

# wind2hydrogen – Umwandlung von erneuerbarem Strom in Wasserstoff zur Speicherung und zum Transport im Erdgasnetz

Patrick Salman\*, Markus Sartory, Manfred Klell

HyCentA Research GmbH, Inffeldgasse 15, A-8010 Graz, Tel.-Nr. +43 316873 9501, E-Mail: [office@hycenta.at](mailto:office@hycenta.at), [www.hycenta.at](http://www.hycenta.at)

**Kurzfassung:** Das Pilotprojekt wind2hydrogen wurde als eine mögliche Power-to-Gas-Gesamtlösung für Österreich realisiert. Im Projekt erfolgt die Entwicklung eines neuen, modular-verschalteten Hochdruck-Elektrolyseurs (163 bar, Druckerhöhung in späterer Ausbauphase), der Wasserstoff flexibel aus erneuerbarem Strom entsprechend unterschiedlicher Lastprofile erzeugt. Der dezentral produzierte Wasserstoff kann auf Grund des hohen Druckniveaus ohne mechanische Verdichtung in Druckbehälter abgefüllt oder ins Hochdruck-Erdgasverteilernetz eingespeist, dort gespeichert und transportiert werden. Ziel des Projektes ist es, die gesamte Wirkungskette - vom fluktuierenden Windstrom über den Elektrolyseur bis zur Speicherung im Gasnetz bzw. zur Nutzung bei Wasserstoffverbrauchern (Mobilität, chemische Industrie) - zu entwickeln.

**Keywords:** Hochdruckelektrolyse, Wasserstoff, Power-to-Gas, Einspeisung

## 1 Einleitung

Die Produktion von erneuerbarem Strom aus Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen erreicht in Europa zu Spitzenzeiten ein Ausmaß, dass ein Überangebot an elektrischer Energie herrscht und dadurch die Strompreise am Spotmarkt zeitweise sogar negativ werden. Für den geplanten Ausbau regenerativer Energien sind daher effektive Energiespeicher mit adäquaten Kapazitäten eine essentielle Voraussetzung. Eine Möglichkeit, große Mengen an elektrischer Überschussenergie langfristig zu speichern, besteht darin, diese in Wasserstoff umzuwandeln. Wasserstoff ist deshalb ein so attraktiver Energieträger und Treibstoff, da er durch die Möglichkeit der regenerativen Erzeugung einen CO<sub>2</sub>-freien Energiekreislauf erlaubt. Als gasförmiger Energieträger weist Wasserstoff eine Reihe von Ähnlichkeiten mit Erdgas auf und lässt sich mit diesem in jedem Verhältnis mischen. Die Nutzung von Gemischen aus Erdgas und Wasserstoff bietet eine Reihe von Vorteilen bezüglich Infrastruktur, Speicherung und Anwendung und ist weltweit Gegenstand von Forschungsprojekten [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Im Rahmen des in der Programmlinie eMISSION des Klima- und Energiefonds eingereichten Projekts „wind2hydrogen: Umwandlung von erneuerbarem Strom in Wasserstoff zur Speicherung und zum Transport im Erdgasnetz“ wurde eine Pilotanlage für eine Power-to-Gas Gesamtlösung in Österreich realisiert. Der vorliegende Beitrag befasst

---

\* Nachwuchsautor

sich mit der Umsetzung, der Beschreibung und den Zwischenergebnissen dieser Versuchsanlage.

## 2 Konzept

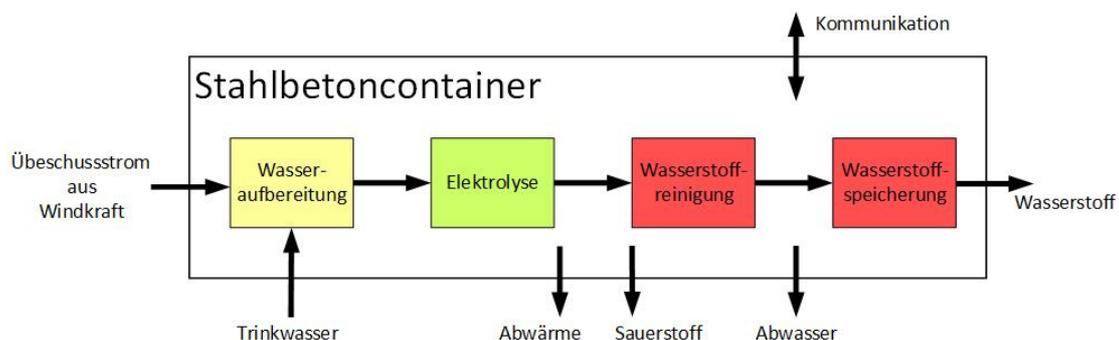
Für die Konzeptionierung der wind2hydrogen-Anlage, insbesondere des Elektrolyseurs, wurden folgende Anforderungen berücksichtigt:

- Elektrolyseur für bis zu 100 kWel Anschlussleistung
- Elektrolyseur als Containerlösung
- Flexibler Betrieb des Elektrolyseurs für minimale und maximale Lastanforderungen
- Optimale Nutzung des fluktuierenden Windstroms
- Wasserstoff ohne zusätzliche mechanische Verdichtung in das Hochdruck-Erdgasnetz einspeisen (60 bar)
- Wasserstoff in Speicher abfüllen (Druckflaschen; 200 bar)
- Produktion von Wasserstoffqualität der Reinheit 5.0, um die Nutzung in der Mobilität bzw. der Industrie zu gewährleisten

Aus den Anforderungen ergibt sich die Lösung, den Elektrolyseur aus mehreren (insgesamt zwölf) Hochdruck-PEM-Elektrolysemodulen aufzubauen, um den stark fluktuierenden Windstrom flexibel und effizient in Wasserstoff umzuwandeln. Diese sollen in einem Stahlbetoncontainer aufgebaut werden. Als Standort wurde die Kompressorstation der OMV Gas&Power GmbH in Auersthal gewählt, damit eine leichte und geographisch kurze Anbindung zum Erdgasnetz gewährleistet wird. Durch die innovative Hochdruckausführung der Elektrolysemodule wird ohne mechanische Verdichtung ein Druckniveau erreicht, das den geforderten Angaben entspricht. Der Reinheitsgrad des Wasserstoffs ergibt sich durch Aufreinigungstechnologien, die in Kapitel 4 und 6 detaillierter beschrieben werden.

## 3 Umsetzung

Abbildung 1 zeigt das Konzept der wind2hydrogen-Anlage und dient zur Verdeutlichung der Schnittstellen zur Anbindung an die vorhandene Infrastruktur der OMV.



**Abbildung 1: Konzept wind2hydrogen (angelehnt an [7])**

### 3.1 Schnittstellen

Im Folgenden sind jene Schnittstellen aufgelistet, die für den Betrieb des Elektrolyseurs notwendig sind.

- Elektrische Anschlussleitung zur Versorgung des Elektrolyseurs mit bis zu 100 kWel aus Windenergie
- Trinkwasserleitung, die das Speisewasser liefert
- Kommunikationsleitung für die Fernsteuerung der Anlage
- Abwassersystem zur Ableitung von Kondensat und Spülwassermengen
- Wasserstoffproduktgasleitung, für die Abgabe des produzierten Energieträgers

Im Zuge dieses Pilotprojektes werden der anfallende Sauerstoff und die Abwärme nicht genutzt, wodurch diese Schnittstellen entfallen.

### 3.2 Elektrolysemodul

Der Elektrolyseur wurde aus zwölf Hochdruck-PEM-Elektrolysemodulen realisiert. Diese Module stellen einen wesentlichen technologischen Fortschritt zu bisherigen Elektrolysetechnologien dar (siehe Abbildung 2). Die PEM (Polymer Elektrolyt Membran)-Technologie wurde aus Gründen der Verträglichkeit bezüglich modulierender Fahrweisen gewählt, da andere Elektrolysetechnologien, wie die alkalische Elektrolyse, für Lastwechsel durch eine fluktuierende Stromquelle weniger geeignet sind. Des Weiteren kann bei geeigneter Bauweise des PEM-Stacks der hohe Druck auf der Wasserstoffproduktgasseite erzeugt werden. Mit der hier umgesetzten Hochdruckelektrolyseanlage konnte ein, im Vergleich zu bestehenden Hochdruckelektrolysetechnologien, deutlicher Innovationsprung umgesetzt werden [8].



**Abbildung 2: PEM-Hochdruckelektrolysemodul mit Netzteil (links) [Quelle: Fronius]; Einbauposition im Elektrolysecontainer (rechts)**

Durch das hohe Druckniveau kann Wasserstoff ohne mechanische Verdichtung in das Erdgasnetz (60 bar) eingespeist werden. Die Module erreichen auf der Wasserstoffproduktgasseite einen Druck von 163 bar. Der für die Speicherung des produzierten Wasserstoffs benötigte Enddruck von 200 bar in Versandbehältern, kann durch einen wesentlich kleineren Wasserstoffkompressor erreicht werden, als bei Anwendungen mit atmosphärischer Elektrolyse. Die Hochdruckelektrolyse bietet einige Vorteile, die wesentlichsten davon sind:

- Investitionsersparnis durch verdichterlose Kompression
- Platzersparnis, da kleinerer oder kein Puffer nötig ist und kleinere Peripherie für die Entfeuchtung des Wasserstoffs (siehe Kapitel 6) [1].

### **3.3 Kühlung**

Bei der Umsetzung der Kühlung des Elektrolyseurs werden zwei Kühlkreisläufe eingesetzt, um einerseits die Elektrolysemodule zu kühlen (Betriebstemperatur 80 °C) und andererseits das feuchte Wasserstoffproduktgas (80 °C) zu kühlen und zu entfeuchten (Kältetrocknung). Diese Art der Wasserstoffreinigung wurde gewählt, um die Wartungsintensität der nachgeschalteten Feintrocknung zu minimieren. Darüber hinaus würde durch die Speicherung des heißen Gases und die anschließende Abkühlung der Druck in den Pufferbehältern sinken.

### **3.4 Gasaufbereitung**

Der produzierte und gereinigte Wasserstoff wird vor Ort in Druckbehälter gespeichert und/oder in das Erdgasnetz eingespeist. Die Speicherung erfolgt über Rohrleitungen zu dafür konzipierten Drucktanks. Für die Einspeisung in das österreichische Erdgasnetz wurden die Forderungen gemäß ÖVGW Richtlinie G31 erfüllt. Diese besagen u.a., dass eine Grenze von 4 % Molanteil für die Wasserstoffkonzentration im Erdgasgemisch einzuhalten ist. Aus diesem Grund muss der erzeugte Wasserstoff in der wind2hydrogen-Anlage vor der Einspeisung ins österreichische Erdgasnetz im geeigneten Verhältnis mit Erdgas gemischt werden.

## **4 Anlage**

Da es sich bei der wind2hydrogen-Anlage um eine Forschungsanlage handelt und neben den Funktionen Produktion, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff zusätzlich entsprechende messtechnische Aufgaben für genauere technische Analysen der Prozesse umzusetzen sind, wurde die Anlage in drei Containern realisiert. In Abbildung 3 ist links der Wartecontainer, in der Mitte der Elektrolysecontainer (Elektrolyseur) und rechts der Gaskonditioniercontainer dargestellt.



Abbildung 3: wind2hydrogen-Anlage [Quelle: OMV]

Die Umsetzung der Anlage erfolgte auf Basis des zu Beginn des Projekts erarbeiteten Lastenhefts.

Das stark vereinfachte Blockschaltbild der Gesamtanlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Entsprechende Workshops mit Gefahren- und Risikoanalysen wurden durchgeführt und darauf aufbauend ein Sicherheitskonzept erarbeitet.

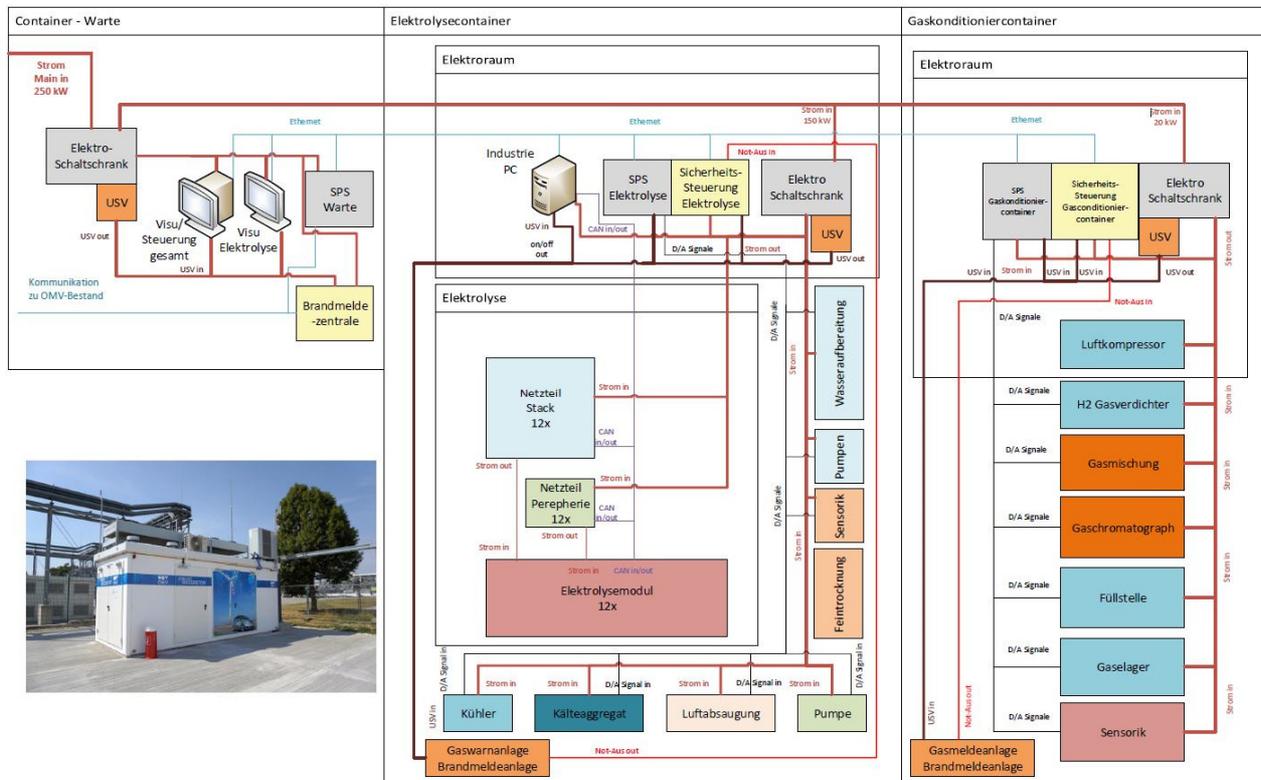


Abbildung 4: Blockschaltbild der wind2hydrogen-Anlage

## 4.1 Warte

Im Wartecontainer befindet sich die zentrale Steuereinheit der Anlage, mit der die Subsysteme und Prozesse wahlweise manuell oder vollautomatisch betrieben werden können (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). In der Warte befindet sich des Weiteren der Schaltschrank mit der elektrischen Anspeisung für die Gesamtanlage und der Leistungsverteilung zum Elektrolysecontainer und zum Gaskonditioniercontainer.

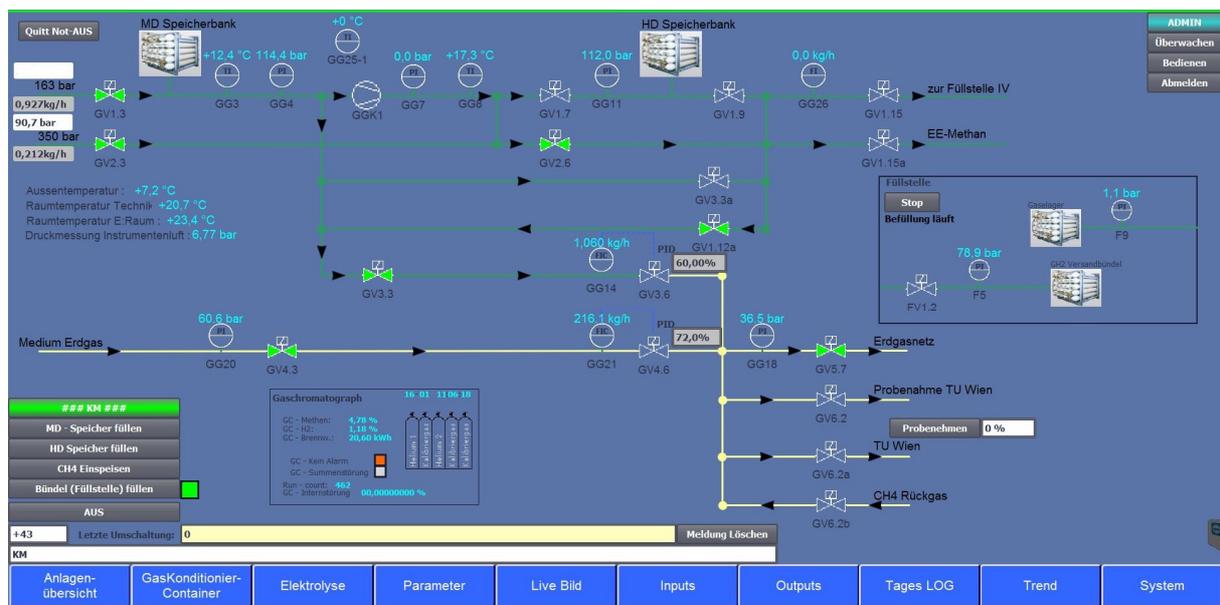


Abbildung 5: Visualisierung der Anlage in der Steuerung

## 4.2 Elektrolysecontainer

Ein Großteil des in Abbildung 1 dargestellten Konzeptes wurde im Elektrolysecontainer realisiert. Dieser beinhaltet die Wasseraufbereitung, die Hochdruckelektrolysemodule, die Wasserstoffproduktgasreinigung und die zugehörige Peripherie. Wasser wird über eine Trinkwasserzuleitung zur Wasseraufbereitungsanlage geführt, die Partikel und Bakterien herausfiltert sowie die Deionisierung durchführt, um die Elektrolysemodule mit der entsprechenden Wasserqualität zu versorgen. Die elektrische Anschlussleistung von 100 kW wird mithilfe von Gleichrichten in Gleichstrom umgewandelt und auf die zwölf Module verteilt. Bei einer Stromstärke von 160 A liefert ein Elektrolysemodul mit einem Ausgangsdruck von 163 bar 0,1 kg Wasserstoff pro Stunde. Bei gleicher Wasserstoffproduktionsrate muss mit zunehmender Lebensdauer der Elektrolysemodule die elektrische Leistung erhöht werden. Die elektrische Anschlussleistung bei Erreichen von End of life ist mit 8,8 kWel festgelegt. Die in den Elektrolysemodulen verbauten PEM-Stacks erreichen bei einer Betriebstemperatur von 80 °C ihren maximalen Wirkungsgrad. Diese Temperatur wird über das Prozesskühlsystem eingestellt. Die Rückkühlung erfolgt über Wasser/Glykol-Luftwärmetauscher am Dach des Elektrolysecontainers. Ein weiterer separater Kühlkreislauf zur Kältetrocknung des Wasserstoffproduktgases wurde realisiert. Dieser ist nötig, da der Produktwasserstoff am Austritt des Stacks die Prozesstemperatur von 80 °C aufweist und

darüber hinaus mit Wasser gesättigt ist, was für die weiteren Prozesse nicht zulässig ist. Durch die Abkühlung auf 3 °C und anschließendes Durchströmen eines Molekularsieves in der Feintrocknung wird der Großteil des Wassers im Wasserstoffproduktgas abgeschieden, wodurch ein Taupunkt von bis zu -70 °C erreicht wird. Erst dadurch wird die Verwendung des erzeugten Wasserstoffes für andere Einsatzzwecke, wie in der Industrie oder Mobilität, ermöglicht. Auf den Zusammenhang zwischen der Reinheit und den Taupunkt des Wasserstoffes wird in Kapitel 6 genauer eingegangen. Der Aufbau des Elektrolyseurs ist in Abbildung 6 ersichtlich.



**Abbildung 6: Elektrolyseur: Durchflusssensoren, Taupunktsensoren, Feintrocknung (links); Elektrolysemodule, Wasseraufbereitung (rechts)**

### 4.3 Gaskonditioniercontainer

Über eine unterirdisch verlegte Gasleitung wird der im Elektrolysecontainer produzierte und gereinigte Wasserstoff in den Gaskonditioniercontainer (GKC) transportiert. In diesem Container erfolgt neben der Speicherung die Mischung, die Einspeisung und die Abfüllung des Wasserstoffes. Der GKC beinhaltet zwei stationäre Speichersysteme. Einen Mitteldruckspeicher (163 bar) für bis zu 7,4 kg und einen Hochdruckspeicher (350 bar) für bis zu 14,2 kg Wasserstoff. Im Außenbereich des GKC befindet sich die Füllstelle, die einen Platz für bis zu sechs Wasserstoff-Versandbündel mit einem Fassungsvermögen von insgesamt bis zu 53 kg Wasserstoff bietet. Diese werden mit einem für die Gasindustrie üblichen Speicherdruck von bis zu 200 bar beaufschlagt. Um die Druckerhöhung von 163 bar auf 200 bar zu erreichen, wurde ein mechanischer Wasserstoffverdichter vorgesehen. Des Weiteren ist der GKC mit geeigneten Armaturen und Regeleinrichtungen ausgestattet, um die unterschiedlichen Verschaltungen für die Weiterverwendung des Wasserstoffproduktgases zu regeln/steuern. Im Gaskonditioniercontainer erfolgt auch die Beimischung des Wasserstoffes zum Erdgas, weswegen die Schnittstelle zum Erdgasnetz an diesem Container angebracht ist. Über die Erdgaszuleitung wird Erdgas bei einem Druck von

maximal 80 bar in den Container geliefert. Mittels Durchflussregler sowie einer Mischstrecke wird Wasserstoff bei vergleichbarem Druckniveau zugefügt und über eine zweite Schnittstelle wieder in das Erdgasnetz zurückgeliefert. Der Durchflussregler sorgt dafür, dass das gewünscht Mischungsverhältnis eingestellt wird. Je nach Betriebsweise des Gaskonditioniercontainers kann mit der Mischanlage ein Erdgas-Wasserstoffgemisch von 0 Mol% Wasserstoff bis hin zu 10 Mol% Wasserstoff eingestellt werden. Für die im Einspeisebetrieb geforderte zusätzliche Kontrolle der 4 Mol%-Grenze sorgt ein Gaschromatograph, der kontinuierlich Proben des eingespeisten Wasserstoff-Erdgasgemisches abgreift. Mit dem Gaschromatographen werden die Anteile an Wasserstoff und Methan gemessen und den Brennwert des Gemisches an die zentrale Steuerung weitergegeben. Der Aufbau des Gaskonditioniercontainers ist in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7: Gaschromatograph und Durchflussmesser (links); Durchflussregler, Mischventil Erdgasleitung (rechts)**

## 5 Versuchsprogramm

Während der zweijährigen Betriebsphase der Pilotanlage sollen verschieden Betriebszustände und Betriebsmodi getestet werden. Damit soll die Eignung der eingesetzten Technologie unter Bedingungen im realen Einsatz mit fluktuierender elektrischer Energie nachgewiesen werden. Folgende Betriebszustände werden untersucht:

- Vollastbetrieb bei 100 kWel
- Teillastbetrieb und Teillastfähigkeit von 3,2 kWel bis 90 kWel
- Sprungantwortverhalten (Kaltstart und Standby)
- Dynamischer Betrieb bei definierten Leistungsangaben mit Schwankungen in beiden Richtungen
- Dynamischer Betrieb bei Kaltstart/Standby bis 100 kWel

Kaltstart wird in den oben beschriebenen Betriebszuständen als jener Start bezeichnet, bei dem die Anlage und die Elektrolysemodule vor dem Einschalten vom Netz getrennt sind und der Stack eine Temperatur von  $< 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufweist. Standby bedeutet, dass bestimmte Peripherie-Systeme in Betrieb sind und dass Speisewasser im Elektrolysemodul zirkuliert.

Bei den Betriebszuständen ist insbesondere der dynamische Betrieb ein wichtiger Bestandteil des Funktionsnachweises, da dieser Betriebsmodi bei direkter Ankopplung des Elektrolyseurs an eine fluktuierende Stromquelle Verwendung finden wird. Des Weiteren soll der Funktionsnachweis erbracht werden, dass die verwendete Elektrolysetechnologie für die Teilnahme am Regelenergiemarkt geeignet ist.

Auf Basis von Aufzeichnungen der letzten Jahre können Windprofile aus der Vergangenheit als Vorgabe für den windgeführten Betrieb verwendet werden. So kann unter realitätsnahen Bedingungen festgestellt werden, wie die Anlage reagiert, wenn sie direkt an einem Windpark angeschlossen wäre. Weitere Untersuchungen konzentrieren sich auf die spezifische Kostenminimierung der Wasserstoffherstellung.

## 6 Zwischenergebnisse

Die wind2hydrogen-Anlage wurde im August 2015 offiziell eröffnet. Die erste Phase des Versuchsprogramms wurde im September 2015 gestartet. Dabei wurde die Anlage zum größten Teil unter Vollast betrieben. Im Zuge dieser ersten Versuchsphase wurden erste Optimierungen an der Hardware und Software vorgenommen. In Tabelle 1 sind die Betriebsstunden sowie die bis dahin produzierte Wasserstoffmenge angegeben. Die Differenz zwischen erzeugten und eingespeisten Wasserstoff ergibt sich durch die Speicherung und die Abfüllung in Tanks sowie durch vereinzelt Testreihen bei denen Wasserstoff in die Umgebungsluft abgeblasen wurde.

**Tabelle 1: Betriebsstunden und Produktion der w2h - Anlage bis Ende 2015**

<b>Laufzeit</b>		
	Betriebsstunden Anlage	861 h
	Betriebsstunden Elektrolysemodule kumuliert	10.330 h
<b>Produktion</b>		
	Wasserstoff	1.433 kg
	Eingespeister Wasserstoff in das Erdgasnetz	1.316 kg

Ein wichtiger Punkt bei der Wasserstoffherstellung ist die Qualität des Energieträgers. Durch die Kältetrocknung und die weitere Entfeuchtung mittels Molekularsiebbehälter erreicht der aufgereinigte Produktwasserstoff bei 163 bar einen Taupunkt von bis zu -70 °C. Das hat zur Folge, dass sich erst bei Temperaturen von -70 °C (oder tiefer) Kondenswasser bildet. Für die Abfüllung in Versandbehälter und für die Verwendung des Wasserstoffes in der Automobilindustrie ist eine Wasserstoffqualität von 5.0 vorgeschrieben. Dies bedeutet, dass der Wasserstoff eine Reinheit von 99,999 Mol% besitzt. 0,001 Mol% sind schlussfolgernd Unreinheiten wie Wasser, Sauerstoff und Stickstoff. Der übliche Wasseranteil von handelsüblichen technischen Wasserstoff 5.0 beträgt dabei maximal 5 ppm (parts per million) [9].

Dadurch folgt, dass bei einem Wasseranteil von 5 ppm und einem Gesamtdruck von 163 bar, der Wasserpartialdruck 0,82 mbar entspricht. Nach [10] ergibt sich daraus ein

Taupunkt von -22,38 °C. Umgekehrt ergibt ein Taupunkt von -70 °C bei 163 bar einen Molanteil von 0,016 ppm. Andere gasförmige Komponenten sind im Produktwasserstoff nicht zu erwarten. Das mit der wind2hydrogen-Anlage produzierte Wasserstoffproduktgas erfüllt hinsichtlich des Wassergehalts somit die Anforderungen für Wasserstoffgas der Reinheit 5.0. Die detaillierte Zusammensetzung des am Standort produzierten Wasserstoffs wird in Untersuchungen im weiteren Projektverlauf ermittelt.

## **7 Zusammenfassung**

Im Projekt wind2hydrogen wurde eine Power-to-Gas Versuchsanlage konzipiert und aufgebaut. Hochdruckwasserstoff kann ohne mechanische Verdichtung mit elektrischer Energie aus fluktuierenden Quellen wie Windkraft produziert, in Hochdruckpuffern gespeichert und in das österreichische Erdgasnetz eingespeist werden.

Die Versuchsanlage wurde in Betrieb genommen und der Funktionsnachweis im Vollastbetrieb wurde erbracht. Erste Optimierungen konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Nächste Schritte sind Untersuchungen zum Teillastbetrieb und dem Verhalten der Anlage bei fluktuierendem Stromangebot.

Der Elektrolyseur wird im weiteren Projektverlauf hinsichtlich Wirkungsgrad und Degradation im Detail evaluiert. Ferner werden Simulationsmodelle für Hochdruckelektrolyse erarbeitet, die mit Messdaten aus dem Realbetrieb validiert werden.

In einer weiteren Ausbaustufe ist eine weitere Druckerhöhung der Hochdruckelektrolysemodule geplant, mit der Wasserstoff ohne mechanische Verdichtung in handelsüblichen Versandbehälter abgefüllt werden kann.

Die Weiterentwicklung der eingesetzten Technologie birgt Erweiterungspotential sowohl im Hinblick auf die Größenordnung der installierten Wasserstoffproduktionskapazität als auch hinsichtlich Effizienz, Fahrweise und Kostenreduktion.

### **Danksagung**

Unser besonderer Dank gilt der Leitung des Projektkonsortiums OMV Gas&Power GmbH sowie den Projektpartnern EVN AG, Fronius International GmbH, HyCentA Research GmbH und dem Energieinstitut an der JKU.

### **Literatur**

- [1] H. Eichelseder und M. Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2012.
- [2] „EU Integrated Project NaturalHy,“ [Online]. Available: <http://www.naturalhy.net>.
- [3] „Althytude,“ [Online]. Available: <http://www.althytude.info>.

- [4] „eden Innovations,“ [Online]. Available: <http://www.edeninnovations.com>.
- [5] M. Klell, H. Eichelseder und M. Sartory, „Mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine - Synergies, potential and regulations,“ *International Journal of Hydrogen Energy* Vol.37, pp. 531-540, 2012.
- [6] M. Klell, H. Eichelseder und M. Sartory, „Variable mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine of a prototype vehicle: regulations, safety and potential,“ *International Journal of Vehicle Design* Vol.54, pp. 137-155, 2010.
- [7] S. Brandstätter, M. Sartory, M. Striednig und M. Klell, „Vorstudie wind2hydrogen: Umwandlung von erneuerbarem Strom in Wasserstoff zur Speicherung und zum Transport im Erdgasnetz,“ HyCentA Research GmbH, Graz, 2014.
- [8] B. Bensmann, „Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies,“ *Electrochimica Acta*, 27 May 2013.
- [9] „Linde-Gase,“ The Linde Group, 2016. [Online]. Available: [http://produkte.linde-gase.de/reingase\\_in\\_druckbehaltern/wasserstoff\\_5.0.html](http://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern/wasserstoff_5.0.html). [Zugriff am 29 Januar 2016].
- [10] D. Baehr und S. Kabelac, Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen, Berlin: Springer, 2006.