



Schlussbericht vom 26. März 2020

Nachhaltiger Wasserstoff aus Wasserkraft für die Mobilität

Ein dezentrales Konzept für einen
etappenweisen Infrastrukturausbau



Quelle: eniwa2016: Wasserstoff-Produktionsanlage am Wasserkraftwerk in Aarau: Links: PEM-Elektrolyseur, Wasseraufbereitung und Verdichtung im hinteren Raum. Rechts: Ansicht der Wasserstoff-Produktionsstätte von aussen mit Wasserstoff-Trailer zur Speicherung und Transport zu den Tankstellen.



Datum: 26. März 2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

H2 Energy AG
Boulevard Lilienthal 42, 8152 Glattpark Zürich
www.h2energy.ch

Eniwa AG
Industriestrasse 25, 5033 Buchs
www.eniwa.ch

Autor/in:

Philipp Dietrich, H2 Energy, philipp.dietrich@h2energy.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501423-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

In Aarau errichtete die H2 Energy AG am Laufwasserkraftwerk der Eniwa AG eine Wasserstoff-Produktionsanlage, die mit einem «Proton Exchange Membrane» (PEM)-Elektrolyseur erneuerbaren Wasserstoff für die Mobilität erzeugt und die Wasserstoff-Tankstelle in Hunzenschwil versorgt. Diese Pilot-Anlage wurde errichtet, um im Verbund mit einer Wasserstoff-Tankstelle der Coop Mineraloel AG und einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-LKW der 35 t-Klasse aufzuzeigen, dass Wasserstoff in einem Wasserkreislauf eine Möglichkeit für CO₂-freien Güterverkehr darstellen kann.

Die Anlage ermöglicht Erkenntnisse im regulären Betrieb einer Produktionsanlage und Verbesserungspotenzial für grössere Anlagen. Die Anlage konnte den Wasserstoff-Bedarf der Tankstelle in Hunzenschwil jederzeit zeitgerecht abdecken. Eine dynamische Lastanpassung am Elektrolyseur kann innert Sekunden realisiert werden. Dadurch sind die betrieblichen Voraussetzungen der PEM-Elektrolyse für einen Einsatz als sekundäre oder tertiäre Regelleistung prinzipiell gegeben. Eine eigentliche Qualifikation für Systemdienstleistungen wurde nicht durchgeführt, da die Anlage für diese Dienstleistung zu klein ist.

Die Produktion und der Betrieb eines dedizierten Trailers erlauben es, die Qualitätsanforderung gemäss des internationalen Standards ISO-14687-2 für die Tankstellenversorgung einzuhalten. Der Bezug des Stromes aus dem Wasserkraftwerk ermöglicht eine rein erneuerbare Erzeugung des Wasserstoffs. Die Methode des Überströmens des produzierten Wasserstoffs in einen Mitteldrucktank von 50 bar Nenndruck führt zu einer begrenzten Transfermasse pro Entladevorgang. In der Regel können nur 60-70% des Volumens an der Tankstelle abgeladen werden. Die Entladezeit beläuft sich auf 45-60 min. Für einen Scale-up bietet die Verwendung von 350 bar-Drucktanks in einem Container mit dem Austausch an der Tankstelle, vergleichbar wie Wechselcontainer, Kostenvorteile.

Bei der Koppelung der Wasserstoff-Produktionsanlage mit dem Kraftwerk wird der Strom physisch aus der lokalen Produktion bezogen. Dadurch entstehen keine Herkunftsnachweise (HKN)-Zertifikate, da diese erst bei der Einspeisung ins Verteil- oder Übertragungsnetz entstehen. Der Nachweis der nachhaltigen Produktion wird dadurch erbracht, dass der Elektrolyseur nicht betrieben wird, wenn das Kraftwerk Strom aus dem Netz beziehen sollte. Dadurch kann auf einen spezifischen Nachweis der Herkunft verzichtet werden.

Die Wasserstoff-Produktionsanlage hat grosses Interesse ausgelöst und wurde während der Projektlaufzeit von mehr als 1000 Personen besichtigt.

Résumé

À Aarau, H2 Energy AG a construit en partenariat avec Eniwa une station de production de l'hydrogène dans la centrale hydroélectrique d'Eniwa AG, qui produit de l'hydrogène renouvelable pour la mobilité avec un électrolyseur PEM et alimente la station-service de l'hydrogène à Hunzenschwil. Cette station pilote a été construite pour démontrer, conjointement avec une station-service H2 de Coop Mineraloel AG et avec un camion à pile à combustible H₂ de la classe 35 to, que l'hydrogène peut être une possibilité pour le transport de marchandises sans CO₂ dans un cycle de l'eau.

L'usine permet de mieux comprendre le fonctionnement normal d'une station de production et les possibilités d'amélioration pour les grandes usines. L'usine a pu à tout moment répondre aux besoins en l'hydrogène de la station-service de Hunzenschwil. La fonction dynamique de l'électrolyseur donne la possibilité de délivrer des services pouvoir équilibrant secondaire et tertiaires en principe. Une qualification spécifique pour ce projet n'est pas réalisée.



La production et l'exploitation d'une remorque dédiée permettent de répondre aux exigences de qualité selon la norme ISO 14687-2 pour la fourniture de la station-service. La fourniture d'électricité à partir de la centrale hydroélectrique permet une production du H₂ purement renouvelable.

Pour une mise à l'échelle, l'utilisation de réservoirs sous pression de 350 bars dans un conteneur offre des avantages en termes de coût.

Le couplage de la production hydrogène à la station de production d'électricité admet l'utilisation d'électricité physiquement de la génératrice pour produire d'hydrogène. La conséquence est qu'il n'y a pas de garantie de provenance car le courant n'entre pas le réseau. La garantie de l'énergie renouvelable est donnée physiquement.

L'usine de production de l'hydrogène a suscité un grand intérêt et a été visitée au cours du projet par plus de 1000 personnes.

Summary

H2 Energy AG realized a hydrogen production plant at the run-off-the river power plant from Eniwa Ltd. The PEM-electrolyzer generates hydrogen for mobility applications based on renewable power. The obtained H₂ is supplied to the hydrogen refueling station in Hunzenschwil. The pilot-production facility is part of an ecosystem in combination with the H₂ refueling station from Coop Mineraloel Ltd and a hydrogen fuel cell truck of the 35 to GCW vehicle class owned by Coop to demonstrate the validity of hydrogen as a fuel in heavy duty transports based on renewable power.

The H₂ generation plant enables experience in regular plant operation and generates learnings for improvement to be applied for larger scale plants. Dynamic load changes can be applied within seconds to the electrolyzer. Therefore, the prerequisites are given for delivering grid support services as secondary or tertiary control power. A qualification to deliver such control power has not been performed, given the small nominal power of the H₂ production plant.

The production plant has always been able to supply the hydrogen demand from the fueling station in Hunzenschwil. The method of gas-transfer to a lower pressure level in a storage tank is not very efficient. About 1/3 of the capacity must be transported back to the H₂ production plant. The transfer process last between 45-60 min. Therefore, the use of containers at 350 bars may be a more productive concept by swapping containers at the HRS.

The quality standard for hydrogen (ISO 14687-2) has been fulfilled over the full project duration by using a dedicated transport trailer in combination with the PEM-electrolyzer.

Cost advantage can be achieved in a scale-up if the logistics will be done by high pressure tanks (350 bar) placed in ship-containers.

For the certification of hydrogen produced based on renewable energy, Guarantees of Origin certificates can't be used in this project. The certificates are created at the entry point of the power to the grid. In our case the electrolyzer is powered directly from the generators. Therefore, we can proof the origin of the renewable energy on physical evidence, as long as the electrolyzer is only operated in case the power plant is producing electricity and is not consuming power out of the grid.

The pilot plant obtained high visibility and interest in the public. The site has welcomed over 1000 visitors during the duration of the project.



Take-home messages

- Die PEM-Elektrolyse ist eine kommerzielle Technologie, die Wasserstoff mit der erforderlichen Qualität (ISO-14687-2) erzeugen kann.
- Bei PEM-Elektrolyse mit Gesamtdruckdifferenzbetrieb kann über eine Taupunktmessung eine einfache und kostengünstige Qualitätskontrolle sichergestellt werden. Andere Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Kohlenwasserstoffe können prinzipbedingt vermieden werden.
- Containerbasierte Systeme können die Komplexität der Errichtung der Anlage vereinfachen und die Realisierung/Inbetriebnahme vor Ort durch Vorprüfungen im Herstellwerk beschleunigen.
- Containerbasierte Logistik von komprimiertem Wasserstoff (bis 350 bar) können höhere Nettomengen an Wasserstoff, kostengünstiger auf die Tankstellen bringen als heutige 200 bar-Trailer.
- Bei massivem Ausbau von PV-Strom können Wasserstoffspeicher und Elektrolysekapazitäten mithelfen, die Stromproduktion, die über den lokalen Verbrauch hinausgeht umzuwandeln und damit zu nutzen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
Bildverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Motivation	10
1.2 Projektziele	11
2 Anlagenbeschrieb	12
2.1 Bauliche Anpassungen.....	12
2.2 Elektrolyse	13
2.2.1 Verdichter	14
2.2.2 Abfüllanlage und Logistik.....	14
3 Vorgehen und Methode	16
4 Ergebnisse und Diskussion	18
4.1 Voll funktionstüchtige Produktionsanlage.....	19
4.2 Verbesserungen an der Anlage.....	21
4.4.1 4.3 Betriebserfahrungen	22
4.4.2 4.4 Verunreinigungen im erzeugten Wasserstoff und Degradation	22
Verunreinigungen	22
Degradation der Elektrolyse	23
4.5 Dynamik der Elektrolyse.....	23
4.9.1 4.6 Effizienz der Logistik.....	25
4.9.2 4.7 Nachweis der nachhaltigen Produktion	25
4.9.3 4.8 Wirtschaftliche Betrachtung	26
4.9 Auswirkungen eines Betriebes von 200 LKW innerhalb des Netzgebietes von Eniwa, eine Modellierung eines Scale-ups	27
Betrieb der Elektrolyse und Tankstellen für 200 LKW im Referenzfall.....	27
Betrieb mit Szenarien mit unterschiedlichem PV-Ausbau	30
Fazit des PV-Ausbaus auf die Wasserstoffproduktion	32
4.10 Interesse in weiten Kreisen ausgelöst.....	32
5 Schlussfolgerungen und Fazit	34



6	Ausblick und zukünftige Umsetzung	36
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	38
7.1	Nationale Zusammenarbeit	38
7.2	Internationale Zusammenarbeit.....	38
8	Publikationen	40
8.1	Presseartikel.....	40
8.2	Artikel.....	40
8.3	Auszeichnungen	40
8.4	Ausstellungen	40
8.5	Literatur.....	40
	Anhang 1: Leitfaden zum Aufbau von Wasserstoff-Produktionsanlagen	41
	Anhang 2: Begleitstudie	42



Abkürzungsverzeichnis

bar	Druckeinheit
CE	Europäische Kennzeichnung zur Einhaltung von Sicherheitsnormen «Conformité Européenne»
CMA	Abkürzung von Coop Mineraloel AG
CO ₂	Kohlendioxid
Eniwa AG	Versorgungsunternehmen in Aarau für Strom, Erdgas, Wasser, Wärme
ESTI	Eidg. Starkstrominspektorat
Ex-Schutz	Schutzmassnahmen zur Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre
gr	Masseneinheit Gramm
Grade 5.0	Reinheitsanforderung eines Gases; entspricht einer Reinheit von 99.999%
h	Zeiteinheit einer Stunde
H ₂	Wasserstoff
IBAarau	Ehemaliger Name von Eniwa
kV	Spannungseinheit in 1000 V
kW	Leistungseinheit in 1000 W
LKW	Lastwagen >3.5 to Gesamtgewicht
Nm ³ /h	Einheit für Gasfluss; Nm ³ ist ein m ³ Gas bei Normbedingungen (1 bar und 15°C)
O ₂	Sauerstoff
PEM	Proton Exchange Membrane
PEM-Elektrolyseur	Wasserstoff-Produktionsanlage die mit Gleichstrom Wasser in H ₂ und O ₂ aufteilt
ISO 14687-2	Richtlinie für die Qualität des H ₂ für mobile Anwendungen
SDL	Abkürzung von System-Dienst-Leistungen als Dienstleistung der Stromerzeuger für Swissgrid zur Stabilisierung des Höchstspannungs-Netzbetriebes
to	Tonne



Bildverzeichnis

Abb. 1: Laufwasserkraftwerke der Eniwa AG an der Aare in Aarau

Abb. 2: Elektrolyseur Proton OnSite Typ C30 mit 30 Nm³/h Wasserstofferzeugung

Abb. 3: Abfüllanlage (links). Rechts sind die Anschlüsse an den Trailer ersichtlich

Abb. 4: Pilot-Wasserstoffsystem, realisiert in Hunzenschwil-Aarau

Abb. 5: Leistungsverlauf bei der Füllung des Trailers (oben) und Druckaufbau im Trailer (unten).

Abb. 6: Sankey-Diagramm der Wasserstoffherstellung der 30 Nm³/h Anlage in Aarau

Abb. 7: Tankvolumen an Wasserstoff an der Tankstelle in Hunzenschwil

Abb. 8: Regelverhalten des Massendurchflussreglers

Abb. 9: H₂-Produktion in Abhängigkeit des geregelten Durchfusses.

Abb. 10: Elektrische Leistung in Abhängigkeit des geregelten Massedurchflusses.

Abb. 11: Verlauf eines Füllstandes der Speicher an den Tankstellen wie auch an der Produktion

Abb. 12: Wasserstoffproduktionsprofil in kg/15 min

Abb. 13: Anteile Stromzusammensetzung im Jahresmittel im Eniwa-Netz in MWh und % im Jahr 2018

Abb. 14: Synthetisiertes Stromprofil Versorgungsgebiet Eniwa für den PV Ausbau von 7.74 %

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Energieverbrauchswerte der Wasserstoff-Produktionsanlage aufgeteilt auf die Hauptsysteme

Tab. 2: Vergleich der emittierten CO₂-Emissionen inkl. Vorkette zwischen Wasserstoff und Benzin

Tab. 3: Übersicht der Eckwerte des Betriebs einer Wasserstoff-LKW-Flotte mit 200 Fahrzeugen

Tab. 4: CO₂-Intensitäten für verschiedene Quellen Stromproduktionsarten in der Schweiz

Tab. 5: Übersicht zu gewählten AKW Ausstiegs- und PV Ausbauszenarien



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

In der Energiestrategie 2050 des Bundesrates stellt die Reduktion der CO₂-Emission des Verkehrssektors ein wichtiger Pfeiler dar. Die CO₂-Reduktion wird in Abstimmung mit der EU durch gemittelte CO₂-Emissionsgrenzwerte der Neuwagenflotten gesteuert. Seit 2015 gilt für Personenwagen der Grenzwert von 130 gr CO₂/km, gemittelt über die verkauften Neuwagen eines Importeurs. Dieser Grenzwert sinkt im Jahr 2021 auf 95 gr CO₂/km. Weitere Absenkpfade in der Gegend von 70 gr CO₂/km sind absehbar.

Für Lieferwagen und schwere Nutzfahrzeuge sind angepasste Absenkpfade in Kraft oder in Diskussion. Diese CO₂-Vorschriften führen zur Einführung neuer Produkte am Markt. Die Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe hat begonnen. Erste Schritte sind Hybridantriebe, die vor allem den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors erhöhen. Mit Plug-in Hybridfahrzeugen kann der rein elektrische Fahranteil gesteigert werden. Rein batterieelektrische Fahrzeuge bieten effiziente Mobilität, verfügen aber über Nutzungsnachteile (Reichweite und Ladezeit), die bei Brennstoffzellenfahrzeuge nicht vorhanden sind.

Sowohl beim Strom wie auch bei der Verwendung von Wasserstoff stellt sich die Herausforderung, dass ein breites Band von Primärenergien genutzt werden kann, um diese Energieträger herzustellen. Damit stellt sich die Frage, welche reale CO₂-Reduktion mit diesen Energieträgern wirklich erzielt werden kann. Die heutige Wasserstoffproduktion basiert zu 96% auf fossilen Kohlenwasserstoffen (Erdgas, flüssige Kohlenwasserstoffe und Kohle) und nur 4% auf Elektrolyse, wobei der Strom nicht zwangsläufig «umweltfreundlich» ist. Ein geringer Anteil H₂ entsteht auch im Zuge der Herstellung anderer Produkte wie z.B. bei der Chlorproduktion als Nebenprodukt.

Ein weiterer Hintergrund des hier beschriebenen Projektes ist eine Initiative von Coop, bis 2023 einen CO₂-neutralen Betrieb zu realisieren. In der Zwischenzeit sind viele Massnahmen umgesetzt. Es zeigt sich aber, dass gerade in der Mobilität dieses Ziel sehr schwierig zu erreichen ist. Coop hat erkannt, dass mit der Einführung von Wasserstoff als Energieträger die CO₂-Emissionen im Transportsektor gesenkt werden können. Coop bietet auch die Chance, die Problematik einer initialen und daher unausgelasteten Tankinfrastruktur und Fahrzeugen, die nirgends eine Tankstelle finden, zu lösen. Einerseits hat die Coop Mineraloel AG ein Tankstellennetz von über 220 Tankstellen in der Schweiz und verfügt somit über Standorte, wo diese neuen Tanksäulen in eine bestehende Infrastruktur eingebettet werden können. Auf der anderen Seite verfügt Coop über eine Lastwagenflotte für die eigene Logistik.

Diese beiden Voraussetzungen können kombiniert werden. Durch die Platzierung der Tankstellen in der Nähe von Logistikzentren, können Lastwagen, die mit Brennstoffzellenantrieben angetrieben werden für eine Grundlast sorgen. Die Lastwagen kehren jeweils am Ende einer Tour wieder zum Verteilzentrum zurück und brauchen daher nur eine Tankstelle für die Versorgung mit Treibstoff (Wasserstoff). Die Auslastung einer Tankstelle kann mit Lastwagen, die betrieblich an einen Fixpunkt gebunden sind, je nach Fahrleistung der Fahrzeuge etwa 30-50 höher ausfallen als mit Personenwagen. Daher stellen diese Fahrzeuge eine zentrale Komponente im Aufbau eines ersten Initialnetzes an Tankstellen dar.

An den Tankstellen können neben den Lastwagen auch Personenwagen betankt werden. Coop ist gewillt einen Teil seiner PW-Flotte auf Wasserstoff umzustellen, um die CO₂-Bilanz ihrer Fahrzeuge zu senken. Die Tankstellen sind natürlich nicht nur für Coop-Fahrzeuge verfügbar, sondern private oder anderer Flottennutzer können an den Tankstellen ebenfalls tanken. Coop Mineraloel AG hatte den Entscheid für den Bau einer ersten Tankstelle in Hunzenschwil im Jahr 2016 getroffen. Diese Tankstelle wurde noch im Jahr 2016 eröffnet. Gleichzeitig waren ein erster Lastwagen und zwölf Personenwagen bis zur Eröffnung betriebsbereit.



Es ist wichtig, bei der Einführung von Wasserstoff in der Mobilität von Beginn auf CO₂-arm erzeugten Wasserstoff («green hydrogen») zu setzen. Ein Ziel dieses Demonstrationsprojektes bestand in der Realisierung eines Konzeptes zur Herstellung von Wasserstoff, der nachweislich auf erneuerbaren Ressourcen basiert und mindestens die Coop-Tankstelle in Hunzenschwil versorgen kann. Der Nachweis der Nachhaltigkeit soll für den Laien verständlich nachvollziehbar sein, so dass die Thematik «Treibhausgasemissionen» für die gesamte Kette von Produktion bis Verbrauch des Treibstoffs transparent und klar erkennbar wird.

In diesem Demonstrationsprojekt wird Wasserstoff aus Strom erzeugt aus Laufwasserkraft hergestellt. Dieser Wasserstoff wird für die Anwendung in der Mobilität konditioniert und für die Belieferung von Tankstellen abgefüllt. Die Wasserstoffqualität wird durch die Norm ISO 14687-2 definiert, die von den Automobilherstellern verlangt wird, so dass Brennstoffzellenfahrzeuge keinen Schaden nehmen. Weiter soll die hier demonstrierte Lösung eine Basis für eine dezentrale Produktion von Wasserstoff sein, welche die Hochskalierung des Aufbaus einer nationalen Verteilinfrastruktur ermöglicht. Die Demonstrationsanlage kann bei Vollauslastung den Treibstoffbedarf von ca. 3 Lastwagen und 10-20 Personenwagen abdecken. Dadurch wird mit diesem Projekt eine Anlage realisiert, die um den Faktor 10 hochskalierbar ist und an weiteren Kraftwerksstandorten repliziert werden kann. Durch den Einbezug verschiedener regionaler Stromhersteller kann damit die Nähe zu den entstehenden Tankstellen gesichert werden und die Robustheit der Versorgung gestärkt werden. Um die nachhaltige Qualität erkennbar zu machen verfolgt das Projekt das Ziel, den Wasserstoff in dieser Qualität zu zertifizieren. Dies kann für das Branding genutzt werden.

1.2 Projektziele

Am Laufwasserkraftwerk Aarau der Eniwa AG, vormals IBAarau, wird ein PEM-Elektrolyseur installiert, um Wasserstoff (H₂) zu produzieren, der die Qualitätsanforderungen für die Verwendung in Brennstoffzellen (Autos, Lastwagen, Bahn und Schiffe) aufweist. Der Wasserstoff wird am Produktionsstandort auf 200 bar komprimiert und in einem Trailer gespeichert. Der Trailer versorgt dann die Tankstelle und andere Verbraucher, die über einen Zwischenspeicher und die notwendige Wasserstoff-Tankinfrastruktur verfügen.

Ziele des Demonstrationsprojektes sind:

- Die Realisierung eines Konzeptes zur Herstellung von Wasserstoff, der nachweislich auf erneuerbaren Ressourcen basiert und mindestens die Coop-Tankstelle in Hunzenschwil mit dem initialen Wasserstoff-Bedarf versorgen kann.
- Der Nachweis der Nachhaltigkeit soll für den Laien verständlich nachvollziehbar sein, so dass die Thematik «Treibhausgas-Ausstoss» für diese Kette transparent und klar erkennbar wird. Eine Kennzeichnung des Wasserstoff ist anzustreben.
- Die Einhaltung der Wasserstoffqualitätsnorm für Strassenfahrzeuge ISO 14687-2 ist gewährleistet.
- Die realisierte Ausführung soll die Basis für eine dezentrale Produktion von Wasserstoff bilden, die die Hochskalierung des Aufbaus für eine nationale Verteilinfrastruktur ermöglicht.
- Die Ergebnisse der Realisierung sind in einem Dokument festzuhalten, dass für den Bewilligungsprozess weiterer Anlagen genutzt werden kann.
- Mit der Anlage soll prinzipiell nachgewiesen werden, dass eine solche Anlage die dynamischen Voraussetzungen erfüllt, dass sie für tertiäre Regelleistung eingesetzt werden könnte, wenn die Anlage über eine höhere Nennleistung verfügen würde.



2 Anlagenbeschreibung

Der Standort der Anlage befindet sich im Gebäude der ehemaligen 50 kV-Schaltanlage des Laufwasserkraftwerk Aarau mit einer Nennleistung von 16.1 MW und einer durchschnittlichen Produktion von 101 GWh/a Strom (Abb. 1). Der Wasserstoff wird mittels einer PEM-Elektrolyse hergestellt. Die Elektrolyse liefert den Wasserstoff bei 30 bar. Das Gas wird über einen Verdichter auf 200 bar komprimiert und in einem mobilen Trailer zwischengespeichert. Diese Anlage lieferte am 26. Oktober 2016 erstmals Wasserstoff, der in den Trailer gespeichert werden konnte und nachher in die Tankstelle Hunzenschwil floss.



Abb. 1: Laufwasserkraftwerke der Eniwa AG an der Aare in Aarau mit 16 MW Nennleistung und durchschnittlicher Stromproduktion von 101 GWh/a.

Die Gesamtanlage der Wasserstoff-Produktion umfasst die baulichen Anpassungen und die Versorgung mit Strom, die Elektrolyse, die Verdichtung sowie die Wasserstoffspeicherung und die -Logistik. Die Betriebsweise sowie die Verbrauchswerte sind in Kap. 4.1 dargestellt. Die Teilsysteme erfüllen die folgenden Funktionen:

2.1 Bauliche Anpassungen

Die ehemalige 50 kV-Schaltanlage des Kraftwerks ist ein Betonbau, dessen struktureller Aufbau durch die funktionalen Anforderungen der Schaltanlage bestimmt war und sich offen über drei Stockwerke erstreckt. Für den Einbau der Wasserstoff-Produktionsanlage wurden

- der Verdichter-Raum durch eine Wand vom Rest des Gebäudes abgetrennt. Zusätzliche Anpassungen von Wänden und Türen erfolgten aufgrund der Abmasse der Wasserstoff - Komponenten. Fensteröffnungen wurden durch die Auflagen des Brandschutzes angepasst. An der Ostseite wurden alle Fensteröffnungen im Bereich des Trailers zugemauert, so dass die Gebäudewand die Funktion einer Schirmmauer für den Trailer übernehmen konnte. Dadurch konnte der Trailer direkt beim Gebäude platziert werden, was zu kurzen Leitungen führt.
- im Gebäude die elektrischen Zuleitungen aus dem Kraftwerk dem Bedarf und dem Spannungsniveau der Anforderungen der Elektrolyse angepasst, eine neue Beleuchtung installiert und das Gebäude mit Funkverbindung und Internetanschluss ausgerüstet. Mit der Netzleitstelle kann über eine Gegensprechanlage kommuniziert werden.
- die Wasserversorgung auf die Bedürfnisse der Elektrolyse (Wasser als Ausgangsstoff der Elektrolyse) sowie des Brandschutzes (Berieselungsanlage des Trailers) angepasst.



- im Aussenbereich die Zufahrt für den Trailer ausgebaut und die Parkfläche betoniert. Zur Gewährleistung der Zugangskontrolle wurde die Aussenanlage mit einem Maschendrahtzaun gesichert.

2.2 Elektrolyse

Der Elektrolyseur ist auf eine Produktion von $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ausgelegt (d.h. 2.7 kg H_2 pro Stunde). Dies entspricht einer reinen Elektrolyseleistung von 174 kW , was einem Wirkungsgrad von 5.8 kWh/Nm^3 oder rund 60% bezogen auf den oberen Heizwert entspricht (Abb. 2). Die detaillierten Verbrauchswerte sind in Kap. 4.1 behandelt.



Abb. 2: Elektrolyseur Proton OnSite Typ C30 mit $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Wasserstoffproduktion

Der PEM-Elektrolyseur von Proton OnSite Typ C30 verfügt über folgende Vorteile:

- Volle Druckdifferenz zwischen Sauerstoff- und Wasserstoff -Seite. Die Sauerstoffseite des Stapels wird bei Umgebungsdruck betrieben. Dadurch kann die Sauerstoff-Konzentration auf der Wasserstoff -Seite, durch den prinzipbedingten niedrigen Partialdruck von O_2 , nicht über dem zulässigen Grenzwert der Norm ISO 14687-2, nämlich 5 ppm liegen.
- Der Betrieb mit hohem Differenzdruck stellt ein Sicherheitsvorteil dar. Im Störfall (z.B. Stromausfall) kann die Herstellung von Wasserstoff sofort unterbrochen werden und es entsteht kein höherer Differenzdruck im Elektrolyseur als im Betriebsfall. Die Notwendigkeit für eine eigene Notstromversorgung entfällt.
- Der Betriebsdruck für Wasserstoff beträgt 30 bar . Dadurch kann das Kompressionsverhältnis auf 200 bar des Verdichters reduziert werden. Als Konsequenz steigt der Gesamtwirkungsgrad und die Betriebskosten für den Verdichter können reduziert werden. Ein zweistufiger Membranverdichter reicht aus.
- Der Elektrolyseur kann im Leistungsbereich von $0-100\%$ Last betrieben werden. Damit kann ein dynamischer Betrieb nach Erfordernissen des Kraftwerks sowie der Wasserstoff-Produktion ermöglicht werden.
- Die hohe Leistungsdichte der Stacks minimiert den Platzbedarf für die gesamte Elektrolyseeinheit.



Neben dem Elektrolyseur befindet sich die Wasseraufbereitung. Sie liefert für die Elektrolyse eine Menge von 30 Liter/h demineralisiertem Wasser, was eine Wasserversorgung von rund 45 Liter/h erfordert.

Als weitere Hilfsanlage wird eine Kühlanlage benötigt. Sie besteht aus einer gemeinsamen geschlossenen Flüssigkeitskühlung für den Elektrolyseur und den Verdichter. Die Wärme wird über eine Kältemaschine abgeführt, die im Freien steht. Die Anschlussleistung der Kühlwasserpumpe und des Gastrockners belaufen sich auf 6.4 kW.

Verdichter

- 2.2.1 Der Verdichter komprimiert den Wasserstoff, vom Ausgangsdruck des Elektrolyseurs von 30 bar auf die nominalen 200 bar, die im Trailer gespeichert werden können. Der Membranverdichter wird mit einem Elektromotor von 11.5 kW angetrieben. Zwischen dem Elektrolyseur und dem Verdichter sowie zwischen dem Verdichter und dem Trailer sind je ein technischer Hochdruckspeicher in Form einer 50 Liter Gasflasche platziert. Dieses Volumen dämpft die Druckschwingungen des Kompressors.

Abfüllanlage und Logistik

- 2.2.2 Der Wasserstoff wird in einem 200 bar-Trailer gespeichert. Die Belieferung der Tankstelle in Hunzenschwil erfolgt über die Strasse. Der Wasserstoff wird durch Überströmen in den Mitteldrucktank der Tankstelle bis max. 50 bar, transferiert. Der entladene Trailer kehrt anschliessend zur Produktionsanlage zurück. Es wird auf einen stationären Zwischenspeicher bei der Produktionsanlage verzichtet, da die Füllzeit des Trailers ca. 80 h beträgt und der Abtransport eine Betriebsunterbrechung von ca. 2-3 h erzeugt.

Die Abfüllanlage stellt die Verbindung zwischen der stationären Produktionsanlage und dem Trailer, als mobilem Logistikelement dar (Abb. 3). Mit einem Kollisionsschutz und einem Abfahrtschutz wird die Sicherheit der Kopplungseinheit und des Trailers gewährleistet. Geeichte Manometer übernehmen die Füllstands-Anzeige des Trailers.



Abb. 3: Abfüllanlage (links) mit dem technischen Hochdruckspeicher in Rot. Rechts sind die Anschlüsse an den Trailer ersichtlich (Gasleitung, Druckluft für die Betätigung des Hauptventils, Datenleitung und ein Erdungskabel)



Für die Logistik wird ein dedizierter Trailer eingesetzt. Dies erlaubt v.a. zwei wichtige Lieferbedingungen zu erfüllen:

- a) Die Gasqualität (ISO 14687-2) kann garantiert werden, da keine andere Gasqualität mit diesem Trailer transportiert wird
- b) Es wird ausschliesslich Wasserstoff in den Trailer gespeichert, der mit erneuerbarer Energie erzeugt wird. Dadurch kann die Lieferkette nachgewiesen werden.



3 Vorgehen und Methode

Die Erstellung der der Anlage wurde entlang der Prozesskette nach Abb. 4 durchgeführt.

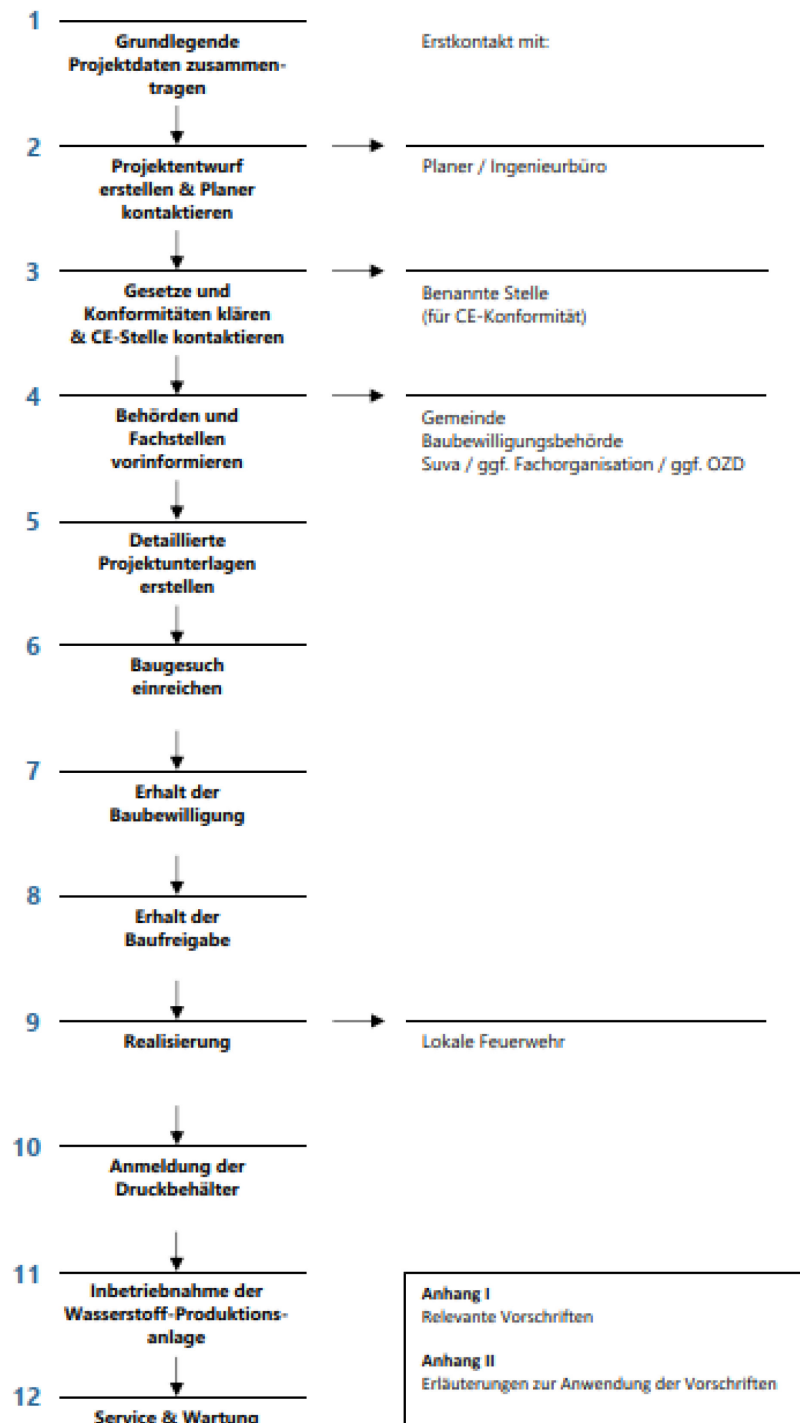


Abb. 4: Phasen der Projektentwicklung zur Realisierung einer Wasserstoff-Produktionsanlage



Die verschiedenen Schritte sind im Genehmigungsleitfaden zusammengefasst. Die Basis bilden die

Grundlegenden Projektdaten

- Standortunterlagen
- Bauzone des Standortes
- Katasterplan und Baupläne bestehender Bauten
- Besichtigung vor Ort zur Verifizierung der Pläne

Rahmenbedingungen für die Anlage

- Grundspezifikationen der Anlage

Der Projektentwurf, der sinnvollerweise mit einem Planer erstellt wird klärt die Punkte

- Grösse und Dimension der Anlagenteile
- Position der Anlagenteile inkl. Gelagerte Wasserstoffmengen
- Logistik für Abtransport des Wasserstoffs
- Elektrische Versorgung / Anschlussleitung
- Schutzmassnahmen
- Welchen Brandschutz gewähren die Anlagenteile und nötige Sicherheitsabstände
- Nutzung der angrenzenden Bauten
- Geplante Sicherheitsmassnahmen wie Ex-Sensorik, Lüftung von Räumen, Berieselungen, Meldekonzept für Alarmer und Störungen etc.
- Einteilung der Ex-Zonen sowie geplante Massnahmen für den Explosionsschutz

Klären der gültigen Gesetze und Konformitäten sowie CE Stelle kontaktieren

Vorinformation von Behörden und Fachstellen

- Baubewilligungsbehörde
- Fachstellen (Suva, Fachorganisationen, Brandschutz, und weitere je nach Kanton und Thema)

Basierend auf den Angaben detaillierte Projektunterlagen erstellen und Baugesuch einreichen

Bei dem Erhalt der Baubewilligung geht es darum sicherzustellen, dass die Auflagen und deren Bedeutung verstanden worden sind

Nach Erfüllung der Auflagen kann die Baufreigabe erhalten werden

Nach der Realisierung sind verschiedene Kontrollen und Abnahmen notwendig

- Kontrollen (Druck- und Dichtigkeitsprüfung, Funktionale Sicherheit, Sicherheit der elektrischen Anlagen durch ESTI, Gasqualität)
- Abnahmen durch die Behörden wie in der Baubewilligung benannt
- Meldepflichtige Druckbehälter müssen bei der Suva angemeldet werden

Während der Inbetriebnahme muss die Schulung erfolgen, so dass anschliessend der normale Betrieb aufgenommen werden kann

Die Anlage muss während der Betriebsphase gemäss der Betriebsanleitung gewartet werden



4 Ergebnisse und Diskussion

Erzielte Hauptergebnisse sind:

- Eine funktionierende Wasserstoff-Produktionsanlage, die die Wasserstoff-Tankstelle Hunzenschwil im Projektzeitraum ausnahmslos ausreichend mit Wasserstoff versorgen konnte. Über die Projektdauer wurden mit 0.968 GWh Strom knapp 12 to Wasserstoff an die Tankstelle geliefert, die etwa 240 to CO₂ Emissionen substituierten. Die Tankstelle wurde im Projektzeitraum mit 54 Fahrten versorgt.
- Sinnvolle Verbesserungen bei Komponenten konnten im Projektzeitraum an der Anlage umgesetzt werden (Verdichter, Kühlung, Kommunikation).
- Sehr gute Zusammenarbeit mit allen Partnern im Betrieb (Eniwa als Stromlieferant und Firstlevel-Support vor Ort, Indermühle als Transporteur und zuständig für die Wartung des Trailers, CMA als Haupt-Abnehmer des Wasserstoffs an der Tankstelle in Hunzenschwil).
- Die Geschwindigkeit des Wasserstofftransports durch die Leitungen zum Trailer variiert in breiten Bereichen und ist zusätzlich den natürlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Dadurch können bei einzelnen Konstellationen hochfrequente Resonanzen auftreten, die im hörbaren Bereich liegen. Eine situative Betriebsführung kann diese Lärmemission stark reduzieren.
- Die gewählte Elektrolyse konnte die Qualitätserwartungen (ISO 14687-2) erfüllen. Dies haben Vollmessungen an Proben ergeben, die über die Laufzeit analysiert worden sind. Die zusätzliche kontinuierliche Erfassung des Taupunktes zeigte, dass die einzige potenzielle Verunreinigung (zu hoher Wassergehalt) durch die installierte Gastrocknung sicher eliminiert werden kann.
- PEM-Elektrolyse ist dynamisch betreibbar. Für einen hochskalierten Einsatz im SDL-Markt muss die Dynamik bei der Verdichtung und die Flexibilität bei der Speichervorhaltung bei der Wasserstoff-Logistik mitbetrachtet werden. In einer praktischen Anwendung muss stets genügend Speicherkapazität bereitstehen.
- Überströmen des Wasserstoffs aus dem Trailer in einem Mitteldrucktank weist eine begrenzte Wirtschaftlichkeit auf, da die transferierbare Gasmenge durch Überströmen begrenzt ist. Es können im realen Betrieb rund 65-70% des Inhalts des Trailers an der Tankstelle in den Speichertank bei nominal 52 bar transferiert werden. Die Überströmzeit beträgt rund 45-60 min.
- Durch die direkte Verbindung der Wasserstoff-Produktionsanlage und der Stromproduktion im Kraftwerk ist der physikalische Strombezug ab Kraftwerk direkt gegeben. Ein Einsatz von HKN ist nicht notwendig und findet nicht statt, da der Strombezug vor der Netzeinspeisung erfolgt. Die Anwendung des in Entwicklung stehenden Herkunftsnachweissystems der EU (Certifhy) war noch nicht möglich, da diese Entwicklung dieses Marktinstrument noch nicht abgeschlossen war.
- Die Anlage hat ein breites Interesse bei Unternehmen, Verbänden, Wissenschaft und Öffentlichkeit erzeugt. Es war für viele eindrücklich, wie relativ einfach die ganze Produktionsanlage aufgebaut sein kann. Das Vorgehen für die Realisierung einer Anlage ist in einem Leitfaden (Anhang 1) festgehalten.
- In einer Begleitstudie wurde untersucht, welche Betriebsweise die Elektrolyse und die erforderliche Speichermenge für einen hochskalierten Betrieb notwendig werden und wie eine erneuerbare Stromerzeugung sinnvoll für die Wasserstoff-Produktion genutzt werden kann.



4.1 Voll funktionstüchtige Produktionsanlage

Die Wasserstoff-Produktionsanlage lieferte im Oktober 2016 das erste Mal Wasserstoff. In den ersten Monaten wurden verschiedene Optimierungen der Anlage durchgeführt. Trotzdem konnte die anfänglich bescheidene Nachfrage nach Wasserstoff an der Tankstelle in Hunzenschwil ohne Ausnahme gedeckt werden. Nach gut 1.5 Jahren konnte ein sehr stabiler Betrieb erzielt werden, der bis heute anhält. Über die Projektdauer wurden mit 0.968 GWh knapp 12 to Wasserstoff an die Tankstelle geliefert, die etwa 240 to CO₂ Emissionen substituierten.

Ein typischer Produktionslauf zum Füllen des Trailers ist in Abb. 5 dargestellt. Die Leistungsspitzen resultieren hauptsächlich aus dem Betrieb der Kälteanlage, die in 2 Stufen von je 16 kW betrieben wird. Deutlich ist die steigende Verdichterleistung erkennbar, die durch den ansteigenden Trailerdruck erforderlich wird.

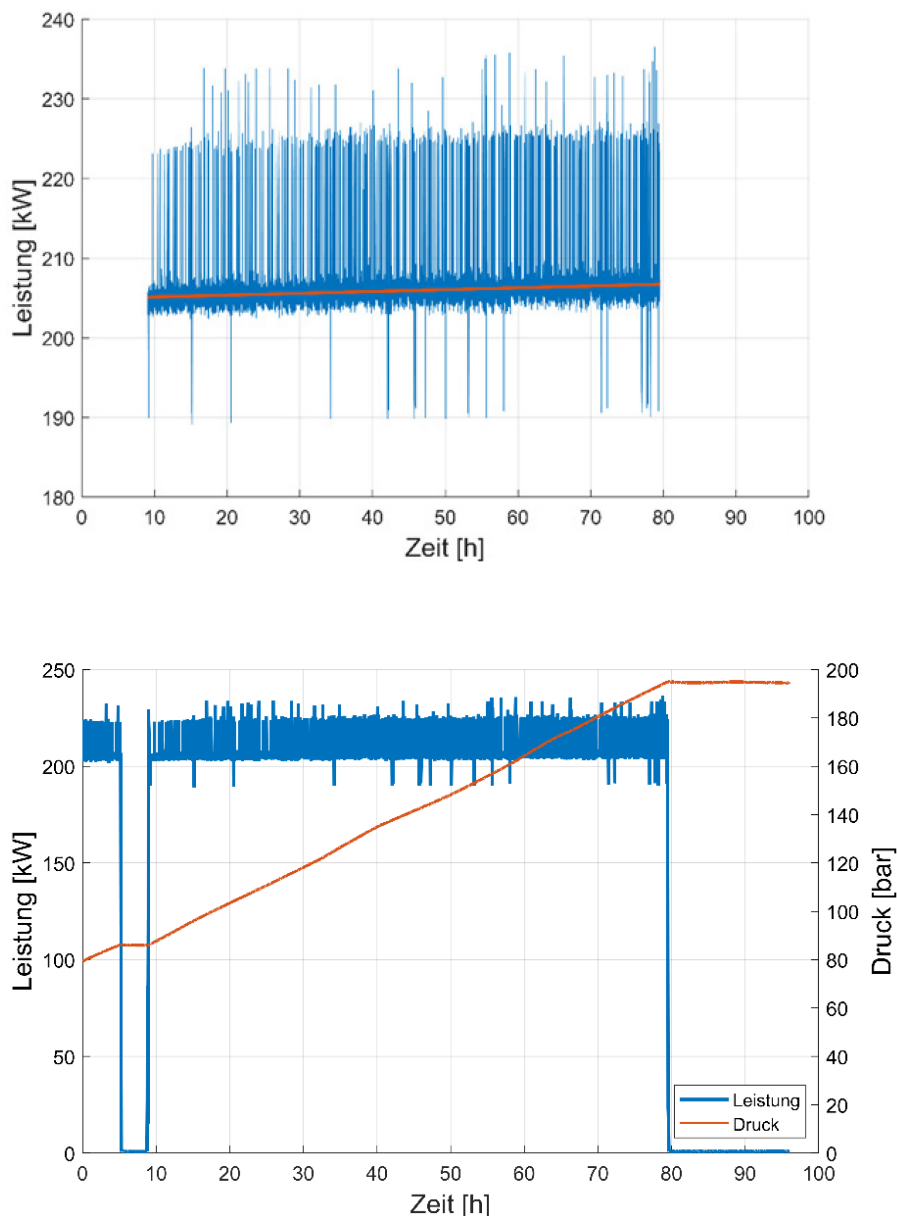


Abb. 5: Leistungsverlauf bei der Füllung des Trailers (oben) und Druckaufbau im Trailer (unten).



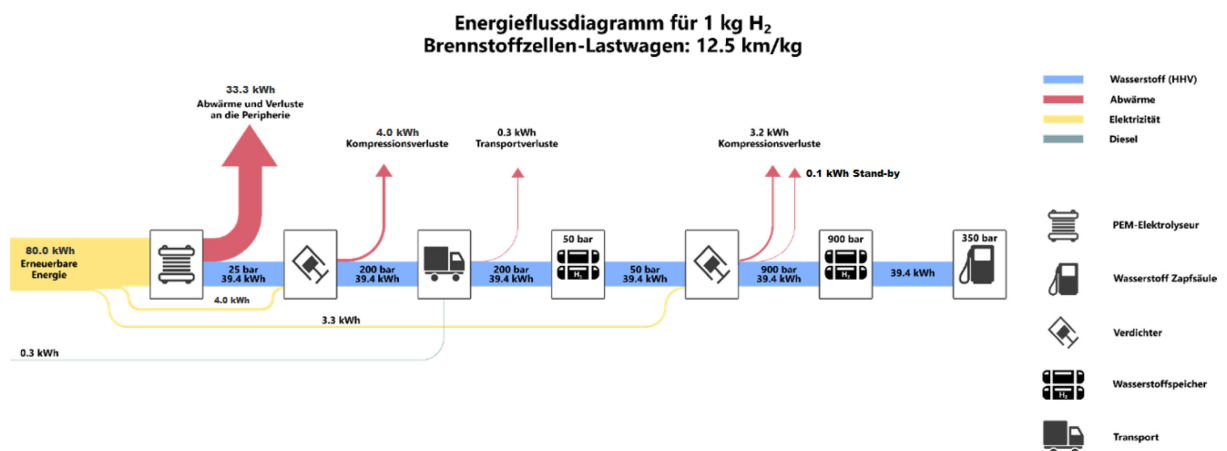
Bei einem Vergleich der Energieverbrauchswerte ist darauf zu achten, dass Systeme mit demselben Leistungsumfang verglichen werden. Der Fokus liegt bei diesem Projekt auf dem Betrieb der realen Gesamtanlage inklusive der Beleuchtung, der Leistung für die Regelung, der Konditionierung des Wasserstoffs sowie der Belüftung. Der Energieverbrauch der Anlage fällt grösstenteils in der Elektrolyse (inkl. Gastrocknung und Kühlmittelpumpe) an (87.2%). Der Verdichter verbraucht 5.2% und wird durch den Ausgangsdruck des Elektrolyseurs von 25-30 bar stark beeinflusst. Der aufgeschlüsselte Verbrauch ist in Tab. 1 ersichtlich.

	Energieverbrauch (kWh/kg)	Anteil Gesamtverbrauch (%)	Durchschnittsleistung (kW)	Energieverbrauch (kWh/Nm ³)
Elektrolyseur	64.6	84.2	174.0	5.806
Trocknung und Kühlpumpe	2.3	3.0	6.2	0.207
Verdichter	4.0	5.2	10.7	0.357
Kältemaschine	5.5	7.2	14.9	0.497
Zusatzgeräte	0.3	0.4	0.9	0.030
Total	76.7	100.0	206.7	6.897

Tab. 1: Energieverbrauchswerte der Wasserstoff-Produktionsanlage aufgeteilt auf die Hauptsysteme.

Der ganze Energieverbrauch der Wasserstoffherzeugung wie auch des Tankports an die Tankstelle ist in einem Sankey-Diagramm in Abb. 6 dargestellt.

Abb. 6: Sankey-Diagramm der Wasserstoffherstellung der 30 Nm³/h Anlage in Aarau und der Tankstelle in Hunzenschwil während der Projektlaufzeit. Die Standbyverluste der Produktionsanlage wurden vernachlässigt.





Die Betriebsweise ohne fixen Zwischenspeicher für den Wasserstoff hat sich bewährt. Durch die Nähe zur Tankstelle waren die Unterbrüche der Produktion zu verkraften und haben die Produktionskapazität nicht entscheidend reduziert.

Für die Bereitstellung von Wasserstoff an der Tankstelle resultiert für die Station Hunzenschwil gemäss [1] eine totale CO₂-Belastung von 0.843 kg CO₂/kg H₂.

Für die Transportleistung mit einem 40 to Fahrzeug (32 Liter Dieserverbrauch/100 km) und einer Distanz von 22 km ergibt sich eine CO₂-Belastung durch den Transport, bei durchschnittlich 223 kg H₂ pro Ablad, von 0.087 kg CO₂/kg H₂. D.h. dass der Transport ca. 10 % der gesamten CO₂-Belastung des Wasserstoffs darstellt. Eine CO₂-Emission im Fahrbetrieb des Fahrzeugs wird vermieden.

Vergleicht man die CO₂-Emissionen im realen Betrieb, resultiert für ein Benzinauto eine Reduktion der CO₂-Emissionen inklusive Vorkette von 96%. Bei LKW ist die Reduktion leicht kleiner, da die Dieselmotoren im Betrieb effizienter als beim Personenwagen sind. Sie beträgt rund 93%.

Um die gleiche Distanz zurückzulegen, wird ein Verbrauchsfaktor zwischen Wasserstoff und Benzin bestimmt (Tab. 2). Dabei wird ein Realverbrauch verglichen, der neben der eigentlichen kinetischen Antriebsenergie auch die durchschnittlichen Verbräuche für Heizung, Klimatisierung und die Nebenverbraucher im Fahrzeug berücksichtigt. Beim PKW entspricht dies 7.73 Liter Benzin im Vergleich zu 1 kg Wasserstoff. Bei LKWs ist dieser Vergleichsfaktor mit 4 Liter Diesel zu 1 kg Wasserstoff deutlich kleiner, da der heutige Dieselmotor im LKW effizienter als im PKW betrieben wird.

	Treibstoff		H ₂		Emissionsreduktion
	Verbrauch (L/100 km)	CO ₂ -Emission (g CO ₂ /km)	Verbrauch (kg H ₂ /100 km)	CO ₂ -Emission (g CO ₂ /km)	%
PKW	7.73 (Benzin)	208.7	1	8.43	-96.0
LKW	32 (Diesel)	931.2	8	67.40	-92.8

Tab. 2: Vergleich der emittierten CO₂-Emissionen inkl. Vorkette zwischen Wasserstoff und Benzin für einen Personenwagen und Diesel für einen Lastwagen.

4.2 Verbesserungen an der Anlage

Der Verdichter wurde mit einer Bypassregelung ergänzt, um eine Entkoppelung zwischen der Schlucklinie des Verdichters und der Produktionskennlinie des Elektrolyseurs zu ermöglichen. Durch die erhöhte Dynamik des Gesamtsystems konnte die Startzeit verkürzt werden und einen eingeregeltten Druckbereich nach Elektrolyse von 26-27 bar erzielt werden.

Eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades wäre mit einer drehzahlgeregelten Antriebseinheit für den Verdichter machbar. Dazu müsste aber der ganze Antrieb sowie die Steuerung weitgehend umgebaut werden.

Durch einen zusätzlich eingebauten Wärmespeicher konnten Temperaturschwankungen aus dem Kühlbedarf von Verdichter und Elektrolyse sowie der diskret arbeitenden Kühlmaschine ausgeglichen werden.

Mit einer Datenerfassung der Anlage über Modbus konnte ein Fernzugriff ermöglicht werden, der die Alarmbehebung und die Datenerfassung deutlich effizienter gemacht hat. Die Steuerung und Regelung wird nach wie vor lokal mit einer SPS durchgeführt.



4.3 Betriebserfahrungen

Im Schnitt wurde 80 Kilogramm Wasserstoff pro Woche in Hunzenschwil betankt. Zwischen den 700 bar und 350 bar Betankungen kann nicht differenziert werden. In Abb. 7 ist der Wasserstoffverbrauch pro Woche für die gesamte Messreihe dargestellt. Über die Projektdauer hinweg wurde etwa die gleiche Menge an Wasserstoff getankt (Abb. 7), mit einem erhöhten Verbrauch ab 2018. Im Durchschnitt wurden alle 20 Tage 223 Kilogramm Wasserstoff mit dem Trailer geliefert.

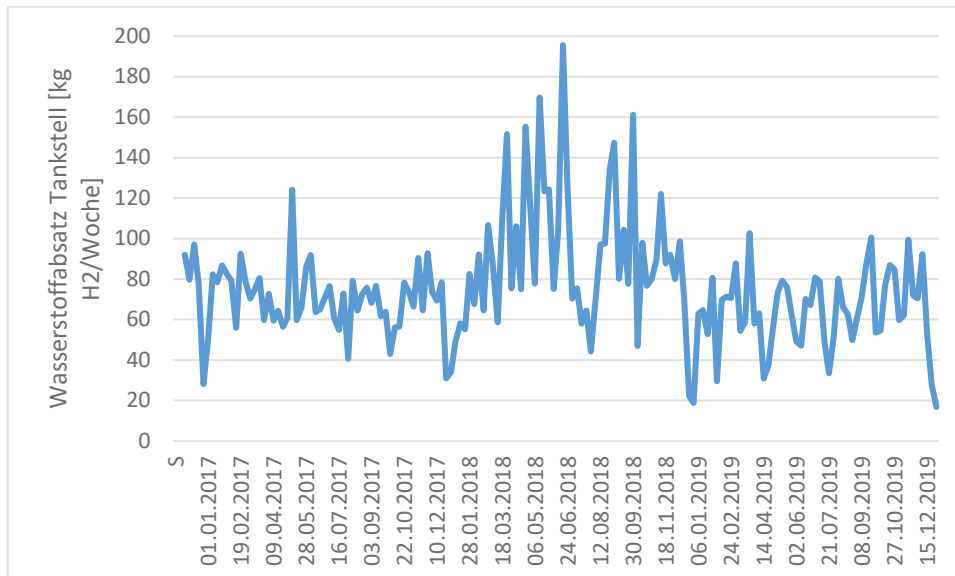


Abb. 7: Tankvolumen an Wasserstoff an der Tankstelle in Hunzenschwil

4.4.1 4.4 Verunreinigungen im erzeugten Wasserstoff und Degradation

Verunreinigungen

Die Qualität des Wasserstoffs kann durch verschiedene Effekte beeinflusst werden. Einerseits können bei der Erzeugung des Wasserstoffs Verunreinigungen ins Gas eingetragen werden. Dies kann z.B. bei gasreformiertem Wasserstoff aus dem verwendeten Erdgas oder Biogas stammen, oder durch den Elektrolyseprozess hervorgerufen werden. Hier stehen die Quellen KOH bei der alkalischen Elektrolyse, Sauerstoff und Wasser sowie Wasserverunreinigung bei allen Elektrolyseverfahren im Zentrum. Durch die Wahl einer PEM Elektrolyseanlage, die im Differenzdruckverfahren betrieben wird, können KOH ganz ausgeschlossen werden und ein Sauerstoffeintrag auf ein erlaubtes Mass reduziert werden. Verunreinigungen durch das Frischwasser können durch eine 3 stufige Wasser-Deionisierungsanlage minimiert und durch eine zwei-stufige Leitfähigkeitsmessung garantiert werden. Den Wassergehalt wird durch eine Gastrocknung auf den Taupunkt von -72°C reduziert. Der Wasseranteil wird über eine Taupunktmessung im Produktgas kontinuierlich gemessen und protokolliert. Somit kann die Funktion der Gastrocknung überprüft werden.

Eine weitere Quelle für Gasverunreinigungen stellen die Transportleitungen sowie der Verdichter und mögliche Restgase im Trailer dar. Die Nutzung eines Membrankompressors und die Verwendung von Swagelok als Verbindungsmethode von Leitungen kann von den Leitungen und dem Verdichter die Wahrscheinlich einer Verunreinigung auf ein kleines Risiko minimiert werden. Durch die Verwendung des Trailers zur ausschliesslichen Verwendung des erzeugten Wasserstoffs kann der Einfluss von Fremdgasen ausgeschlossen werden.



Eine Gasanalyse des Wasserstoffs bei Inbetriebnahme der Wasserstoff-Produktionsanlage ergab die Einhaltung aller Komponenten nach ISO 14687-2. Weitere Messungen im Laufe der Betriebszeit haben die Qualität des Wasserstoffs bestätigt.

Degradation der Elektrolyse

Während den drei Jahren und einer Betriebszeit von rund 5600 h, konnte keine Degradation festgestellt werden. Seit dem Beginn verzeichnen wir eine konstante Nennleistung von 2.73 kg H₂/h bei einer Stapelspannung von 411 V. Die Nennleistung schwankt in einem Band von ± 0.01 kg/h.

4.4.2

4.5 Dynamik der Elektrolyse

Ein Ziel des Projektes lag darin, nachzuweisen, dass die Elektrolyse eine genügend hohe Dynamik aufweist, um Regelenergie für Systemdienstleistungen erbringen zu können.

Mit den dynamischen Messungen wird untersucht, wie schnell das Gesamtsystem auf Laständerungen reagieren kann. Davon kann abgeleitet werden, für welche Systemdienstleistungen innerhalb des Stromnetzes die H₂-Produktion, bestehend aus Elektrolyse und Verdichter, eingesetzt werden kann. Die Anordnung der Komponenten integriert zwischen dem Elektrolyseur und dem Verdichter einen Masseregler von Bronckhorst, der den Wasserstoff-Massenstrom geregelt. Auf der Verdichterseite wird über das Bypassventil ein Teil des verdichteten Gases zurückgeführt, so dass nur der gewünschte Massenstrom in den Trailer gefördert wird (Details sind im Jahresbericht 2017 zu diesem Projekt ersichtlich).

Versuche

Die Dynamik wird in Versuchen mit Lastsprüngen abgebildet. Dem Durchflussregler werden konstante Durchflusswerte vorgegeben, die in Stufen angepasst werden (Abb. 8).

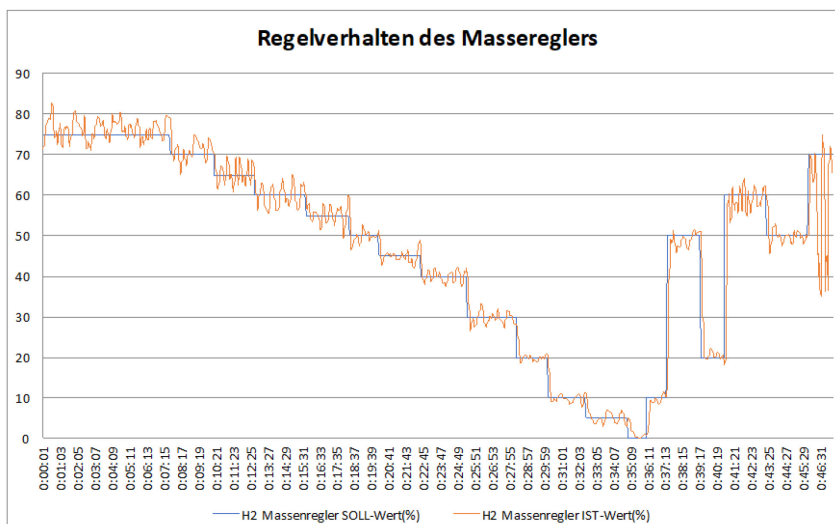


Abb. 8: Regelverhalten des Massendurchflussreglers bei Sprunganpassungen.

Der Massendurchflussregler zeigt als Ergebnis ein Schwingverhalten, das durch den minimalen Druckabfall über dem Regelventil zu erklären ist. Im Bereich unter 50% Durchfluss ist die Regelgenauigkeit genügend. Oberhalb von 65% Öffnung weist der Regler starke Überschwinger auf oder wird instabil (Abb. 9).



Die H₂-Produktion des Elektrolyseurs folgt mit einer Verzögerung (<1 s) dem Druckwert nach dem Elektrolyseur, der einerseits durch den Durchflussregler und der Druckdynamik in der Produktionsleitung beeinflusst wird. Die Messwerte sind in Abb. 9 ersichtlich.

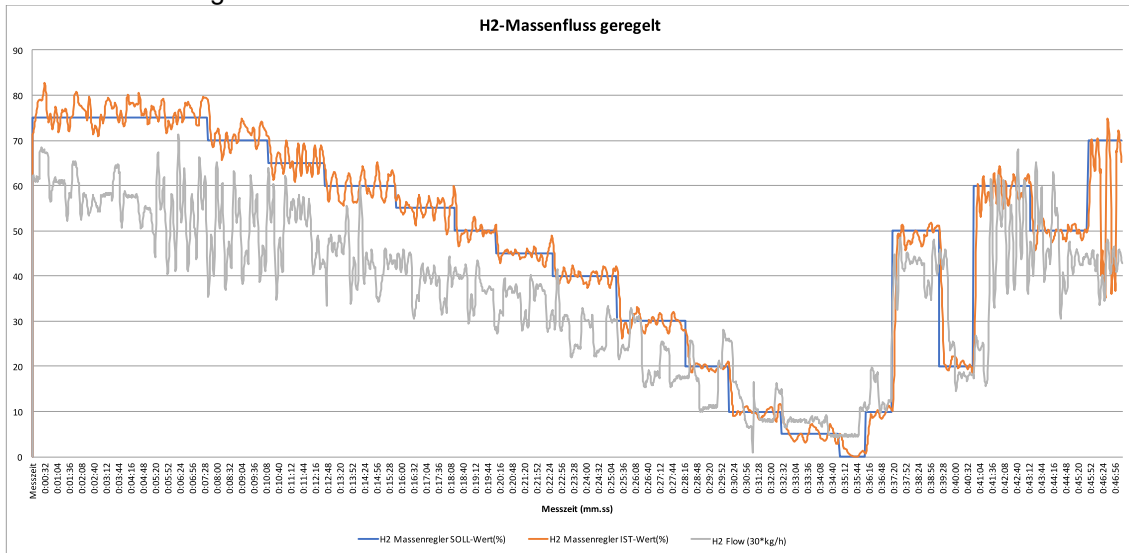


Abb. 9: H₂-Produktion in Abhängigkeit des geregelten Durchflusses.

Bei der Analyse des Stromverbrauchs (Abb. 10) fallen die hohen Ausschläge auf. Diese sind die Konsequenz der Leistungsanpassung des Elektrolyseurs. Im Leerlauf besteht bei dieser Anlage eine Sockelleistung von ca. 21-22 kW. Die Leistung setzt sich aus der Leerlaufleistung des Elektrolyseurs, der Kühlwasserpumpe, des Verdichters und den Hilfsbetrieben (Rückkühler, Lüftung und Steuerung) zusammen. Die Leerlaufleistung gliedert sich in 0.8 kW für den Elektrolyseur, 3 kW für die Kühlwasserpumpe, 15 kW für den Rückkühler und ca. 3kW für den Verdichter auf. Der Rückkühler reagiert träge (10-15 Min) auf Lastsprünge und reduziert sich auf <1 kW, nachdem sich der Kühlkreislauf stabilisiert hat.

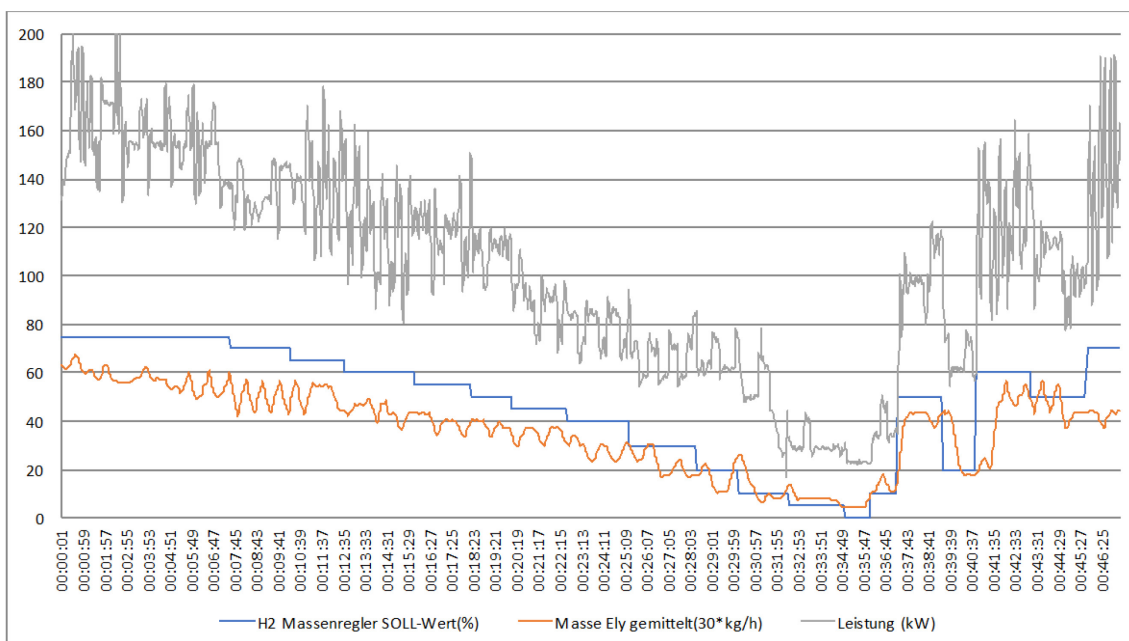


Abb. 10: Elektrische Leistung in Abhängigkeit des geregelten Massedurchflusses.



Bei der H₂-Produktionsanlage in Aarau wäre der Spielraum für eine Leistungsanpassung im Bereich von 0-50% der Nennleistung der Elektrolyse, also eine Reduktion von 85-170 kW machbar. Durch den eingesetzten Masseregler können kleinere Leistungsreduktionen nicht stabil dargestellt werden. Da die Gesamtanlage mit 208 kW Leistung allerdings vergleichsweise klein ist, steht der Teillast-betrieb nicht im Fokus der operativen Fahrweise.

Mit einer direkten Wärmeabgabe an die Umgebung oder an ein Wärmenetz, ohne aktive Rückkühlung kann der Leistungsbedarf für die Hilfsaggregate über 50% reduziert werden.

Mit den Versuchen konnte die angenommene Reaktionsgeschwindigkeit der Prozesskette Elektrolyseur inkl. Verdichter bestätigt werden, so dass prinzipiell ein PEM-Elektrolyseur als tauglich für einen Systemdienstleistungseinsatz als sekundäre Regelleistung bezeichnet werden kann. Im vorliegenden Fall müsste allerdings der Leistungsbereich eingegrenzt werden.

Bei MW- Elektrolyseuranlagen kann die Leistungsregelung durch eine Eingangsleistungsregelung erfolgen. Dadurch kann das Schwingverhalten in den Gasleitungen vermieden und der Leistungsbereich damit ausgedehnt werden.

Beim Betrieb des Elektrolyseurs bei Teillast ist zu berücksichtigen, dass die Membranverdichter heute meist auf den Nennpunkt ausgelegt sind und in einem beschränkten Betriebsbereich optimal betrieben werden können. Für Teillastbetrieb ist vorteilhafterweise ein Verdichter mit variabler Drehzahl, d.h. variablem Schluckvolumen auszuwählen, resp. der Antrieb drehzahlvariabel auszugestalten.

Der Einsatz für Systemdienstleistungen (SDL) zu Gunsten des Stromnetzes muss in der Logistikplanung integriert werden, um die Anforderung an verfügbarem Speichervolumen Rechnung zu tragen.

4.6 Effizienz der Logistik

Der Wasserstoff wird in der Produktionsanlage bis zu 200 bar verdichtet. Im Trailer mit Typ I Zylindern können bis ca. 380 kg Wasserstoff Brutto gespeichert und transportiert werden.

Auf der Tankstelle wird der Wasserstoff in einen Gastank überströmt, der bis 52 bar Nenndruck zugelassen ist. Durch die eingesetzten Sicherheitsorgane kann der Speichertank bis 47 bar gefüllt werden. Der Tank kann im Regelbetrieb bis zu 10 bar entleert werden.

Durch den Überströmprozess fließt der Wasserstoff vom Trailer in den Speichertank. Bei kleiner werdendem Differenzdruck reduziert sich der Massenstrom. Wirtschaftlich führt dies zu einem Restdruck im Trailer von 60-70 bar. Anders ausgerückt ca. 1/3 des Inhalts des Trailers wird wieder an die Produktionsstätte zurücktransportiert. Der Abladeprozess dauert rund 45-60 min. Aus diesem Grund kann dieser Transportart nur befriedigende Transfer-Effizienz attestiert werden. Die Trailerkapazität wird durch die maximale Gewichtslimite einer Aufliegerkomposition von 40 to begrenzt. Die Länge des Aufliegers erzeugt hohe Anforderungen an die Zugänglichkeit bei der Produktion wie auf den Tankstellen. Zur Zeit der Beschaffung im Jahr 2016 war dies allerdings die einzige wirtschaftlich vertretbare Lösung. Höhere Drücke oder andere Materialien waren 2016 noch nicht wirtschaftlich verfügbar.

4.7 Nachweis der nachhaltigen Produktion

Der Herkunftsnachweis (HKN) des Stromes wird bei der Einspeisung ins Stromnetz (Einspeisezähler) bestimmt und davon abgeleitet ein Nachweisdokument erzeugt. Dadurch kann die Herkunft und Zusammensetzung des Stromes im Übertragungs- und Verteilnetz bestimmt und verrechnet werden.



Im hier vorliegenden Projekt stösst dieses Nachweissystem an Grenzen. Die Elektrolyse wird mit Strom ab den stromerzeugenden Generatoren des Kraftwerks, als Eigenverbrauch des Kraftwerks bezogen. Dadurch gelangt diese Energie gar nie zum Zähler, der die HKNs erzeugt. Für diesen Nachweisprozess ist dies ein Nachteil. Andererseits kann physikalisch nachgewiesen werden, dass die Wasserstoff-Erzeugungsanlage keinen Netzstrom bezieht, solange sie nicht in Zeiten betrieben wird, in denen das Kraftwerk vom Netz Strom beziehen würde. Dieser Fall wurde explizit ausgeschlossen, so dass ein rein physikalischer Nachweis stattfindet, ohne HKN-System. Für die Nachweisbarkeit des Wasserstoffs wird im vorliegenden Fall auf den physikalischen Nachweis abgestützt.

In der EU wird ein Zertifikatssystem für CO₂-armen und nachhaltigen Wasserstoff entwickelt www.certify.eu. In einem Pilotprojekt wird dieses Nachweissystem aktuell erprobt.

4.8 Wirtschaftliche Betrachtung

Die Realisierungskosten der Anlage inkl. der Speicherung/Logistikeinheit beliefen sich auf rund 2.0 Mio. CHF. Dabei sind die Kosten der Haupt- Komponentenaufwendungen mit 55% der Gesamtkosten sehr tief. Dies heisst, dass die spezifischen Kosten pro kg produziertem Wasserstoff hoch liegen. Bei grösseren Anlagen liegen diese eher im Bereich von 70-80% der Gesamtkosten.

Die Gestehungskosten des Wasserstoffs in Aarau belaufen sich bei der vollausgelasteten Anlage auf 39% Stromkosten, 37% Abschreibung, 14% Logistik und 11% Betrieb und Unterhalt. Die Kosten innerhalb des Projektes waren durch die tiefe Auslastung schwergewichtiger bei den Fixkosten. Bei einer vollen Auslastung der Produktion in Aarau resultieren Herstellkosten von 10.05 CHF/kg H₂.

Durch die kurze Distanz zwischen Produktion und Tankstelle liegen die Logistikkosten auf einem tiefen spezifischen Niveau.

Für Anlagen im MW-Bereich setzen sich typische Gestehungskosten aus Strom (48%), Logistik (22%), Abschreibung (16%) und Betrieb und Finanzierung (14%) zusammen. Dabei können natürlich je nach Situation Abweichungen von diesen Werten auftreten.

Durch die Grösse der Anlage können einerseits Skaleneffekte bei den Kosten der Hauptkomponenten und den Planungs- und Erstellungskosten erzielt werden, andererseits steigen je nach lokalen Absatzmöglichkeiten die Logistikkosten bei längeren Transportwegen signifikant bei sehr grossen Anlagen. Die Logistikkosten können bei wachsendem Markt durch den Einsatz von leitungsgebundener Verteilung (Pipeline) reduziert werden.

Bei den Kosten für die Elektrolyse-Einheiten ist eine spezifische Kostenreduktion Lernkurve von 13% [2] zu erwarten.

Sehr entscheidend sind aber die Stromkosten, die für die Herstellung zur Verfügung stehen. Die Anlage in Aarau profitiert davon, dass sie keine Netznutzungsabgaben leisten muss, da sie direkt ab Eigenbedarf des Kraftwerk gespiesen wird.

Um 2016 ein vergleichbarer Preis zu einem Referenzbenzinfahrzeug für einen erneuerbaren, emissionsfreien Treibstoff anbieten zu können, wenn man die gleiche Strecke im Realverkehr zugrunde legt, wurde an der Tankstelle ein Verkaufspreis von CHF 10.90/ Kg H₂ angeboten. Dabei beinhaltet der Wasserstoffpreis keine Mineralölsteuer, emittiert aber auch kein CO₂.

Für die erste 2 MW-PEM-Elektrolyseanlage in Niedergösgen werden die spezifischen Komponentenkosten pro Produktionskapazität für die Elektrolyse weniger als 50% der Kosten in Aarau betragen. Dies ist ein Beispiel wie sich die Kosten mit der Grösse der Anlage, sowie mit dem Marktaufbau entwickeln.



4.9 Auswirkungen eines Betriebes von 200 LKW innerhalb des Netzgebietes von Eniwa, eine Modellierung eines Scale-ups

Betrieb der Elektrolyse und Tankstellen für 200 LKW im Referenzfall

4.9.1 Die Hochskalierung der Wasserstoffproduktion für die Versorgung von 200 LKWs wird auf Basis von historischen Daten der Eniwa und Swissgrid (Jahr 2018) modelliert. Es werden historische Produktionskapazitäten mit einem angenommenen Photovoltaikausbau kombiniert, dessen Profile auf Basis von Satellitendaten und Daten des Projektes Sonnendach.ch errechnet werden. Der Photovoltaikausbau wird sowohl für das Versorgungsgebiet der Eniwa als auch für die gesamte Schweiz modelliert.

In einem Szenario wird der Betrieb der Wasserstoffproduktion und der Wasserstofftankstellen beschrieben, welche für eine LKW Flotte von 200 LKW notwendig ist. Dabei sollte davon ausgegangen werden, dass für die 200 LKW in etwa 10 bis 15 Tankstellen eingerichtet und wirtschaftlich betrieben werden können. Entsprechend können auch mehrere Wasserstoffproduktionsstandorte erschlossen werden, um die Speicherung von Wasserstoff möglichst ohne zusätzliche Genehmigungen nach Störfallverordnung realisieren zu müssen. In dieser Untersuchung wird vereinfacht die Summe aller Anlagenleistungen und Speicherkapazität modelliert, um die Komplexität einzelner Standorte und Anlagengrößenverteilungen zu vermeiden. Die Hauptkennwerte sind in Tab. 3 aufgelistet.

Beschreibung	Wert	Einheit
Anzahl Fahrzeuge der H ₂ LKW Flotte	200	
Stündliche mittlere Wasserstoffproduktionsmenge	≈ 230	kg h ⁻¹
Maximal benötigte elektrische Leistung der Elektrolyse für Referenzbetrieb	≈ 13.42	MW
Max. Kapazität des Wasserstoffspeichers pro Standort	5000	kg
Jährlicher Wasserstoffbedarf	≈ 1477	to
Jährlicher Strombedarf für Wasserstofflieferkette	≈ 82.6	GWh _{el}

Tab. 3: Übersicht der angenommenen Eckwerte des Betriebs einer Wasserstoff-LKW-Flotte mit 200 Fahrzeugen

Für die LKW wird eine durchschnittliche Fahrstrecke von 300 km pro Tag und LKW angenommen. Dies ergibt einen täglichen Wasserstoffverbrauch von 4800 kg pro Tag für eine Flotte von 200 LKWs. Es wird weiterhin angenommen, dass die LKW an Samstagen nur 70 % sowie an Sonntagen nur 20 % des Wasserstoffbedarfs im Vergleich zu den Wochentagen haben und dass die LKW an der Tankstelle in drei Zeitfenstern von je zwei Stunden gleichmäßig mit Wasserstoff betankt werden. Die Betankung soll zwischen 7-8, 12-13 und 18-19 Uhr stattfinden.

Es kann mit etwa einer Anlieferung pro Tankstelle und Tag gerechnet werden. Um etwas Spielraum und Notfallreserven an den Tankstellen zu haben, könnten 2 bis 3 Container ausreichen, damit ein reibungsloser Ablauf gewährleistet werden kann. Der Hochdruckspeicher mit 900 bar hat einen maximalen Hub von insgesamt etwa 2.5 t Wasserstoff und ist damit knapp halb so gross auszulegen, wie der Pufferspeicher mit 4 t und 350 bar. Die Verbrauchs- und Tankstellenspeicherprofile sind



unverändert in allen Szenarien. Die Speichergrosse des Speichers am Elektrolysestandort kann variieren. Ein beispielhafter Verlauf ist in Abb. 12 ersichtlich.

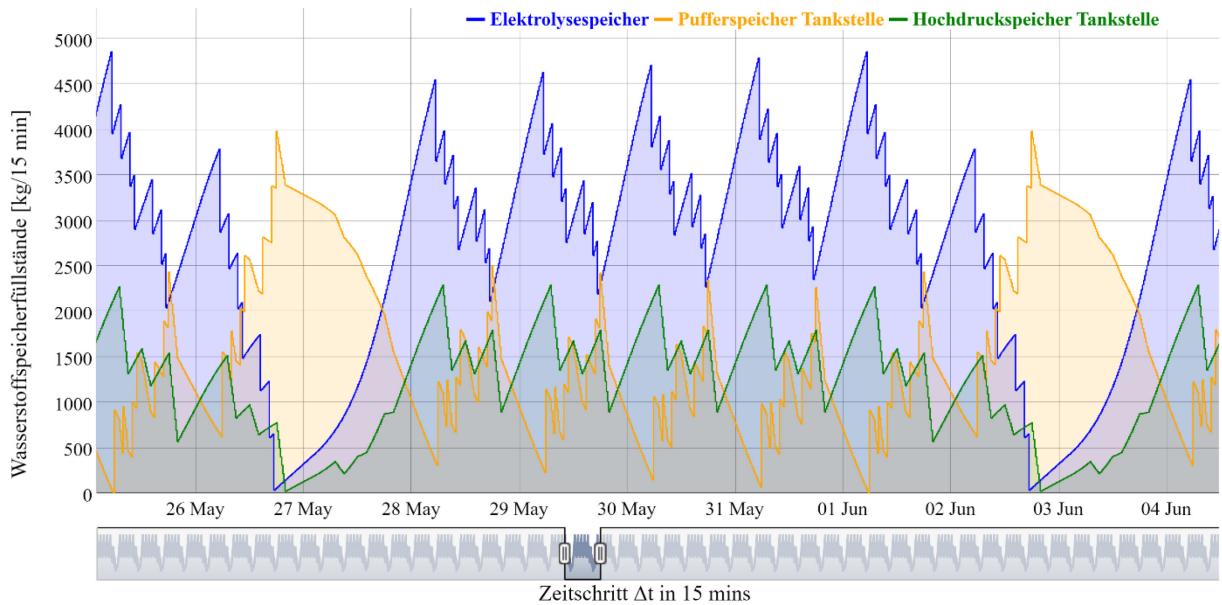


Abb. 11: Verlauf eines Füllstandes der Speicher an den Tankstellen wie auch an den Produktionsstandorten.

Im Referenzfall mit dem heutigen Strommix ergibt sich folgendes Produktionsprofil für die Elektrolyse zur Deckung des Bedarfs für die 200 LKW.

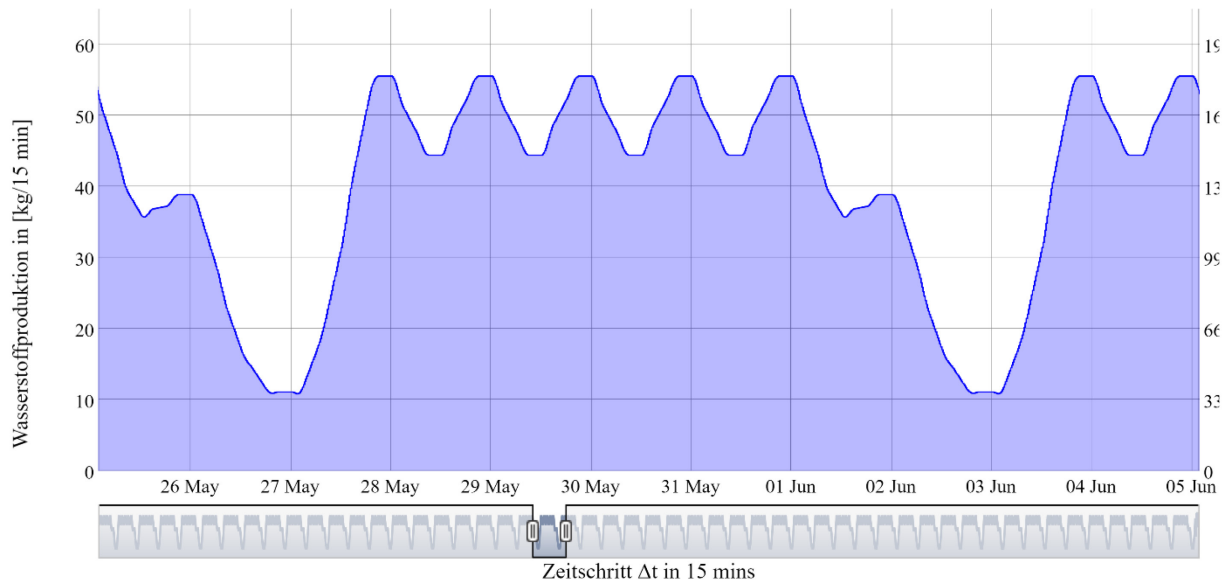


Abb. 12: Wasserstoffproduktionsprofil in kg/15 min

Die Stromzusammensetzung im Gebiet der Eniwa besteht hauptsächlich aus Strom aus der KVA, den Laufwasserkraftwerken und Strombezug aus dem Swissgrid-Netz. Kleine Anteile von Elektrizität aus Blockheizkraftwerken (BHKW) und PV sind im Profil für 2018 ebenfalls enthalten. Die Abb. 14 zeigt die Zusammensetzung der Stromverwendung im Jahresmittel.



Der grösste Teil des Strombedarfs wird aus Importen aus dem Swissgrid-Netz gedeckt (47%), gefolgt von der Laufwasserkraft (33%) und der Kehrlichtverbrennung (17%).

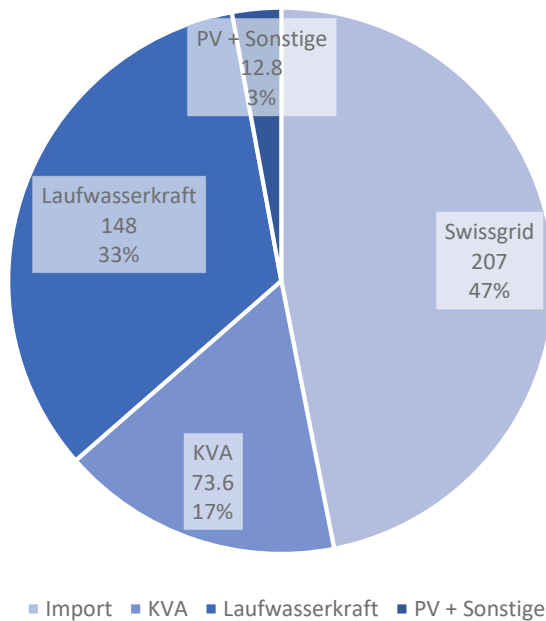


Abb. 13: Anteile Stromzusammensetzung im Jahresmittel im Eniwa-Netz in MWh und % im Jahr 2018

Die CO₂-Intensitäten der unterschiedlichen Stromproduktionsanlagen sind einheitlich für das Eniwa-Versorgungsgebiet und die Swissgrid-Strommengen angenommen. Die verwendeten CO₂-Intensitäten sind in Tab. 4 aufgelistet. Die CO₂-Intensität der importierten Elektrizität aus dem Ausland wird auf 443 g/kWh_{el} festgelegt, da dies einer CO₂-Intensität eines alternativen inländischen Gaskraftwerks entspricht. So können die Szenarien auch für einen allfälligen Zubau eines Gaskraftwerks herangezogen werden.



Typ	CO ₂ -Intensität in g/kWh _{el}
BHKW	0
Laufwasserkraft	4.3
Atomkraft	12
Wasserkraft	13
Photovoltaik	50
Kehrichtverbrennung ¹⁾	50/400
Import / Gaskraftwerk	443

Tab. 4: CO₂-Intensitäten für verschiedene Quellen Stromproduktionsarten in der Schweiz

1) Die CO₂-Intensität des Stroms der Kehrichtverbrennungsanlage wird mit zwei unterschiedlichen Annahmen untersucht. Im ersten Fall wird eine CO₂-Intensität von 50 g/kWh_{el} und im zweiten Fall von 400 g/kWh_{el} angenommen. Diese beiden Werte sollten eine Abschätzung der CO₂-Intensität dieser Stromproduktion erlauben, die sowohl hohe als auch niedrige Werte berücksichtigt, da es verschiedene Ansätze gibt die CO₂-Emissionen auf den Zweck der Anlage zu verteilen. Sollte die Stromproduktion weniger ins Gewicht fallen, so ist eine CO₂-Intensität von 50 g/kWh_{el} realistisch, sollte die Stromproduktion mehr ins Gewicht fallen ist eine CO₂-Intensität von 400 g/kWh_{el} wahrscheinlich angemessen.

4.9.2 Bereits der Referenzfall mit der Berücksichtigung von KVA-Strom mit 400 g/kWh_{el} gibt gegenüber einer mit Diesel betriebenen Flotte eine CO₂-Ersparnis von 49%. Der Referenzfall KVA-Strom mit 50 g/kWh_{el} bewertet, spart knapp 77% der CO₂-Emissionen gegenüber einer mit Diesel betriebenen Flotte.

Betrieb mit Szenarien mit unterschiedlichem PV-Ausbau

Der PV Ausbau der Schweiz wird an drei Ausstiegsszenarien aus der Kernkraft angelehnt. Die jährliche Produktion von Elektrizität aus PV ersetzt 1:1 den Wegfall der Energie aus Kernkraft. Das Ausstiegsszenario sieht vor, das zunächst die Stromproduktion von Mühleberg wegfällt, dann von Beznau 1 und 2, und anschliessend sämtliche Kernkraftwerke ersetzt werden müssen.



Der PV Ausbau im Versorgungsgebiet der Eniwa wird in Abhängigkeit des schweizweiten PV Ausbaus berechnet, und mit +20% Variation simuliert. Der Anteil an möglichen Dachflächen ist in Tab. 5 aufgetragen.

	Szenarien			
	Ref	1	2	3
Mühleberg	am Netz	stillgelegt	stillgelegt	stillgelegt
Beznau 1 & 2	am Netz	am Netz	stillgelegt	stillgelegt
Gösgen & Leibstadt	am Netz	am Netz	am Netz	stillgelegt
Äquiv. PV Ausbau** CH	0 %	6.45 %	18.5 %	54.2 %
Äquiv. PV Ausbau** Eniwa	-20%	5.16 %	14.8 %	43.4 %
	0 %	6.45 %	18.5 %	54.2 %
	+20%	7.74 %	22.2 %	65.0 %

Tab. 5: Übersicht zu gewählten AKW Ausstiegs- und PV Ausbauszenarien in Prozent der geeigneten Dachflächen

Ein Ausbaugrad von 18.5%, welcher in etwa die lokalen Energieüberschüsse erzeugt, welche für die Jahresproduktion von Wasserstoff nötig wären (82.6 GWh_{el}), erzeugt eine Export-Spitzenleistung von 183.7 MW_{el}. Dies bedeutet eine maximale umgekehrte Last der Transformatoren von mehr als der 2-fachen maximalen Last, die im Jahr 2018 benötigt worden ist.

Die Modellierung des PV-Produktionsprofils erfolgt über die ausgewerteten Dachflächen aus dem Projekt sonnendach.ch. Diese werden mit Einstrahlungsdaten basierend auf CAMS radiation service unter Verwendung der pvlib library in Python 3 zu einem PV Profil verrechnet. Dabei werden horizontale Einstrahlungsdaten unter Verwendung der pvlib library auf die entsprechenden Neigungen und Ausrichtungen der Dachflächen umgerechnet und mit einem Solarmodul-Wirkungsgrad von 23 % und einem Wirkungsgrad des Inverters von 98 % ins resultierende PV-Produktionsprofil umgerechnet.

Das Stromproduktionsprofil im Versorgungsgebiet der Eniwa wird den Szenarien entsprechend von zum Referenzprofil mit der jeweils modellierten PV Produktionsmenge addiert. Ein Beispiel des synthetisierten Profils für den Ausbau von 7.74 % der geeigneten Dachflächen wird in Abb. 14 dargestellt.

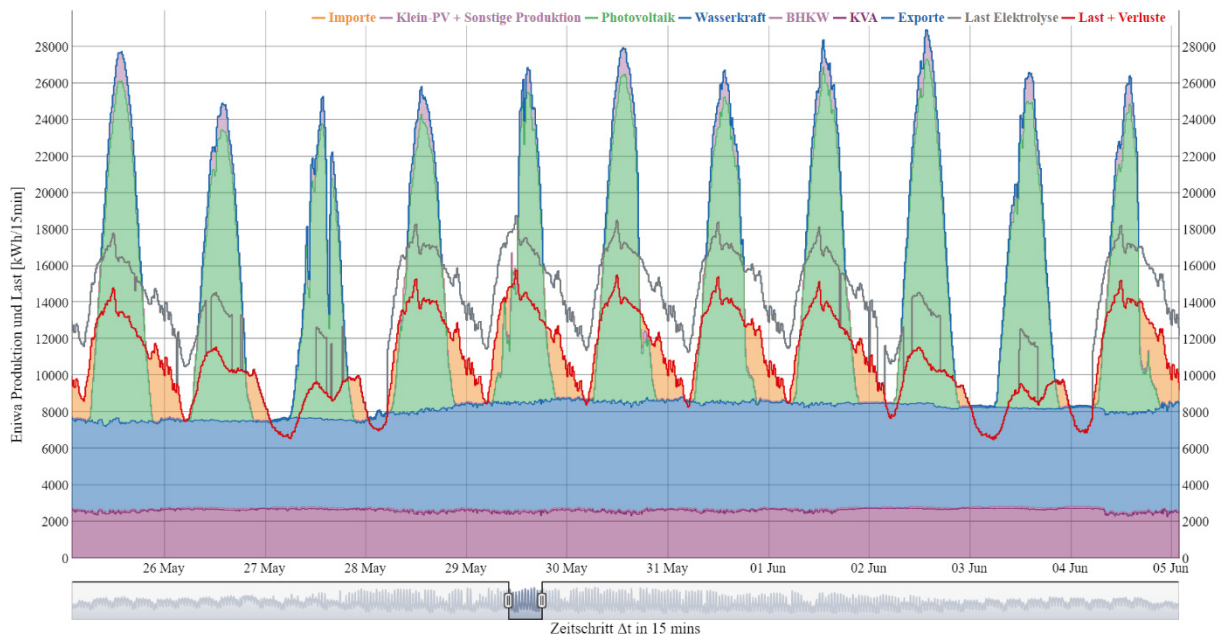


Abb. 14: Synthetisiertes Stromprofil Versorgungsgebiet Eniwa für den PV Ausbau von 7.74 % entsprechend 82.58 GWh_{el} aus Photovoltaik inklusive der Last der Elektrolyse (grau).

4.9.3 Fazit des PV-Ausbaus auf die Wasserstoffproduktion

Eine sinnvolle Grössenordnung der Wasserstoffproduktion scheint in etwa mit einer Elektrolyseleistung von 2 - 4 mal der Leistung zu sein, die benötigt wird um bei 8760 Stunden Volllast den Jahresbedarf an Wasserstoff zu decken (9.5 MW zu 20-36 MW).

Ausserdem scheint eine Speichergrösse von knapp 5% des Jahresbedarfs an Wasserstoff genügend Flexibilität bereitzustellen, um ausreichend Stunden mit geringer CO₂Intensität im Strommix ausnutzen zu können.

Mit dem Ausstieg aus der Kernkraft und dem Zubau von Photovoltaik wird diese Flexibilität umso wichtiger je höher der PV-Anteil ist. Auch werden grössere Elektrolyseleistungen sinnvoll (36 bis 64 MW) sobald sehr hohe PV-Ausbauszenarien eine Rolle spielen.

Die lokale Belastung des Stromnetzes steigt stark mit zunehmendem Zubau von Photovoltaik an.

Die Wasserstoffproduktion kann den Ausbau von PV und dessen Effekt auf den Betrieb des Netzes reduzieren, wenn lokaler Strom vorzugsweise genutzt wird und weniger auf die LCA CO₂-Emissionen der PV Produktion geachtet wird. Andernfalls wird vor allem Elektrizität aus Wasserkraft bevorzugt genutzt. Dies hat zwei Gründe. Es bedarf einer geringeren maximal installierten Elektrolyseleistung und es werden geringere CO₂-Emissionen berechnet, da die Wasserkraft geringere LCA Werte aufweist als die Photovoltaik.

Dennoch können CO₂-Reduktionen von stets mehr als von 70 bis 90% gegenüber einer mit Diesel betriebenen LKW Flotte als sehr realistisch gesehen werden.

4.10 Interesse in weiten Kreisen ausgelöst

Nach der Inbetriebnahme der Anlage hat das Projekt eine anhaltend hohe Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit erzielt. In den letzten 3 Jahren haben über 100 Gruppen die Anlage besucht. Die Bandbreite der Interessenten ist sehr gross. Dieses Interesse umfasst die Politik (nationale Exponenten der FDP und SVP; Energiekommission eines kantonalen Parlamentes, etc.), Verbände (Avenergy, Logistiker, Hydrogen Europe, H2 Mobility Deutschland etc.), Firmenvertreter (OEM wie Daimler, BMW, VW, Axpo, Linde, Engie, Hydro-Quebec, CMA, AGROLA etc.) aber auch die interessierte Öffentlichkeit



(STV schweiz. technischer Verein, Schüler die Arbeiten verfassen, Rotarier etc.). Das Interesse ist kontinuierlich geblieben und hat sich im letzten Jahr eher noch verstärkt.

Die Nähe der Wasserstoff-Produktion in Kombination mit der Stromerzeugung von Eniwa und der Wasserstoff-Tankstelle in Hunzenschwil ermöglichen die Besichtigung des ganzen Wasserstoff-Kreislaufes. Dies eröffnet die Möglichkeit vielen Personen den Kreislauf nicht nur verbal, sondern mit realen Bildern vermitteln zu können.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Der Betrieb der Anlage hat sehr wertvolle Erkenntnisse für den nun folgenden Scale-up der Anlagen gebracht. Dies erlaubt es kritische Punkte zu verbessern.

- PEM-Elektrolyse: Der verwendete Elektrolyseur stellt ein ausgereiftes Produkt dar. Die Funktionsweise des verwendeten Elektrolyseurs gewährleistet eine hohe Zuverlässigkeit und die Anlage kann in kurzer Zeit in Betrieb genommen werden. Durch den Betrieb im Differenzdruck-Modus mit 30 bar Druckunterschied zwischen der Wasserstoff- und Sauerstoff-Seite konnten für alle Gaskomponenten ausser dem Wassergehalt prinzipbedingt sehr tiefe Verunreinigungswerte des Wasserstoffs erreicht werden. Zur Erreichung der geforderten ISO 14687-2 Qualität war nur die Anwendung einer Gastrocknung auf einen Taupunkt von -72°C erforderlich. Die Funktionsweise kann mit einem handelsüblichen Taupunktmessgerät permanent überwacht werden. Damit kann eine kostengünstige Qualitätskontrolle des Wasserstoffs sichergestellt werden.
- Die Kontrolle über die verwendeten Speichertanks ist ebenfalls wichtig, so dass eine Einschleppung von Verunreinigungen über andere transportierte Gasqualitäten ausgeschlossen werden kann.

Fazit: Der Einsatz von technischen Lösungen (hier PEM Elektrolyse) in Kombination mit einer dedizierten Transportbehälterflotte, die vom Prinzip her verschiedene Verunreinigungen ausschliessen lässt, vereinfacht die Qualitätskontrolle und hilft Kosten zu senken. Eine periodische Überprüfung der Qualität (z.B. alle zwei Jahre) über das ganze Spektrum von potenziellen Verunreinigungen sichert die hohe Qualität des gelieferten Wasserstoffs ab.

- Eine Trailerbelieferung mit 200 bar und Überströmen in Mitteldrucktanks ist eine bewährte und funktionierende Methode. Die «Dump Size» ist allerdings begrenzt. Die Erkenntnis daraus führt zu einem Konzept, bei dem nicht überströmt wird, sondern Speichereinheiten ausgetauscht werden.

Zusammen mit der stattgefundenen Materialentwicklung zeigt sich heute die Anpassung der Transporteinheit auf 350 bar Nenndruck und Speichergrösse eines 6 m ISO-Containers als wirtschaftlichste Transportlösung für die Belieferung von Wasserstoff-Tankstellen in der Schweiz.

Dieses Konzept ermöglicht es, die Speicherkapazität bei den Wasserstoff-Produktionsanlagen, den Betriebsbedürfnissen modular anzupassen. Weiter kann eine Speicherfunktion zwischen Produktion und Verbrauch an den Tankstellen aufgebaut werden.

Fazit: Für die Belieferung von Wasserstoff-Tankstellen wird eine Versorgungseinheit in Form eines ISO-Containers mit 20 ft. Länge und bei 350 bar Nenndruck umgesetzt. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass das Belieferungsfahrzeug mit einem Gesamtgewicht <40 to auskommen wird, was eine Reduktion bei den Transportkosten ermöglicht. An der Tankstelle wird ein Konzept eines Wechselcontainersystems mit 2 Stellplätzen vorgeschlagen.

- Bei der Realisierung der Wasserstoff-Produktionsanlage liegt ein grosser Aufwand bei der Definition und Umsetzung der Schnittstellen zwischen den Teilsystemen. Falls es die örtlichen Gegebenheiten erlauben, kann durch die Verwendung von vorgefertigten Teilsystemen die Installationszeit verkürzt und die Qualität verbessert werden, da die Teilsysteme an den Herstellungsorten schon vorgetestet werden können.

Fazit: Nach Möglichkeit sollten zukünftige Einheiten im MW-Bereich als Container-Aufbauten realisiert werden, die vor der Anlieferung bereits funktional getestet worden sind. Dadurch kann die Komplexität auf der Baustelle reduziert und die Inbetriebsetzungszeit verkürzt werden.



- Der Einsatz der Wasserstoff-Produktionsanlage ist prinzipiell für den Einsatz von SDL geeignet. Trotzdem muss für den konkreten Einsatz die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit abgeklärt werden, da die Anbindung der Anlage an die erforderliche externe Steuerbarkeit und Verfügbarkeit von Speicherkapazität Investitionen erfordert und zumindest bei Teillastbetrieb Anpassungen beim Verdichter erfordert.

Fazit: SDL Dienstleistungen sind möglich, erfordern aber Anpassungen beim Verdichter oder Aufteilung der Gesamtleistung in kleinere Betriebsblöcke und beim verfügbaren Speichervolumen an der Produktionsanlage.

- Die Simulationen der Begleitstudie haben gezeigt, dass für einen Betrieb zur Reduktion der CO₂ Emissionen oder die Nutzung der anfallenden, lokal nicht nutzbaren, Spitzenleistungen optimierte Betriebsstrategien erforderlich sind. Mit einem Wasserstoffspeicher von ca. 5% der Produktionsmenge können die Überschussanteile weitgehend absorbiert werden. Eine CO₂ Absenkung von 70% bis >90% ist gegenüber Diesel-LKWs ist gemäss den Simulationen möglich.
- Das Interesse von verschiedenen Seiten an der Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff ist gross. Dem Informationsbedürfnis der Gesellschaft sollte im Rahmen der weiteren Anlagen Rechnung getragen werden.

Fazit: Dem Interesse an Information über neue Anlagen sollte Rechnung getragen werden. Dies kann durch Informationsmaterial auf verschiedenen Kanälen erfolgen. Je nach Gegebenheiten bietet sich auch die Möglichkeit an, Personengruppen im Rahmen von Führungen die Anlage zugänglich zu machen.

Der Aufbau und der Betrieb der Wasserstoff-Produktionsanlage in Aarau hat gezeigt, dass die gewählte PEM-Elektrolysetechnologie den Anforderungen für die Wasserstoff Erzeugung für die Mobilität gerecht wird. Der Betrieb der Anlage hat auch gezeigt, dass für eine hochskalierte Nutzung der Technologie beim Aufbau wie im Betrieb Massnahmen zu wirtschaftlich besseren Lösungen führen können und müssen. Der erarbeitete Leitfaden kann als Hilfestellung bei der Realisierung künftiger Anlagen dienen. Aus diesem Grunde können die Erfahrungen, die durch dieses Projekt realisiert werden konnten als sehr wertvoll betrachtet werden und das Projekt als erfolgreich eingestuft werden.

Der Informationsbedarf verschiedenster Gruppen zur Thematik Wasserstoff ist nach wie vor sehr hoch. Der Kommunikation muss weiterhin grosse Bedeutung beigemessen werden. Wir können uns sehr gut vorstellen, dass Betreiber weiterer Anlagen in Zusammenarbeit auch mit dem BfE verschiedene Angebot erarbeiten könnten.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Produktionsanlage in Aarau stellt eines von drei wichtigen Teilsystemen dar, die es braucht, um einen Wasserstoff-Kreislauf, basierend auf erneuerbaren Energien umzusetzen. Die Komponenten sind in Abb. 16 aufgeführt.

Pilot-Wasserstoffsystem in der Schweiz Kundenbeispiel: Status 2019



Pilotsystem ermöglicht Lerneffekte

Wasserstoff-Fahrzeuge

1 LKW mit 35 t Gesamtgewicht
12 Hyundai von Coop
Ca. 40 BZ-PKW in der CH



Laufwasserkraftwerk

Stromversorgung von eniwa
Ohne Netzeinspeisung



Coop Wasserstoff-Tankstelle

bietet H₂ für 10.90 CHF/kg
Gewohnte Kreditkarten
350 bar/700 bar
PKW getankt in 3-5 min
LKW getankt in 10 min



H₂ Produktion von H₂ Energy
Qualität gemäss SAE J2719
Produktion nach Bedarf
Kapazität 65.5 kg/d@200 bar



Wasserstoff-Logistik von H₂ Energy speichert und liefert H₂
100% gewährleisteteste Versorgung der Tankstelle in Hunzenschwil

Abb. 16: Pilot-Wasserstoffsystem, realisiert in Hunzenschwil und Aarau

Für einen Scale-up braucht es für die Produktion und die Logistik des Wasserstoffs, die Tankstelleninfrastruktur sowie für die Abnehmer des Wasserstoffs (LKWs oder andere Nutzer) einen orchestrierten Aufbau.

Um die Voraussetzungen für die Logistikbranche zu schaffen, dass sie auf eine emissionsfreie Technologie umsteigen können, die auf erneuerbaren Energien basiert, wurden in der Zwischenzeit folgende Schritte eingeleitet (Abb. 17):

Mit «Hyundai Hydrogen Mobility», ein JV zwischen Hyundai Motors Company und H₂ Energy, werden bis 2023 1000 LKWs in die Schweiz importiert und betrieben werden. Die ersten Fahrzeuge werden 2020 in der Schweiz auf die Strasse kommen.

In 2018 hat sich der Förderverein Wasserstoff Mobilität Schweiz gegründet. Das Ziel der Mitglieder dieses Vereins ist es, in der Schweiz bis 2023 ein privatwirtschaftlich finanziertes flächendeckendes Tankstellennetz aufzubauen, das mit Wasserstoff aus erneuerbarer Energie versorgt wird.

Die Wasserstoff-Produktion und -Beschaffung sowie die Logistik an die Tankstellen wird von der Hydrosper AG durchgeführt. Die Zusammenarbeit der Partner ist unten aufgezeigt.



Wichtigste Akteure, welche für die LKW Betreiber die Voraussetzungen schaffen

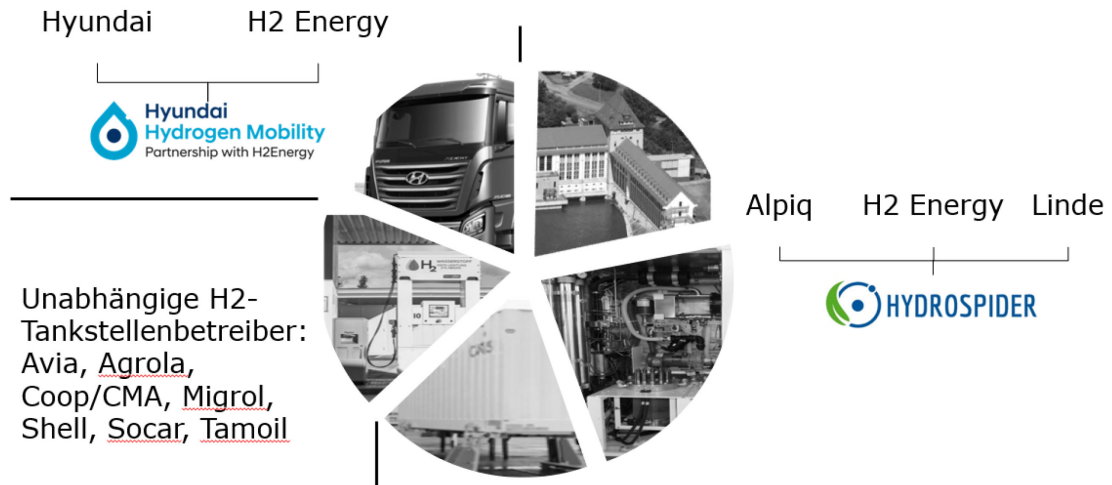


Abb. 17: Wasserstoffsystem für die Schweiz: Skalierung für die Schweiz mit 1000 LKW bis 2023

Für die Vernetzung aller Partner, die es für diesen Ansatz benötigt, war und ist die funktionierende Wasserstoff-Produktions-Anlage in Aarau im Zusammenspiel mit der Wasserstoff-Tankstelle in Hunzenschwil und an der EMPA sehr wertvoll und hilfreich.



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

7.1 Nationale Zusammenarbeit

Die Errichtung dieser Anlage wurde durch viele Stellen massgeblich unterstützt. Neben den direkten Projektpartnern haben uns viele Firmen mit ihrem Fachwissen, Komponenten und Dienstleistungen unterstützt, dass diese Anlage in der sehr kurzen Zeit realisiert werden konnte.

Eniwa	Zusammenarbeit bezüglich des Betriebes der Wasserstoff-Produktionsanlage.
Indermühle	Zusammenarbeit bei der Logistik des Wasserstoffs und Betrieb des Trailers
TÜV Thüringen Schweiz	Unterstützung bei der Beurteilung von Logistikkonzepten; Sicherheitsbeurteilung der Wasserstoff-Anlage
Coop Mineraloel AG	Zusammenarbeit bei der Belieferung der Wasserstoff-Tankstelle in Hunzenschwil, als Kunde
Empa und PSI	Erfahrungsaustausch beim Betrieb der Anlage und Unterstützung bei Bedarf von Spezialuntersuchungen und –ausrüstung.
BfE	Erstellung der Ökobilanz von Wasserstoff als Treibstoff, Finanzunterstützung

Zudem war für uns die Zusammenarbeit mit SUVA, EMPA und TÜV Thüringen Schweiz sehr hilfreich, um Fragen betreffend Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff in der Mobilität einzuschätzen und gangbare Lösungen zu finden.

Erfahrungsaustausch mit der interessierten Öffentlichkeit: Die Anlage dient als gutes Anschauungsbeispiel im Kontext der Anwendung von Wasserstoff als Energieträger. Durch die Nähe der Anlage zur Wasserstoff-Tankstelle in Hunzenschwil haben sich Energieexperten von verschiedenen Firmen, aus unterschiedlichen Branchen wie Tankstellengeschäft, Grossverteilern, aber generell auch Logistiker die Funktionsweise des gesamten Ecosystems Wasserstoff in Aarau-Hunzenschwil besucht, um einen Eindruck über die Umsetzbarkeit zu gewinnen. Hier stellt die Anlage eine hervorragende Plattform für einen praxisnahen Wissensaustausch dar.

Am 17. Mai 2018 konstituierte sich der Wasserstoff-Förderverein mit dem Ziel bis 2023 ein flächendeckendes Tankstellennetz in der Schweiz für erneuerbaren Wasserstoff zu errichten. Dabei stellte die Wasserstoff-Produktionsanlage in Aarau auch einen Beitrag dar, der mithilfe, die Entscheidungsträger davon zu überzeugen, dass ein solches Unterfangen heute realisierbar ist. Neben den Betreibern von Tankstellen sehen zunehmend auch die Transportunternehmen, dass Wasserstoff für sie eine Option als Treibstoff sein kann, um CO₂-Emissionen und Emissionen zu reduzieren.

7.2 Internationale Zusammenarbeit

Basierend auf den Erfahrungen in der Errichtung dieser Wasserstoff-Produktionsanlage ist es H₂ Energy gelungen, sich als Partner im europäischen Forschungsprojekt H2Haul zu etablieren. Dadurch wird ein Erfahrungsaustausch auf europäischer Ebene für die Errichtung ganzer Wasserstoff-Kreisläufe stattfinden. Anlässlich des Kick-off Meeting dieses Projektes wurde die Produktionsanlage besichtigt.

Die funktionierende Anlage und der Kreislauf wurden als «Roll-Model» für eine Überwindung der «Huhn-Ei»-Problematik erkannt. Im Projekt H2Haul (<https://cordis.europa.eu/project/rcn/224393/factsheet/en>) wird H2 Energy die Wasserstoff-Versorgung für vier Brennstoffzellen-LKWs in der Schweiz aufbauen.



Toyota qualifiziert die Tankstellen in der Schweiz, basierend auf der Wasserstoff-Versorgung aus Aarau als gute Qualität, so dass nach dem 7.9.17 die Freigabe erteilt wurde, Brennstoffzellenfahrzeuge (Mirai) in die Schweiz zu importieren. Der Förderverein hat inzwischen beschlossen die Anforderungen von Toyota für alle Tankstellen, die von seinen Mitgliedern gebaut werden, angewendet werden sollen, um damit auch die Qualität der Tankstellen durchgehend hoch zu halten.

Die Wasserstoff-Produktionsanlage wird auch international als Teil des realisierten Wasserstoffkreislaufes von Coop mit erneuerbar erzeugtem Wasserstoff wahrgenommen. In diesem Kontext besteht ein Erfahrungsaustausch mit Vertretern von Industriefirmen wie Lastwagenherstellern, Energielieferanten, Tankstellenbetreibern, Baukonzernen und Biogaserzeugern, aber auch Vertretern ausländischer Administrationen und Infrastrukturerstellern, die sich über die Machbarkeit von Wasserstoff als Energieträger ins Bild setzen wollen. Speziell findet ein Austausch mit H2 Mobility Deutschland, der Clean-Energy-Partnership CEP sowie dem NOW in Deutschland statt. In Österreich und den Niederlanden haben sich ebenfalls ein guter Austausch mit namhaften Firmen der Strom- und Gaswirtschaft entwickelt, um zu evaluieren, wie nationale Ecosysteme realisiert werden können.



8 Publikationen

8.1 Presseartikel

Die Eröffnung der Wasserstoff-Produktionsanlage wurde zusammen mit der Wasserstoff-Tankstelle und dem Wasserstoff LKW in einem Presse-Event am 4.11.2016 durchgeführt. Die Presse hat dies weit verbreitet aufgenommen.

- Der Event triggerte ca. 45 Artikel in allen Landesteilen (D; F; I). In der Tagespresse (Tagesanzeiger, NZZ, Blick, Basler Zeitung, Le Matin, Le Nouvelliste, La Regione Ticino, Giornale del Popolo etc.), wie in der Wochenpresse wie Schweizer Illustrierte erschienen Artikel zum ganzen Kreislauf. Daneben fand das Thema auch in der Fachpresse Erwähnung (Automobil Revue, Umwelttechnik, Eurotax, Transport Routier, Swiss Camion etc.).
- SRF 10.6.2016 Regionaljournal AG So: Wasserstoff aus Aarau für Coop-Lastwagen
- Hydrogen Report 2016-2017; 25.9.2017
- CNBC 16.10.2017; A hydrogen generation plant that turns water into car fuel
- SRF Tagesschau 1.6.2019: Treibstoff aus Wasser Wasserstoff und e-Mobilität ergänzen sich

8.2 Artikel

- Who is who Logistik 2019: 35 to Brennstoffzellen-Anhängerzug im Einsatz bei Coop Schweiz - Der Start der erneuerbaren Logistik von morgen?; Philipp Dietrich, Beat Hirschi, Diego Jaggi
- Aqua & Gas No. 7/8: Power-To-Gas für eine nachhaltigere Mobilität; Philipp Dietrich
- Erneuerbare Energien Nr. 6; Dez. 2018: Wasserstoff kann den Diesel vollständig ablösen; Interview von Beat Kohler
- Bulletin VSE 13.12.2018: Wasserstoff -Stoff der Zukunft?; Ralph Möll

8.3 Auszeichnungen

- International Truck of the Year (IToY) Truck Innovation Award 2020: 20.11.2019 erhielt das JV Hyundai Hydrogen Mobility den Award für den ganzheitlichen Ansatz für den Paradigmenwechsel hin zu einer sauberen Mobilität im Nutzfahrzeugbereich, Vergeben an der Solutrans in Lyon

8.4 Ausstellungen

- Auto Zürich Car Show 2017: Oktober 2017 Teilnahme an der Sonderschau «Wasserstoff-Mobilität»

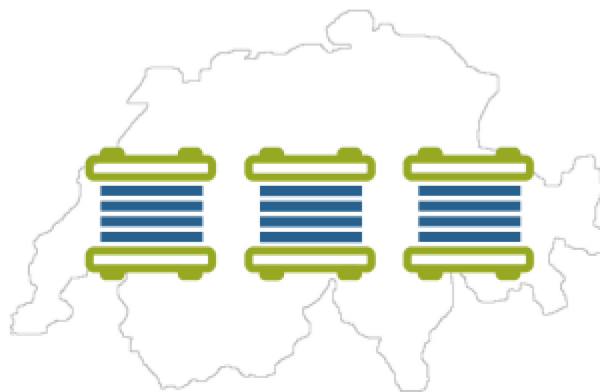
8.5 Literatur

- [1] L. Schümperlin, R. Frischknecht: BFE-Bericht: Ökobilanz von Wasserstoff als Treibstoff, 10.7.2017,
- [2] Hydrogen Council: Path to hydrogen competitiveness – a cost perspective; 20.1.2020; www.hydrogencouncil.com



Anhang 1: Leitfaden zum Aufbau von Wasserstoff-Produktionsanlagen

Leitfaden zum Aufbau von Wasserstoff-Produktionsanlagen



Genehmigungsprozess in der Schweiz

Version 1.0
Erstellt 10.12.2019
Basis Leitfaden zum Aufbau von Wasserstoff-Tankstellen (Empa)
Informationssammlung zum Aufbau von Wasserstoff-Produktionsanlagen (H2 Energy)



Anhang 2: Begleitstudie



Begleitstudie zum P&D Projekt H2- Produktion an einem Laufwasserkraftwerk

Schlussbericht

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf

Autoren:
Dr. Sinan L. Teske Labor für Urban Energy Systems
Urs Cabalzar Labor für Fahrzeugantriebssysteme
Stefan Hiltbrand Labor für Fahrzeugantriebssysteme
Fabio Inderbitzin Labor für Urban Energy Systems

Dübendorf, den 22. Februar 2020