

Kläranlagen in Kombination mit der Wasserelektrolyse als neue Anbieter von Regelenergieprodukten

Franziska Hönig^(*), Matthias Ebert, Ulrich Blum

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle (Saale), Tel.: +49 345 5589 5216, Fax: +49 345 5589 5999, franziska.hoenig@csp.fraunhofer.de, www.csp.fraunhofer.de

Kurzfassung: Durch die voranschreitende Substitution herkömmlicher Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen durch erneuerbare Energiequellen entstehen neue Herausforderungen an das intelligente Management der Ressource Strom. Es gilt zu Zeiten hohen Angebots, überschüssigen Strom aus dem Netz zu nehmen, zu speichern und bei Bedarf kurzfristig wieder einzuspeisen.

Kommunale Kläranlagen eignen sich aufgrund ihrer Lage in der Nähe von Siedlungen und wegen des flächendeckenden Netzes in zweierlei Hinsicht für die Aufnahme des überschüssigen Stromes, wenn dieser mittels Wasserelektrolyse Wasser in die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff spaltet. Die Nutzung des Wasserstoffes als Speichermedium ermöglicht unter anderem eine Stromerzeugung zur Abdeckung des Spitzenbedarfs, was sich positiv auf die Kosten, insbesondere das Vermeiden von teuren Leistungsspitzen auswirkt. Die Verwendung des sonst nur als Nebenprodukt anfallenden Sauerstoffes wirkt einmal direkt als Beschleuniger von Klärprozessen in den Belebungsbecken der biologischen Reinigungsstufen; zugleich wird damit – praktisch wirkend als indirekter Energieträger – die Energie für die Gebläse deutlich reduziert bzw. vollständig eingespart. Diese nachhaltig kostensenkend wirkenden Eigenschaften der vorgeschlagenen Technologie erhöhen deren wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit.

Keywords: Wasserelektrolyse, Wasserstoff, Sauerstoff, Kläranlagen, Power-to-Gas (PtG), Regelenergie, Erneuerbare Energien (EE), Wettbewerb

1 Motivation

Heutzutage wird die störungsfreie Stromversorgung von den Industrieländern als selbstverständlich angesehen. Energiespeicher können wesentlich zur Netzstabilisierung beitragen. Störungen werden insbesondere durch ein Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage von elektrischer Energie hervorgerufen. Der zunehmende Anteil fluktuierender erneuerbarer Energiequellen an der Stromerzeugung bringt einen steigenden Bedarf an flexiblen Technologien mit sich.

Bis 2025 soll der Anteil von EE an der Bruttostromerzeugung auf 40 bis 45 % steigen; Bis 2035 hat sich die Bundesregierung das Ziel von 55 bis 60 % gesetzt, bis 2050 mindestens 80 %. [1] Laut VDE wird zwar erst ab einem Anteil von über 40 % EE am Bruttostromverbrauch der Bedarf an Kurz- und Langzeitspeichern signifikant, dennoch bedarf es schon jetzt Forschungs- und Demonstrationsprojekte zu neuen Energiespeicherkonzepten, um zukünftig zu einer stabilen Stromversorgung beizutragen. [2] Denn die Entwicklung von Energiespeichern stellt eine Herausforderung im Zuge der

Energiewende dar, die es zu bewältigen gilt. PtG-Konzepte sind ein möglicher Ansatz, zur Lösung des Speicherproblems beizutragen.

Bei Stromüberschüssen wird zwischen markt- und netzbasierten Überschüssen unterschieden. Marktbasierter Überschüsse kommen infolge eines zu hohen Angebots an mit Priorität einspeisenden EE im Vergleich zur Last zustande. Die Residuallast fällt somit unter null. Es kommt zu „negativen Strompreisen“. Dies ist auch der Fall, falls Kraftwerke zu falschen Zeitpunkten oder in ungeplanter Höhe einspeisen. Von netzbasierten Überschüssen wird gesprochen, wenn es zu Überlastungen bzw. zu Engpässen im Transportnetz kommt. Abgeschlossene ökonomische Verträge können aufgrund von Netzrestriktionen physikalisch nicht umgesetzt werden. Auch Engpässe aufgrund von Netzstörungen und Kraftwerksausfällen können dazu führen, dass Windenergie- und Photovoltaikanlagen abgeregelt oder Kraftwerke im Zuge des Redispatch (Netzengpassmanagement) an- oder abgefahren werden müssen. [3]

In Abbildung 1 ist die Entwicklung der Ausfallarbeit, die in einem bestimmten Zeitraum aufgrund der nötigen Abregelung verlorene Menge an Energie, verursacht durch Einspeisemanagementmaßnahmen zu erkennen. Mit steigendem Anteil der EE am Bruttostromverbrauch steigt auch die Ausfallarbeit und erreichte 2015 ihr derzeitiges Maximum. Der Anteil der Ausfallarbeit an der gesamten Erzeugungsmenge von EE-Anlagen betrug 2016 rund 2,3 %. Ursachen für den Rückgang im Jahr 2016 könnten unter anderem die Witterungsverhältnisse bzw. der fortgeschrittene Netzausbau sein. [4]

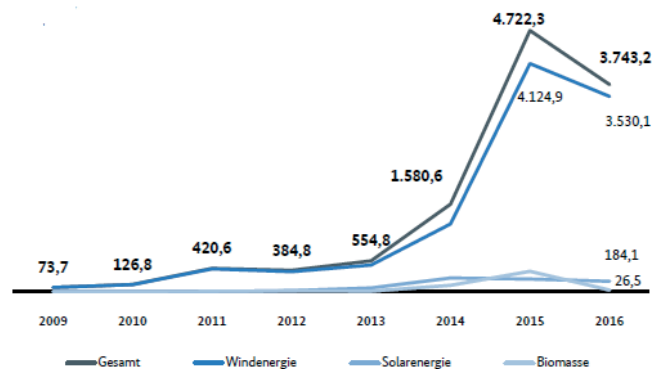


Abbildung 1 Ausfallarbeit verursacht durch Einspeisemanagementmaßnahmen (EinsMan-Maßnahmen) in GWh [4]

Das Verbundforschungsprojekt *Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung (arrivee)* untersuchte in den letzten drei Jahren am Beispiel der Kläranlage Radevormwald, wie Kläranlagen mit Schlammfäulung unter Nutzung von EE in ein optimiertes Regelenergie- und Speicherkonzept integriert werden können. Das Konsortium fand heraus, dass Kläranlagen über ein signifikantes Potential verfügen, zur bedarfsgerechten Entlastung und Stabilisierung von Stromnetzen und in spezifischen Anschlusssituationen im Verteilnetz zum Entfallen oder zur Verzögerung des konventionellen Netzausbaus beizutragen. Kläranlagen sind nicht nur geeignete Standorte zur Umsetzung von PtG-Anlagen – ermöglichen zudem die Sektorenkopplung –, sondern sind ebenfalls in der Lage, ihre Betriebsweise temporär aufgrund externer sowie interner Anforderungen anzupassen, ohne den Klärprozess negativ zu beeinflussen. Somit können sie an neuen Geschäftsmodellen und Produkten mit ihren vorhandenen Flexibilitäten partizipieren und selbst davon profitieren. [5]

Ein wesentlicher Standortvorteil für den Einsatz der Wasserelektrolyse auf Kläranlagen liegt darin begründet, dass der elektrolytisch gewonnene Sauerstoff hier als Energieträger und Prozessbeschleuniger wirkt. Dieser kann in die Belebungsbecken der biologischen Reinigungsstufe eingebracht werden und somit den enormen Energieaufwand für die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen deutlich reduzieren bis zu vollständig substituieren.

2 Potential von Kläranlagen

Etwa 60 % des Gesamtstromverbrauchs kommunaler Klärwerke entfallen auf die biologische Reinigungsstufe. Die Gebläsestation ist dafür im Wesentlichen verantwortlich – so stellt sie innerhalb der biologischen Reinigungsstufe den Hauptstromverbraucher dar. [6] Die rund 10.000 kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland benötigen ca. 4,2 Mrd. kWh pro Jahr an elektrischer Energie, davon produzieren etwa 1.000 Kläranlagen 1,1 Mrd. kWh Strom aus Klär- und Faulgas. [7] Der Stromverbrauch für die biologische Reinigungsstufe aller Kläranlagen in Deutschland beträgt demzufolge rund 2,52 Mrd. kWh pro Jahr. Eine Glättung von Leistungsspitzen bzw. ein Einspeisen von Strom zu Zeiten mit erhöhtem Bedarf Dritter wirkt direkt kostensenkend bzw. ertragssteigernd. Ergänzend liegt im zusätzlichen Nutzen von Reinsauerstoff aus der Wasserelektrolyse ein großes Einsparpotential.

Eine Steigerung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit erfährt die Kombination aus Kläranlage und Elektrolyseur durch die zusätzliche Verwertung des Koppelproduktes Wasserstoff bei Nichtverstromung. So können Kläranlagen aufgrund ihrer gleichmäßigen Verteilung in Deutschland entscheidend zum flächendeckenden Aufbau einer dezentralen Wasserstoffinfrastruktur in Form von Betankungsmöglichkeiten für Brennstoffzellenfahrzeuge am Kläranlagen-Standort beitragen. [8] Zudem können der Wasserstoff und Sauerstoff bei einem fehlenden Dargebot von EE einer Rückverstromungseinheit, beispielsweise einem auf Wasserstoff umgerüsteten Wasserstoff-Sauerstoff-Verbrennungsmotor, zugeführt werden, die die Produkte bedarfsgerecht und emissionsfrei verbrennt und dabei neben Wärme auch elektrische Energie erzeugt. Kläranlagen stellen Knotenpunkte einer regelmäßig monopolistischen Netzinfrastruktur dar, weshalb ihre Wettbewerbswirkung eher indirekt, also über die Standortqualitäten, zur Geltung kommt. Diese Knotenpunkte sind meist öffentliche Investitionen und zugleich irreversible, also versunkene Kosten, sodass sich eine parallele Investition meist nicht lohnt [9]. Damit gewinnt die Möglichkeit der technologischen Ertüchtigung, wie hier vorgetragen, wesentliche Bedeutung für die regionale Wettbewerbsfähigkeit.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die chemische Reaktion der Wasserelektrolyse ist schon seit langem bekannt: Wasser wird mittels elektrischer Energie in die chemischen Elemente Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Die drei Hauptarten der Wasserelektrolyse, die sich im Wesentlichen durch die Art des Ladungsaustausches unterscheiden, sind in Tabelle 1 dargestellt. Hierbei wird zwischen der alkalischen Elektrolyse (AEL), der Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL) und der Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) bzw. Festoxid-Elektrolyse (SOEL) unterschieden. [10]

Tabelle 1 Übersicht über die drei wesentlichen Arten der Wasserelektrolyse [10]

Technologie	Temperaturbereich	Kathodenreaktion	Ladungsträger	Anodenreaktion
AEL	40-90 °C	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	OH^-	$2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
PEMEL	20-100 °C	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	H^+	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
HTEL (SOEL)	700-1.000 °C	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$	O^{2-}	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$

Elektrolyseure hingegen, die als Anbieter von Regelenergieprodukten fungieren, stellen eine Neuheit dar. In Europa beträgt die Netzfrequenz 50 Hertz. Zwischen 49,8-50,2 Hz sind Schwankungen erlaubt. Wenn jedoch mehr oder weniger Strom ins Netz eingespeist wird und somit der Bereich über- oder unterschritten wird, muss die Frequenzschwankung mittels Regelenergie ausgeglichen werden. Nicht nur Großanlagen können am Markt für Regelenergie teilnehmen. Auch einzelne dezentrale Anlagen können durch die virtuelle Vernetzung (Virtuelles Kraftwerk) durch einen Direktvermarkter Regelenergie bereitstellen. [11] Die drei Arten der Regelenergie sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2 Übersicht über die drei Regelenergiequalitäten [12]

	Primärregelleistung PRL	Sekundärregelleistung SRL	Minutenreserveleistung MRL
Reaktionszeit	< 30 Sek. (vollautomatisch)	< 5 Minuten (vollautomatisch)	< 15 Minuten (teilautomatisch möglich)
Angebot, Vergütung	Leistungspreis	Leistungs- und Arbeitspreis	Leistungs- und Arbeitspreis
Vergabe	Wöchentlich	Wöchentlich	Werktäglich
Bereitstellungszeitraum	1 Woche / durchgehend	1 Woche / 2 Zeitscheiben à 12 h	1 Tag / 6 Zeitscheiben à 4 h
Lieferrichtung	Positiv und Negativ (1 Produkt)	Positiv oder Negativ (2 Produkte)	Positiv oder Negativ (2 Produkte)
Mindestleistung	1 MW	5 MW	5 MW

Die Regelenergie kann je nach Bedarf sowohl als positive als auch negative Regelenergie angeboten werden.

Positive Regelenergie: Fällt die Netzfrequenz unter ein zu niedriges Level muss die Stromerzeugung gemäß des Bedarfs über das Virtuelle Kraftwerk gesteigert werden.

Negative Regelenergie: Bei zu hoher Frequenz wird die Stromerzeugung kurzzeitig reduziert, beispielsweise durch die Aufnahme der Energie in Form der Wasserelektrolyse.

Erlöse können bei der Sekundär- und Minutenreserve sowohl durch reine Vorhaltung der Kapazitäten (*Leistungspreis*) als auch durch Abruf (*Arbeitspreis*) erzielt werden. Der somit

tatsächlich erzielte Ertrag für die Beteiligung am Regelenenergiemarkt setzt sich demnach aus dem Leistungspreis für die Bereitstellung und dem Arbeitspreis für die tatsächliche Leistungserbringung bei Abruf zusammen. Die Aktivierung der Primärregelleistung ist hingegen frequenzabhängig, d.h. der Anbieter von Primärreserve misst die Netzfrequenz eigenständig und reagiert unmittelbar auf Schwankungen. Neben der Vergütung können die Anlagen von einer positiven Öffentlichkeitswirkung durch ihren aktiven Beitrag zur Netzstabilisierung und der gleichzeitigen Integration von EE profitieren. [11] [13]

Bisher hatte die PEM-Elektrolyse gegenüber der AEL den Vorteil, dass sie auf Lastschwankungen innerhalb von Millisekunden reagieren und somit alle drei Arten der Regelleistung bereitstellen kann [14]. Als Beispiel hierfür ist der neuartige Windgas-PEM-Elektrolyseur der Städtischen Betriebe Haßfurt und von Greenpeace Energy zu nennen, der seit Oktober 2016 im Regelbetrieb läuft und überschüssigen Strom aus dem nahen Windpark sowie aus weiteren Windenergie- und Photovoltaikanlagen in erneuerbaren Wasserstoff umwandelt. Hierbei weist der Elektrolyseur ein hochdynamisches Verhalten auf, reagiert binnen Millisekunden auf Leitsignale und ist in der Lage, innerhalb von 20 Sekunden eine Last von 1,25 MW aufzunehmen. Alle drei Regelenenergieprodukte (PRL, SRL, MRL) kämen somit infrage. Ein Virtuelles Kraftwerk der Next Kraftwerke steuert die Anlage vollautomatisch, wenn im Verteilnetz ein Überschuss herrscht, siehe Abbildung 2. Die Kooperation zwischen Verteilnetzbetreiber, Grünstrom- und Windgaslieferant und einem Virtuellen Kraftwerk ist bisher auf lokaler Ebene einzigartig. [15] [16]

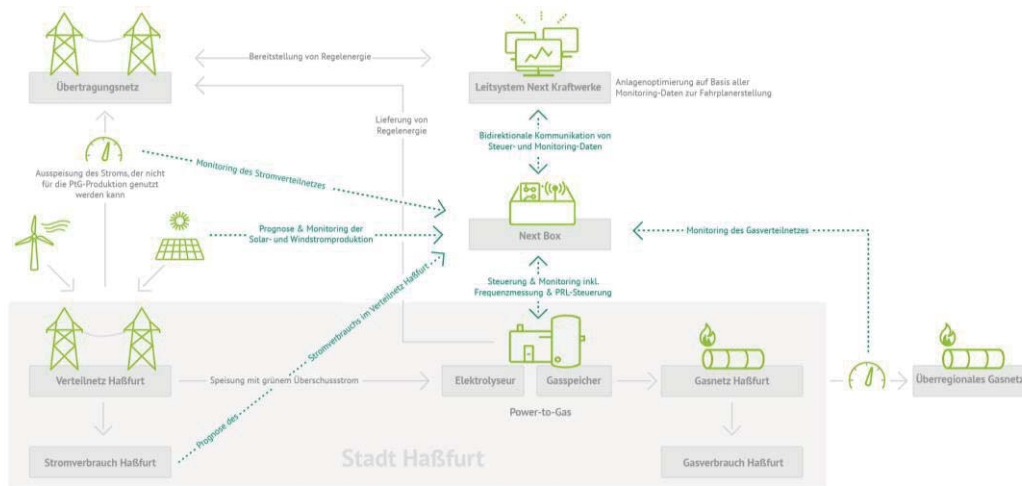


Abbildung 2 Vernetzung der Power-to-Gas-Anlage der Windgas Haßfurt GmbH & Co. KG [16]

Auch der PEM-Druckelektrolyseur des *Energiepark Mainz* soll über einen längeren Zeitraum mit verschiedenen Betriebsbedingungen getestet werden, um die Anbindung der PtG-Anlage an die Strombörse und den Markt für Regelenenergie zu erproben. [17]

Seit Juni 2017 nimmt auch REstore, einer der führenden europäischen Anbieter für Regelleistung, mit dem VESTOLIT Chlor-Alkali-Elektrolyseur am Markt für Primärregelleistung teil. Das ist das erste Mal, dass eine Anlage zur Chlor-Alkali-Elektrolyse in Deutschland Primärregelenergie bereitstellt. [18]

Diese Beispiele zeigen, dass Elektrolyseure schon heute den Ansprüchen an eine dynamische Fahrweise gerecht werden können. So können sie dem Einspeiseprofil von Windenergie- und Solaranlagen problemlos folgen.

Mittlerweile gibt es viele Projekte zum Thema PtG, auch solche, die sich auf Abwasserreinigungsanlagen als idealen Standort spezialisiert haben, beispielsweise das Projekt *Kläranlagen als Energiespeicher in Emden/Leer* [19], das Projekt *Wasserstoff-Initiative-Vorpommern* [20] am Standort Barth oder *WaStraK NRW* [8], um nur einige wenige zu nennen. Jedoch steht hier die Verwertung des Wasserstoffes im Fokus. Das Koppelprodukt Sauerstoff findet meist keine Anwendung, wird über Dach des Elektrolyseurs abgelassen oder wird nur zur Spitzenlastabdeckung in die vorhandenen Belebungsbecken eingebracht.

Die Verwendung von Reinsauerstoff zur Leistungssteigerung von Belebungsbecken und zur Geruchselimination hat sich jedoch schon seit längerem bewährt. Vor allem Industriekläranlagen mit hohen Abwassertemperaturen und geruchsintensiven Stoffen nutzen bereits die verfahrenstechnischen und energetischen Vorteile, die eine Zumischung des reinen Sauerstoffs in der biologischen Reinigungsstufe mit sich bringt: Das für die Versorgung der Mikroorganismen notwendige Gasvolumen ist bei Reinsauerstoff im Vergleich zu Luftsauerstoff deutlich geringer, da die rund 78 % Stickstoffanteile der Luft entfallen. Durch eine geringere Aerosolbildung lassen sich Geruchsprobleme verringern, im besten Fall ganz vermeiden. Abwässer mit hohen Feststoffkonzentrationen können durch eine zusätzliche Reinsauerstoffbelüftung auch dann noch mit ausreichend Sauerstoff versorgt werden, wenn die Kapazität konventioneller Belüftungssysteme bereits überschritten ist. Somit ist es möglich, bestehende Kläranlagen ohne große bauliche Maßnahmen effizienter zu gestalten. Bei einem Neubau einer Kläranlage können die Belebungsbecken durch die Verwendung von Reinsauerstoff kleiner dimensioniert werden als konventionelle Anlagen. So kann bei gleichem Volumen eine Leistungssteigerung erzielt bzw. bei gleicher Leistung das Beckenvolumen reduziert werden. [21] Dies senkt Investitionsausgaben und damit Abschreibungskosten. Nicht berücksichtigt sind die bisher hohen externen Kosten der Geruchsbelästigung, die reduziert bzw. vermieden werden, die aber ökonomisch relevant sind – insbesondere bei der Beeinträchtigung konkreter Standorte.

Das Projekt *INNOWATEC* im Rahmen der Programmlinie *Fabrik der Zukunft* des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie in Wien fand 2010 bereits durch Testversuche mit technischem Sauerstoff heraus, dass einerseits durch einen möglichst großen Konzentrationsunterschied (z.B. durch reine Sauerstoffbegasung oder durch mit Sauerstoff angereicherte Luft) ein möglichst effizienter Gas/Flüssigkeits-Sauerstofftransfer bzw. ein rascher Übergang des Sauerstoffs von der gasförmigen in die flüssige Phase gewährleistet werden kann. Andererseits kann dies durch eine möglichst feinblasige Belüftung und der damit verbundenen Maximierung der Grenzfläche erreicht werden. [22]

Bisher wurde Reinsauerstoff, welcher größtenteils von großtechnischen Luftzerlegungsanlagen erzeugt wurde, wie beschrieben zur Spitzenlastabdeckung und zur Reduzierung der Geruchsemissionen in der biologischen Reinigungsstufe von Kläranlagen verwendet. Die Substituierung von Luft- durch 100 %, insbesondere elektrolytisch gewonnenem Reinsauerstoff zur Stromkostenreduzierung wurde noch nicht hinreichend untersucht. Hier setzt das im folgenden Kapitel beschriebene Projekt an. Für eine Beteiligung am Regelenergiemarkt ist jedoch immer zu beachten, dass der Reinigungsbetrieb eingehalten wird. So kann der Elektrolyseur beispielsweise durchgehend in Teillast laufen, um eine kontinuierliche Zufuhr von Sauerstoff für die Belüftung bereitzustellen, und dabei gleichzeitig Regelenergie vorhalten oder der Sauerstoff, der nur in Zeiten des Abrufes von

negativer Regelenergie produziert wird, wird andernfalls zur Spitzenlastabdeckung beigemischt.

4 HYPOS-Projekt *LocalHy*

Unter dem Dach des HYPOS (Hydrogen Power Storage & Solution East Germany)-Projektes, eines von zehn ostdeutschen Projekten, welches im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, ist das Verbundprojekt *LocalHy* „Dezentrale Wasserelektrolyse mit kombinierter Wasserstoff- und Sauerstoffnutzung aus Erneuerbaren Energien“ angesiedelt. Das Konsortium stellt sich der Herausforderung, ein neuartiges Konzept für die Energiewende zu untersuchen. Dabei steht die Belüftung des Belebungsbeckens mit Reinsauerstoff, welcher elektrolytisch direkt vor Ort erzeugt wird, im zentralen Fokus des Projektes. Dem sonst nur als Nebenprodukt anfallenden Gas soll hier besonderes Augenmerk geschenkt werden.

Ein auf kommunalen Kläranlagen eingesetzter alkalischer Druckelektrolyseur der Firma Kumatec soll – im besten Fall bei überschüssiger erneuerbarer Elektrizität – Sauerstoff und Wasserstoff produzieren. Dieser wird durch eine Niederspannungs-/Hochstromversorgung der Firma ISLE Steuerungstechnik und Leistungselektronik mit Elektrizität versorgt. Die entstandenen Produkte werden zwischengespeichert und sollen in einer Rückverstromungseinheit, einem speziell auf Wasserstoff umgerüsteten Wasserstoff-Sauerstoff-Verbrennungsmotor der Firma WTZ Roßlau, bedarfsgerecht und emissionsfrei verbrannt werden und dabei elektrische und thermische Energie erzeugen. Besonderer Vorteil durch die Reaktion mit Reinsauerstoff statt mit Luftsauerstoff liegt darin, dass keine Stickoxide anfallen.

Der Reinsauerstoff wird vorrangig zur biologischen Reinigung in das Belebungsbecken eingebracht. Die sonst verwendeten, sehr stromintensiven Gebläse für die Belüftung werden vollständig durch die Reinsauerstoffzufuhr ersetzt. Im Projekt wird dies in einem Testbelebungsbecken durch die Bauhaus-Universität Weimar untersucht. Der gewonnene Wasserstoff kann neben der Verbrennung im Kreislaufmotor einer weiteren Nutzung zugeführt werden: Im vorliegenden System dient dieser als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge, welche mit einer eigens für das Projekt entwickelten Wasserstofftankstelle mit hydraulischem Verdichter der Firma SERA Compress direkt vor Ort betankt werden können. Zukünftig wäre es denkbar, damit kommunale Flottenfahrzeuge wie Busse und Taxis mit Brennstoffzellenantrieb emissionsfrei zu betanken.

Diese neuartige Systemzusammenstellung für die dezentrale Wasserstofferzeugung und -nutzung wird als Versuchsanlage auf einer bereits bestehenden Kläranlage der Wasserwerke Sonneberg installiert, betrieben und von den beteiligten Projektpartnern ausgewertet. Übergeordnetes Ziel ist es, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit eines solchen dezentralen PtG-Systems nachzuweisen, welches nach dem derzeitigen Kenntnisstand eines der weltweit ersten PtG-Systeme ist, das sektorenübergreifend Lösungsansätze für die Energiewirtschaft, Mobilität und kommunale Abwasserentsorgung erarbeitet.

5 Modellentwicklung

Um eine zuverlässige Auslegung eines solchen Gesamtsystems und letztendlich eine Parameter-Optimierung durchführen zu können, bedarf es eines einfach bedienbaren Modells, welches eine zeitliche Auflösung über die Laufzeit des Projektes und eine ganzheitliche Betrachtung aller Komponenten zulässt.

Das im Rahmen des Projektes *LocalHy* entwickelte Systemanalyse- und Wirtschaftlichkeitstool des Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP hat zum Ziel, für jeden individuellen Bedarfsfall (Größe der Kläranlage, Anzahl der zu betankenden Fahrzeuge, Rückverstromungsbedarf usw.) die sowohl technisch als auch wirtschaftlich optimale Systemkonfiguration zu ermitteln. Im Zuge der Systemsimulation werden der Elektrolyseur und die entsprechenden Sauerstoff- und Wasserstoffspeicher je nach zur Verfügung stehender EE und den jeweiligen Verbrauchern ausgelegt. Das Wirtschaftlichkeitsanalysetool bewertet das angelegte Projekt über die gesamte Laufzeit und gibt eine Empfehlung für den Betreiber, ob sich die Investition in ein solches System lohnt.

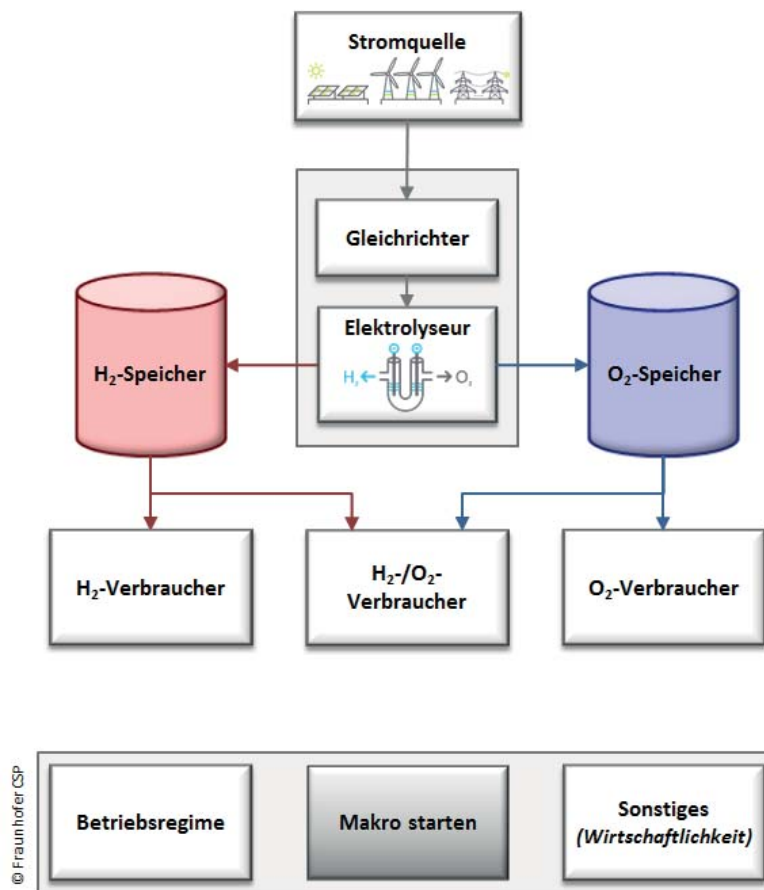


Abbildung 3 Eingabemaske des entwickelten Systemanalysetools

Die Benutzeroberfläche, siehe Abbildung 3, ist so aufgebaut, dass der Benutzer hinter jedem Eingabefeld Abfragen sowohl zu Daten, die ausschließlich die Systemsimulation betreffen, als auch zu Daten für die Wirtschaftlichkeit wiederfindet. Die System- und die

Wirtschaftlichkeitsanalyse sind zunächst unabhängig voneinander durchführbar. Die Dateneingabe erfolgt für jede Komponente durch den Benutzer bzw. den zukünftigen Betreiber einer solchen Anlage. Für jeden individuellen Standort können im Vorfeld Simulationen zur Generierung der PV- und Windenergiekosten – stündlich aufgelöst für ein Jahr – durchgeführt und anschließend in das Tool hochgeladen werden. Es können ebenso Realdaten von bestehenden PV- oder Windenergieparks bzw. mögliche Einsatzzeiten für Regelenergie hinterlegt werden. Die Wasserstoff- und Sauerstoffverbraucher sind vom Benutzer einzeln auswähl- und priorisierbar. Unter *Betriebsregime* ist unter anderem die Stromquelle einzustellen: So kann zwischen Szenarien mit 100% EE, EE und gleichzeitig Netzstrom – falls bei Flaute oder in der Nacht die Stromzufuhr über EE nicht ausreicht – oder nur Netzstrom (Grün- oder Mixstrom) unterschieden werden. Letztendlich erfolgt eine stündlich aufgelöste Simulation eines Betriebsjahres. Diese Simulation wird anschließend mit dem Wirtschaftlichkeitstool verknüpft und für den konkreten Eingabefall die Wirtschaftlichkeit in Form des Kapitalwertes (K0) über die eingegebene Laufzeit des Projektes ausgegeben. Ist K0 größer null, ist das Projekt absolut vorteilhaft und der Geldanlage am Kapitalmarkt vorzuziehen. Entspricht der Wert der null, gibt es keine Vorteilhaftigkeitsentscheidung, die Kapitalverzinsung entspricht der Verzinsung am Kapitalmarkt. Ist K0 hingegen kleiner als null, lohnt es sich für den Betreiber nicht, in das Projekt zu investieren. [23] Im nächsten Schritt ist eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um herauszufinden, welche Änderung der Eingangsparameter den größten Einfluss auf das Ergebnis hat. Die abschließende Optimierung des Modells soll die Wirtschaftlichkeit eines derartigen Gesamtsystems darlegen.

6 Ausblick

Das dezentrale System von *LocalHy* wird auf einer bereits bestehenden Kläranlage der Wasserwerke Sonneberg in Thüringen errichtet werden. Nach erfolgreichem Testbetrieb und Abschluss des Projektes voraussichtlich im Mai 2019 ist es Aufgabe des Konsortiums, die entstandenen Energie- und Stoffströme zu evaluieren. Die Sensitivitätsanalyse des Fraunhofer CSP gibt Aufschluss über das optimale Zusammenspiel der Komponenten und zeigt auf, wie das System optimiert werden muss, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern.

Um weitere Anwendungsfelder zu erschließen, wird das Systemanalysetool um neue Komponenten wie Brennstoffzellen für die Rückverstromung, Batteriespeicher für einen autarken Betrieb und um zusätzliche Sauerstoff- und Wasserstoffverbraucher erweitert werden. Das Konzept lässt sich beispielsweise auch auf andere sauerstoffverbrauchende Systeme anwenden, für die auch die gleichzeitige Energiespeicherung von Bedeutung ist; Anwendungsperspektiven reichen von Aquakulturen bis hin zur Krankenhäusern. Schließlich könnte das System geeignet sein, dezentrale (Klein-)Versorgungs- und Entsorgungssysteme aufzubauen, die für Kleinstsiedlungen ebenso wie – modular – für Katastropheneinsatz Anwendung finden können.

Nach Projektende können Schlüsse gezogen werden, ob die Systemübertragbarkeit auf andere Länder oder weit abgelegene Regionen möglich ist und ob Temperatureinflüsse eine Degradation der Komponenten hervorrufen. Eine dezentrale Wasserstoffproduktion auf Kläranlagen hätte zusätzlich den Vorteil für abgegrenzte Regionen, dass es keinem Transport, weder über Lastwagen mittels Hochdrucktank oder über Bahn, noch über Pipelines, bedarf, da dieser unmittelbar vor Ort verbraucht werden würde.

7 Zusammenfassung

Kläranlagen können zukünftig als Anbieter von Regelleistung in Betracht kommen, falls der Bedarf an Energiespeichern wie erwartet zunehmen sollte, indem diese den überschüssigen Strom aus EE mittels Wasserelektrolyse aufnehmen und die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff je nach Bedarf und Anwendung so lange speichern wie notwendig – unter der Bedingung, dass hierbei der Reinigungsprozess nicht eingeschränkt wird. Mit welcher Systemkonfiguration sich wirtschaftliche Rentabilität einstellt, ist im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zu ermitteln und im Laufe des Testbetriebes des HYPOS-Projektes *LocalHy* zu prüfen. Zusammenfassend birgt die Kombination der Wasserelektrolyse als Energiespeicher zahlreiche neue Anwendungsfelder für den Kläranlagenbetrieb. Das entwickelte Systemmodell bietet letztendlich die Möglichkeit, für jeden individuellen Anwendungsfall eine iterative Auslegung durchzuführen und somit die ebenso technisch wie auch wirtschaftlich optimale Systemkonfiguration zu ermitteln.

Das Ergebnis des Gesamtprojektes ist die Demonstration eines PtG-Systems, welches sich neben der möglichen Bereitstellung von Flexibilität durch den Elektrolyseur, der Wasserstoffnutzung für Mobilitätszwecke und für die Rückverstromung zur Bereitstellung von Strom und Wärme bis hin zur Sauerstoffanwendung im Belebungsbecken einer Kläranlage allen Bereichen der Sektorenkopplung widmet und somit einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende beiträgt.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, welches im Rahmen der Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany (HYPOS)-Initiative das Projekt *LocalHy* möglich macht (Förderkennzeichen: 03ZZ0705D).

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Erneuerbare Energien in Zahlen,“ BMWi, Berlin, 2016.
- [2] VDE, „Energiespeicher für die Energiewende - Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050,“ VDE-Studie, Frankfurt am Main, 2012.
- [3] M. Sterner und I. Stadler, „Energiespeicher Bedarf - Technologien - Integration,“ Berlin, Springer Vieweg, 2014, p. 52.
- [4] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen | Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2017,“ Bundesnetzagentur | Bundeskartellamt, Bonn, 2017.
- [5] T. G. Schmitt, „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung (arrivee),“ in *ERWAS-Abschlusskonferenz*, Berlin, 2017.
- [6] Bundesamt für Energie, „Untersuchungen über den Stromverbrauch biologischer Reinigungsverfahren auf Kläranlagen,“ BFE, Bern, 2006.
- [7] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., „DWA-Positionen - Positionen zur Energie- und Wasserwirtschaft,“ DWA, Hennef, 2013.
- [8] Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., „WaStraK NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I,“ FiW, Aachen, 2012.

- [9] U. Blum, S. Müller und A. Weiske, *Angewandte Industrieökonomik: Theorien, Modelle, Anwendung*, Wiesbaden: Gabler, 2006.
- [10] T. Smolinka, M. Günther und J. Garcke, „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien,“ NOW-Studie, Berlin, 2011.
- [11] Rolls-Royce Power Systems AG, „MTU onsite energy Aggregate für die Vermarktung von Regelenergie,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.mtuonsiteenergy.com/regelenergie/index.de.html>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [12] BalancePower GmbH, „Erlöse für Ihren Beitrag für die Netzstabilität,“ 2018. [Online]. Available: <http://balancepower.de/regelleistung/articles/regelleistung.html>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [13] Next Kraftwerke, „Was ist Primärregelleistung (PRL)?,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelenergie/primaerreserve-primarregelleistung>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [14] Frankfurter Allgemeine, „Elektrolyseur - Der Strom gibt Gas,“ FAZ, Frankfurt am Main, 2015.
- [15] Greenpeace Energy, „energy. Das Magazin von Greenpeace Energy,“ 21. Oktober 2016. [Online]. Available: <https://blog.greenpeace-energy.de/wissen/windgas/power-to-gas-anlage-bietet-regelenergie-im-lokalen-stromnetz-2/>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [16] Next Kraftwerke, „Next Kraftwerke vernetzt erstmals Power-to-Gas-Anlage im Virtuellen Kraftwerk,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.next-kraftwerke.de/neues/next-kraftwerke-vernetzt-erstmal-power-to-gas-anlage-im-virtuellen-kraftwerk>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [17] ENERGIESPEICHER, „Energiepark Mainz eingeweiht,“ 06. Juli 2015. [Online]. Available: http://forschung-energiespeicher.info/aktuelles/aktuelles-einzelansicht/2/Energiepark_Mainz_eingeweiht/. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [18] REstore, „REstore bringt erste deutsche Chlor-Alkali elektrolyse in die Primärregelleistung,“ 07. Juni 2017. [Online]. Available: <https://restore.energy/de/uber-uns/aktuelles/pressemitteilung/restore-bringt-erste-deutsche-chlor-alkali-elektrolyse-in-die-primarregelleistung>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [19] J. Hofmann, K. Nachtmann und K.-H. Pettinger, „Kläranlagen als Energiespeicher,“ *Wasserwirtschaft Wassertechnik*, pp. 36-40, Dezember 2013.
- [20] ARGE Wasserstoff-Initiative Vorpommern, „Solarer Wasserstoff in Mecklenburg-Vorpommern - Utopie oder Zukunftstechnologie,“ WTI Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern e.V., Barth, 2003.
- [21] HST Hydro-Systemtechnik GmbH, „Reinsauerstoffbelüftung auf kleinen Industriekläranlagen - Energieeinsparpotenziale und Kapazitätssteigerungen am Beispiel der Kläranlage der Fa. Emsland Frischgeflügel GmbH,“ Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU, Meschede, 2012.
- [22] C. Brunner, „Innovative Wasser- u. Abwasseraufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien, 2010.
- [23] L. Perridon, M. Steiner und A. W. Rathgeber, in *Finanzwirtschaft der Unternehmung*, München, Vahlen, 2009, p. 53.