner, S., Jentsch, M.F., Hörnlein, S. und Hubner, B.*: Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende – Einsatz von Elektrolysesauerstoff auf kommunalen Kläranlagen, In: *Luschtinetz, T. und Lehmann, J.* (Hrsg.) Tagungsband 25. Symposium Nutzung Regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, Stralsund, 7.-10. November 2018, S. 22-41
- [32] ADAC: So viele Tankstellen gibt es in Deutschland. ADAC e.V., München, 2019 <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/>
- [33] Kraftfahrt-Bundesamt: Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2019. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/Verkehr-Kilometer/verkehr_in_kilometern_node.htm
- [34] H2 MOBILITY (Hrsg.). Häufige Fragen. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, Berlin, 2019. <https://h2.live/faq>
- [35] Bundesnetzagentur (Hrsg.): SMARD – Strommarktdaten, Stromhandel und Stromerzeugung in Deutschland. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn, 2019. <https://www.smard.de>
- [36] *Nobis, C. und Kuhnimhof, T.*: Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin, 2019. www.mobilitaet-in-deutschland.de

Autoren



Jun.-Prof. Dr. **Mark Frederick Jentsch**
 Bauhaus-Universität Weimar |
 Fakultät Bauingenieurwesen |
 Urban Energy Systems |
 Weimar |
 Tel.: +49 3643 584632
mark.jentsch@uni-weimar.de



Dipl. UWT **Sebastian Büttner**
 Bauhaus-Universität Weimar |
 Fakultät Bauingenieurwesen |
 Urban Energy Systems |
 Weimar |
 Tel.: +49 3643 584622
sebastian.buettner@uni-weimar.de