



Jahresbericht vom 15. Dezember 2017

70 MPa H₂-Tankstellen

Aufbau und Betrieb der ersten Wasserstoff-Tankstellen in der Schweiz mit einem Nenn-
druck von 70 MPa





Datum: 15 Dezember 2017

Ort: Dübendorf

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Empa
Überlandstrasse 129, CH-8600/Dübendorf
www.empa.ch

H2 Energy AG
Sihlstrasse 21, CH-8001/Zürich
www.h2energy.ch

Korean Motor Company – Kontich, Branch Dietlikon, “Hyundai Suisse”
Brandbachstrasse 6, CH-8305 Dietlikon
www.hyundai.ch

Autoren:

Urs Cabalzar, Empa, urs.cabalzar@empa.ch
Patrick Stadelmann, Empa, patrick.stadelmann@empa.ch (Abschnitt zu AP3 C)

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung: Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/ 501285-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Projektziele.....	4
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse.....	5
1.1. AP1: Planung und Realisierung der 70 MPa H ₂ -Tankstelle an der Empa	5
1.2. AP2: Planung und Realisierung der 70/35 MPa H ₂ -Tankstelle in Hunzenschwil	8
1.3. AP3: Klärung rechtlicher Fragen zu Errichtung und Betrieb von H ₂ -Tankstellen	9
1.3.1. AP3 A: Genehmigungsverfahren von H ₂ -Tankstellen in der Schweiz	9
1.3.2. AP3 B: Untersuchungen zur Ex-Zonenregelung an H ₂ -Zapfsäulen	9
1.3.3. AP3 C: Erlangung der Eichfähigkeit für H ₂ -Zapfsäulen	11
1.4. AP4: Monitoring des H ₂ -Verdichters, der Speicher und des Anlagenbetriebs.....	13
1.5. AP5: Betrieb und Monitoring der Brennstoffzellen Fahrzeuge.....	13
Nationale Zusammenarbeit	18
Internationale Zusammenarbeit	19
Bewertung 2017 und Ausblick 2018	20
Referenzen	21
Abkürzungsverzeichnis	22
Anhang	23



Projektziele

Das Projekt beinhaltet die Realisierung zweier 70 MPa-H₂-Tankstellen inklusive vorgelagerten Verdichtern, Speichern und Vorkühlsystemen. Als Tankstellenstandorte wurden der Empa-Campus in Dübendorf – mit Fokus auf technische & wissenschaftliche Untersuchungen – und eine Coop-Tankstelle in Hunzenschwil – mit Fokus auf Kostenoptimierung von Konzept & Betrieb – festgelegt.

Mit vorliegendem Projekt sollen zudem die in der Schweiz an den Aufbau solcher Anlagen gestellten, allgemeinen rechtlichen Anforderungen hinsichtlich Umsetzbarkeit zusammengestellt und geklärt werden. Dabei sind Untersuchungen zur Eichfähigkeit von H₂-Zapfsäulen sowie Abklärungen zu Ex-Schutz- und Brandschutz-Vorschriften vorgesehen. Des Weiteren sollen durch ein Monitoring von Anlage und Brennstoffzellen-Fahrzeugen energetische und ökonomische Aspekte analysiert werden.



Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1.1. AP1: Planung und Realisierung der 70 MPa H₂-Tankstelle an der Empa

Die Planung und Realisierung der 70 MPa H₂-Tankstelle an der Empa wurde mit der Inbetriebnahme im Juli 2016 erfolgreich abgeschlossen. Die dabei ausgeführten Tätigkeiten sind im letzten Jahresbericht festgehalten. Im Jahr 2017 beschränkten sich die Arbeiten im Rahmen dieses Arbeitspaketes insbesondere auf die Wartung und Reparaturen an der Anlage.

Die jährliche Wartung der 70 MPa Tankstellenkomponenten (Verdichter, Hochdruckspeicher, Vorkühlung, Zapfsäule) umfasst folgende Hauptpunkte:

Verdichter (Ausgangsdruck: 90 MPa)

- Ersetzen der Saug- und Druckventile jeder Stufe
(Es handelt sich dabei um die Rückschlagventile am Ein- und Auslass jeder Stufe, welche alle 500 Betriebsstunden ausgetauscht werden müssen)
- Austausch von Filtern und Dichtungen
- Elektrotechnische Prüfung sowie grundsätzliche Prüfung und Reinigung sämtlicher Komponenten des 70 MPa Anlagenteils

Vorkühlsystem

- Kältemittel prüfen (Füllstand, Öleintrag, Feuchtigkeit)
- Überprüfung und Reinigung von Kondensator, Steuerung und Sicherheitseinrichtungen (insbesondere wird auch die Dichtheit der Vorkühleinheit geprüft)

Zudem sind weitere kleinere Wartungsarbeiten fällig, welche in kürzeren Intervallen auszuführen sind. Beispielsweise sind dies das Schmieren der Zapfpistole oder das regelmässige Überprüfen der angezeigten Prozesswerte.

Neben Wartungsarbeiten mussten einzelne kleinere Komponenten der Anlage repariert werden. Obwohl die Tankstelle auch im 2017 grundsätzlich eine hohe Verfügbarkeit aufwies, gab es zwischenzeitlich immer wieder Ausfälle. Nachfolgende Tabelle beinhaltet eine Auswahl von Ausfällen und deren Ursachen:

Komponente	Beschrieb der Ursache	Massnahme
Temperatursensor in Zapfsäule	Der Sensor zur Temp.-Messung des H ₂ in der Zapfsäule gab ein falsches Signal aus (-> Betankung nicht mehr möglich). Verwendeter Sensortyp vermutlich nicht geeignet die Druckstösse in Zapfsäule aufzunehmen	Durch Temp.-Sensor eines anderen Typs ersetzt



Temperatursensor in Vorkühl-Wärmetauscher	Bei tieferen Minustemperaturen stimmte Temperaturanzeige nicht. Die Vorkühlung kühlte zu stark, was schlussendlich zum Herunterfahren der Anlage führte.	Kontakt Sensor/Wärmetauscherblock verbessert und Steuerung angepasst
Drucksensor nach Verdichter	Drucksensor gab nicht plausible Werte aus, was zum Abschalten der Anlage führte. Vermutlich war H ₂ durch die Membrane des Sensors diffundiert.	Austausch des Drucksensors
Zapfpistole	Höchstwahrscheinlich war die Zapfpistole einem Nutzer auf den Boden gefallen. Gehäuse war verdreht und Anschluss ans Fahrzeug vorübergehend nicht möglich.	Zapfpistole ersetzt. Die neue Generation besitzt einen zusätzlichen Schutz (Gummi-Gehäuseteil)

Tab. 1 Ursachen und Massnahmen zu einer Auswahl an Ausfällen der H₂-Tankstelle

Es kann festgehalten werden, dass der Prozess und die Hauptkomponenten grundsätzlich gut funktionieren. Der Ausfall von grösstenteils kleineren Standardkomponenten verhindert aber im Fall der Empa-Tankstelle derzeit noch einen zuverlässigeren Betrieb. Erfahrungen von der Tankstelle in Hunzenschwil werden im nachfolgenden Kapitel aufgeführt.

Abb. 1 Ersetzter Temperatursensor in H₂-Zapfsäule unmittelbar vor Betankungsschlauch (links: Position Sensor)

Im Jahr 2017 wurden zudem Schallschutzmassnahmen für den 90 MPa Verdichter realisiert. Insbesondere die dumpfen Schläge des Verdichterkolbens und das hochfrequente Pfeifen des Elektromotors führten zu einer erhöhten Lärmbelastung für Personen, welche sich im näheren Umfeld der Anlage aufhielten (inklusive Personen aus dem nahegelegenen Wohnquartier). Aus diesem Grund wurde zusammen mit der Firma Prose AG ein Lärmschutzkonzept entwickelt, welches unter anderem eine elastische Lagerung und eine schalldämmende Kapselung für den Verdichter

beinhaltet. Ziel der Massnahmen ist die Reduktion des Schalldruckpegels um mindestens 15 dB von 87 dB auf 72 dB. Die Messung des Schalldruckpegels erfolgte im Abstand von einem Meter. Die Überprüfung der Reduktion um 15 dB ist noch nicht erfolgt und ist für Januar 2018 geplant.



Abb. 2 Schalldruckmessung (links) und Verdichter mit Kapselung (rechts)

Der Nutzerkreis der 70 MPa Zapfsäule hat sich im 2017 von 11 auf 13 BZ-Fahrzeuge vergrössert. Im Durchschnitt werden 1 - 2 Betankungen pro Tag durchgeführt und die 70 MPa Komponenten sind dementsprechend weiterhin täglich in Betrieb. Im Jahr 2017 wurden ca. 1.1 Tonnen Wasserstoff bei 70 MPa betankt, was einer täglichen Betankungsmenge von etwa 3 kg entspricht. Im Vergleich zum baugleichen Hyundai ix35 mit 1.6 GDi Benzinmotor, welcher ebenfalls Frontantrieb und die gleichen Motorleistung aufweist ergeben sich folgende Einsparung bezüglich Benzin und CO₂ für das Jahr 2017:

- 7'900 Liter Benzin eingespart¹
- 18.3 Tonnen (lokale) CO₂-Emissionen verhindert¹

Die CO₂-Reduktion basiert auf einer tank-to-wheel Bilanz. Insbesondere wurden somit CO₂-Emissionen, welche bei der Herstellung des Stroms und der H₂-Produktion bzw. bei der Erdölgewinnung und -raffinierung anfallen, nicht berücksichtigt. Für das BZ- sowie für das Benzinfahrzeug wurden Normwerte für Verbrauch und CO₂-Ausstoss verwendet (siehe Fussnote).

¹ H₂ Hyundai ix35 Fuel Cell: 0.95 kg/100km
Benzin Hyundai ix35 1.6l GDi 2WD: 6.8 l/100km, 158 gCO₂/km (Quellen: hyundai.de & auto-motor-und-sport.de)



1.2. AP2: Planung und Realisierung der 70/35 MPa H₂-Tankstelle in Hunzenschwil

Die Planung und Realisierung der 70/35 MPa H₂-Tankstelle in Hunzenschwil wurde mit der offiziellen Inbetriebnahme am 04.11.2016 erfolgreich abgeschlossen. Die dabei ausgeführten Tätigkeiten sind im letzten Jahresbericht festgehalten.

Im Gegensatz zur Tankstelle an der Empa sind in Hunzenschwil kaum Ausfälle zu verzeichnen. Seit Inbetriebnahme mussten lediglich einmal Anpassungen an der Steuerung vorgenommen werden. Ungünstige Einstellungen des Rampenverlaufs hatten dazu geführt, dass Betankungen abgebrochen wurden. Der Rampenverlauf gibt die Druckerhöhung pro Zeiteinheit (bar/min) vor und steuert damit die Geschwindigkeit der Betankung. Wie an der Empa wurde auch in Hunzenschwil die 70 MPa Zapfpistole beschädigt, da sie höchstwahrscheinlich einem Nutzer auf den Boden gefallen war. An der Zapfpistole in Hunzenschwil wurde die Infrarot-Kommunikationsschnittstelle in Mitleidenschaft gezogen, sodass diese ebenfalls ersetzt werden musste. Die Zapfpistolen beider Tankstellen wurden zur Revision eingeschickt.

Eine Problematik welche von Herstellerseite noch angegangen werden sollte, ist das Festfrieren der Zapfpistole in den Wintermonaten. Bei kalten Temperaturen und feuchten bzw. regnerischen Bedingungen kann es vorkommen, dass die Zapfpistole am Fahrzeugstutzen festfriert. Dies ist bei der Tankstelle in Hunzenschwil sowie auch an der Empa bereits aufgetreten. Das Festfrieren der Zapfpistole tritt allerdings relativ selten auf. Durch eine Verkürzung der Schmierintervalle in den Wintermonaten wird momentan versucht der Problematik entgegenzuwirken. Das Schmiermittel enthält wasserabweisende Inhaltsstoffe.

Zum regelmässigen Nutzerkreis der Tankstelle in Hunzenschwil zählen 12 BZ-fahrzeuge und ein Lastwagen. Viele der 12 BZ-Fahrzeugbetreiber arbeiten im Aussendienst und legen öfters 400 km täglich zurück. Aus diesem Grund finden in Hunzenschwil durchschnittlich etwa 6 Betankungen pro Tag statt. Die BZ-PkW setzten im Jahr 2017 eine Wasserstoffmenge von zirka 3 Tonnen um, während der Lastwagen über das Jahr ungefähr 400 kg betankte. Zusätzlich wurden weitere H₂-Betankungen von Privaten durchgeführt. Wenn nur die PkW betrachtet werden, welche regelmässig die Tankstelle nutzen, ergeben sich in einem Vergleich zum Benzinfahrzeug folgende Einsparungen für das Jahr 2017:

- 21'500 Liter Benzin eingespart
- 50 Tonnen (lokale) CO₂-Emissionen verhindert

Für den Vergleich gelten die in vorangehendem Kapitel erläuterten Bedingungen.



1.3. AP3: Klärung rechtlicher Fragen zu Errichtung und Betrieb von H₂-Tankstellen

1.3.1. AP3 A: Genehmigungsverfahren von H₂-Tankstellen in der Schweiz

Für den in diesem Teilarbeitspaket geplanten Leitfaden zum Aufbau von H₂-Tankstellen in der Schweiz wurden im Verlaufe des Jahres weiterhin Dokumente gesammelt und abgelegt. Ein erster Entwurf für den Leitfaden auf Basis der gesammelten Dokumente und Erfahrungen soll im 2018 erstellt werden.

1.3.2. AP3 B: Untersuchungen zur Ex-Zonenregelung an H₂-Zapfsäulen

Die Tätigkeiten im Arbeitspaket 3 B zielen auf die Re-Definition der Schweizerischen Ex-Zoneneinteilung für H₂-Zapfsäulen ab, was schlussendlich deren Integration in konventionelle Tankstellen ohne aufwändige und kostspielige Anpassungen ermöglicht.

In diversen Sitzungen und Gesprächen mit der SUVA und dem Projektpartner H2 Energy wurde diese Thematik bereits im Jahr 2016 angegangen (siehe letzter Jahresbericht), wobei folgende drei Lösungsansätze aufgezeigt wurden, welche an dieser Stelle nicht mehr weiter erläutert werden:

- Anpassung an ausländische Gesetzgebung
- Lecktest zu Beginn der Betankung
- Szenario „fehlender Dichtungsring“ nicht relevant

In einer Sitzung vom 29.03.2017 wurde von der SUVA bestätigt, dass der zweite Ansatz – „Lecktest zu Beginn der Betankung“ – unter bestimmten Bedingungen die Auflösung der Ex-Zone ermöglichen könnte. Anstelle einer Ex-Zone würde bei diesem Ansatz die Sicherheit an der Zapfsäule dadurch gewährleistet, dass die Zapfsäule zu Beginn jeder Betankung einen Lecktest durchführt. Falls dieser Test nicht erfolgreich verläuft, wird die Betankung nicht fortgeführt. Ein entsprechender Lecktest ist in der weltweit gültigen Norm für die Wasserstoffbetankung (SAE 2601 [1]) festgehalten und ist in der Steuerung von handelsüblichen H₂-Zapfsäulen bereits integriert. Um diesen Ansatz für die Re-Definition bzw. Auflösung der Ex-Zone anerkennen zu können, fordert die SUVA einen Nachweis zur Zuverlässigkeit des Lecktests. Dieser Nachweis soll mit Hilfe von Messungen an der H₂-Zapfsäule der Empa-Tankstelle erbracht werden.

Im Rahmen einer Vorprüfung wurde dazu der Druck im Füllschlauch der Zapfsäule bei zehn aufeinanderfolgenden Betankungen aufgezeichnet (siehe untenstehendes Diagramm). Die Versuche 1 – 3 wurden ohne Manipulationen durchgeführt. Bei den Versuchen 4 – 10 wurde der O-Ring im Stutzen entfernt. Während die ersten 6 Versuche bei ungefähr halbvollem Tank durchgeführt wurden und die Betankung nach erfolgtem Lecktest jeweils manuell abgebrochen wurde, ist im Diagramm ersichtlich, dass das Fahrzeug im siebten Versuch komplett befüllt und die nachfolgenden Versuche mit vollem Tank durchgeführt wurden.

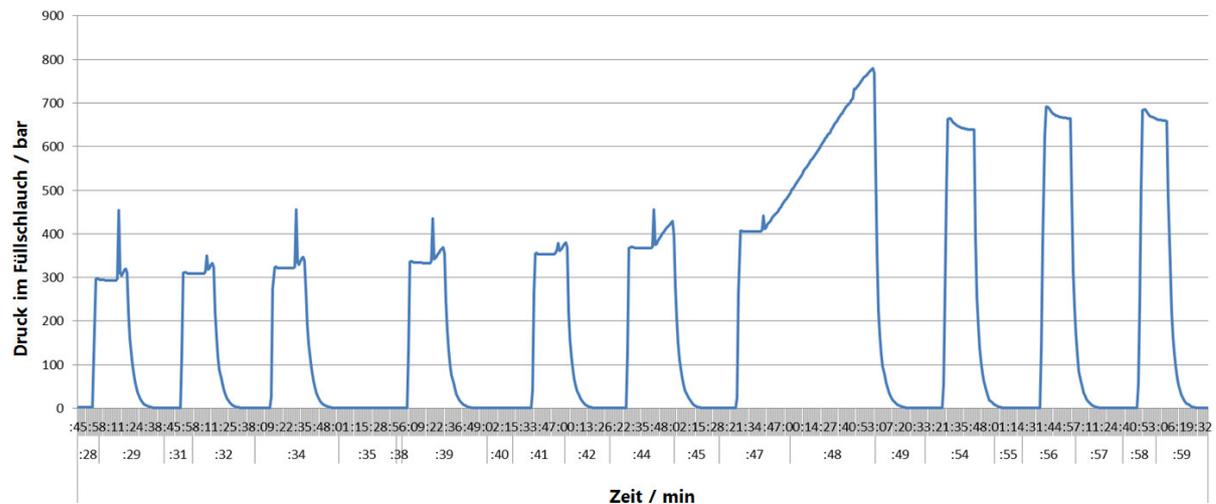


Abb. 3 Druck im Füllschlauch während zehn Lecktest-Versuchen

Der Betankungsstart ist jeweils an einem nahezu senkrechten Anstieg des Drucks zu erkennen. Im Anschluss werden die Betankungsventile geschlossen und der Druck bleibt für einige Sekunden konstant. In dieser Phase werden im Abstand von wenigen Sekunden zwei Druckmessungen aufgezeichnet. Überschreitet die Differenz dieser beiden Messungen einen vorbestimmten Wert (z.B. 5 bar), geht man von einem Leck aus und die Zapfsäulensteuerung beendet den Betankungsvorgang mit der entsprechenden Fehlermeldung. Andernfalls wird die Betankung fortgeführt, was sich im Diagramm mit einem kurzzeitigen spitzen Druckanstieg zeigt.

Es ist ersichtlich, dass der Druck während der Durchführung des Lecktests in den ersten sieben Versuchen jeweils kaum abnimmt. Trotz fehlendem O-Ring ab dem vierten Versuch war folglich kein Leck aufgetreten. Dass die Dichtung bei hohem Druck ohne O-Ring trotzdem möglich ist, zeigten bereits diverse vorgängig durchgeführten Versuche (auch mit CNG). Bei den letzten drei Versuchen ist jedoch in der Phase des Lecktests eine Druckabnahme erkennbar, die bei jedem der Versuche auch zum Abbruch der Betankung geführt hat. Der fehlende O-Ring verursachte in diesen Fällen ein kleines Leck, welches über die Druckmessung auch von der Zapfsäule erkannt wurde.

Die Vorversuche zeigen einerseits, dass der von der Zapfsäule durchgeführte Lecktest funktioniert. Andererseits ist aber klar, dass das Entfernen des O-Rings teilweise zu keinem oder aber zu einem eher willkürlichen Leck führt und somit aus entsprechenden Versuchen keine aussagekräftigen Resultate gewonnen werden können. Aus diesem Grund soll eine Lecktestvorrichtung aufgebaut werden, mit welcher ein vorbestimmtes Leck reproduzierbar erzeugt werden kann. Diese Lecktestvorrichtung wurde im 2017 konzipiert und die entsprechenden Komponenten über die Firmen Stäubli, Swagelok und Rekolos beschafft. Das folgende R&I-Schema zeigt die Komponenten dieser Vorrichtung:

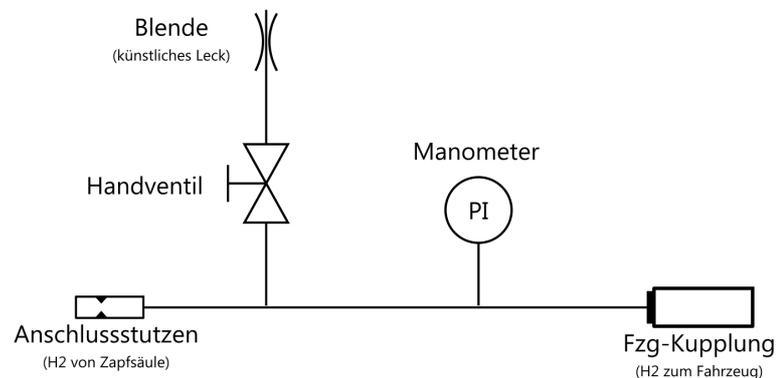


Abb. 4 R&I-Schema der Lecktestvorrichtung

Der Aufbau ist sehr einfach und enthält im Wesentlichen die Anschlüsse für die Verbindung zur Zapfsäule und zum Fahrzeug sowie eine über ein T-Stück angeschlossene Blende mit welcher ein Leck mit vordefiniertem Querschnitt simuliert werden kann. Für die Bestimmung des Blendenquerschnitts wurden Überschlagsrechnungen durchgeführt, wobei der von der SUVA vorgegebene Grenzwert für den Leckmassenstrom von 0.1 g/s als Referenz herangezogen wurde. Auf Basis der Überschlagsrechnungen wurden Blenden mit Öffnungsdurchmessern in der Grössenordnung von 1 bis 100 µm bestellt. Als Blenden werden dabei konventionelle Verschlusskappen verwendet, welche durch die Firma Rekolos mit Bohrungen der entsprechenden Grösse versehen wurden. Ein Lasergerät ermöglichte die Bohrungen im µm-Massstab.

Um die Überschlagsrechnungen zu überprüfen und den Massenstrom zu bestimmen, welcher sich jeweils bei 70 MPa über den verschiedenen Blenden einstellt, sind Messungen im kommenden Jahr geplant. Im Anschluss an diese Messungen können die eigentlichen Experimente zur Überprüfung des Lecktests an der Zapfsäule durchgeführt werden. Dabei sind mehrere Versuche bei unterschiedlichem Fahrzeugtankfüllstand geplant.

1.3.3. AP3 C: Erlangung der Eichfähigkeit für H₂-Zapfsäulen

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 C wurde von Metas (Metrologische Institut der Schweiz) ein Standard zur Erlangung der Eichfähigkeit von H₂-Zapfsäulen entwickelt. Bereits zum Zeitpunkt der Erstellung des Projektantrags wurde festgelegt, dass die Eichmessung auf Basis der gravimetrischen Methode erfolgen soll. Die detaillierte Konstruktion einer entsprechenden Eichvorrichtung wurde von Metas im Jahr 2017 erarbeitet. Es handelt sich dabei um eine mobile Eichvorrichtung bestehend aus zwei verstärkten 36 Liter Hochdruckbehälter (Hexagon Lincoln, USA). Die Lagertanks sind Zylinder vom Typ 4 (kohlefaserverstärktes Epoxidharz mit einer Kunststoffauskleidung) mit einem Betriebsdruck von 70 MPa und einem maximalen Fülldruck von 87.5 MPa. Die nominale Leermasse jedes Tanks beträgt 33 kg mit einer Abmessungen von 320,8 mm x 910,3 mm.

Der Rahmen wird auf einer 300 kg ATEX-zertifizierten Waage (Mettler Toledo) mit einer Auflösung von 0,1 g montiert und an ein ATEX-zertifiziertes Terminal (Mettler Toledo) angeschlossen. Um die Waage vor Luftbewegungen zu schützen, sind Waage und Rahmen in einem ESD-Kunststoffrahmen (Europlex SDX) untergebracht. Der komplette Aufbau ist elektrisch geerdet und transportabel (nie mit Wasserstoff gefüllt). Abb. 5 CAD Modell der gravimetrischen Eichvorrichtung zeigt wie das System ungefähr aussehen wird.

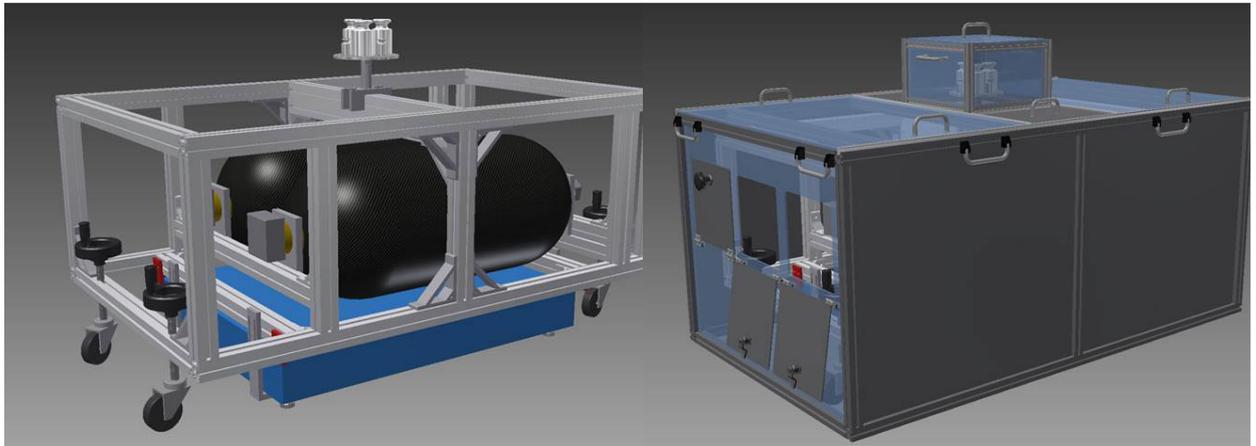


Abb. 5 CAD Modell der gravimetrischen Eichvorrichtung

Das Rohrleitungs- und Instrumentenflussbild (R&ID) ist in Abb. 6 dargestellt. Je nach Zertifizierungsanforderungen wird das R&ID noch entsprechend angepasst. Details des Gebläses und der Spülleitung werden später hinzugefügt.

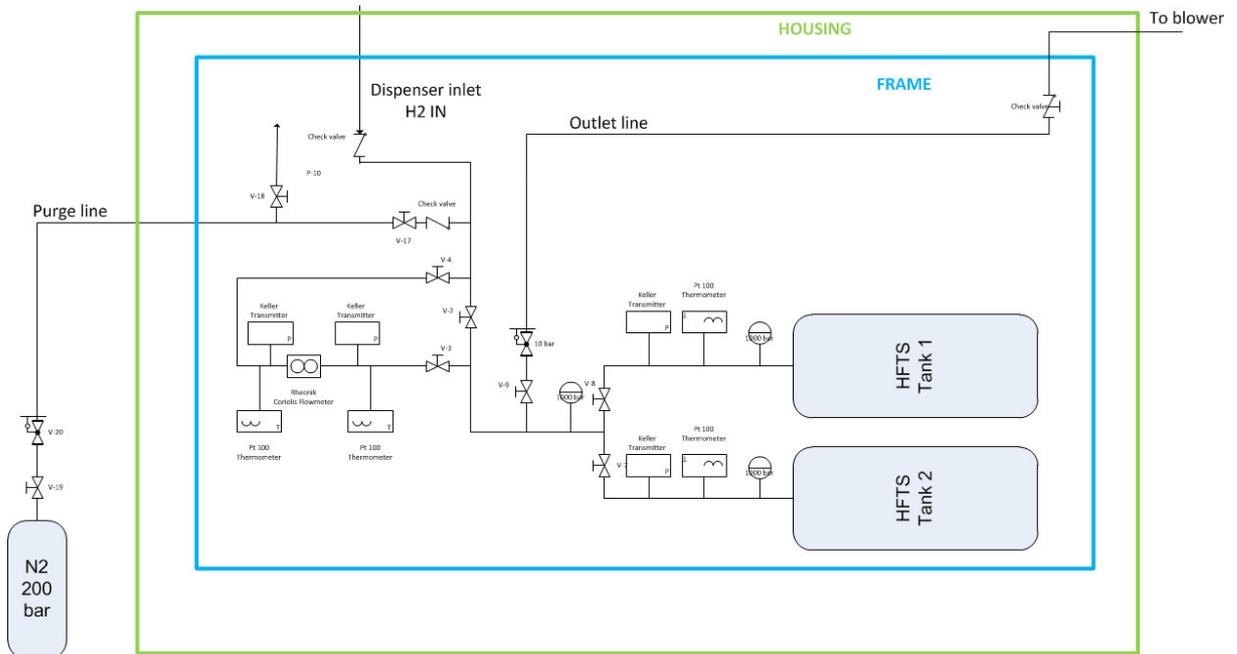


Abb. 6 R&ID der gravimetrischen Eichvorrichtung

Es wurden drei Leitungen vorgesehen: eine Einlassleitung, an der die H₂-Zapfsäule angeschlossen wird, eine Spülleitung zum Spülen des Systems mit N₂ und eine Auslassleitung zum Ablassen des Tanks. Beide Tanks müssen vor dem Transport von jeglichem H₂-Gas gereinigt werden.

Der Wasserstoff kann über einen ATEX-zertifizierten Coriolis Massendurchflussmesser (Rheonik) oder auf direktem Weg in die Druckbehälter fließen. Passive Druckmessgeräte werden vor jedem Druckbehälter montiert. Wenn möglich, werden auch aktive ATEX-zertifizierte Drucksensoren (Keller,

PAA-33XEi) und ATEX-zertifizierte Temperatursensoren (Sensit) montiert, um eine Überwachung zu ermöglichen.

1.4. AP4: Monitoring des H₂-Verdichters, der Speicher und des Anlagenbetriebs

Die Arbeiten zu Arbeitspaket 4 beinhalteten im Jahr 2017 vor allem die Durchführung und Auswertungen von Messungen zum energetischen Verbrauch der einzelnen Komponenten zur 70 MPa Betankung. Die entsprechenden Resultate werden in nachfolgendem Kapitel mit den Ergebnissen des Fahrzeug-Monitorings in Form einer well-to-wheel Bilanz dargestellt.

1.5. AP5: Betrieb und Monitoring der Brennstoffzellen Fahrzeuge

Im Rahmen des ebenfalls vom BFE unterstützten und im Jahr 2017 abgeschlossenen Projektes „Future Mobility“, wurden bereits Messungen zur energetischen Effizienz der Anlagenkomponenten des *move* durchgeführt. Diese beschränkten sich allerdings auf den H₂-Produktionsteil und die Verdichtung bis 35 MPa. Im Jahr 2017 wurden als Teil des AP4 von vorliegendem Projekt weitere Messungen am 70 MPa-Verdichter und dem Vorkühlsystem durchgeführt, welche die Bestimmung aller Verluste von der Stromquelle bis zum Tank von H₂-Fahrzeugen mit 70 MPa Nenndruck ermöglichen.

Als Teil des AP5 wurden im 2017 zudem Daten aus dem Monitoring des BZ-Fahrzeuges der Empa ausgewertet. Dies erlaubt nun die Erstellung einer well-to-wheel Bilanz, die auf Messungen unter Realbedingungen basiert. Da die Anlagenkomponenten des *move* im Vergleich zu zukünftigen industriellen Anlagen deutlich kleiner dimensioniert sind, weisen diese allerdings auch verhältnismässig hohe Verluste auf. So können beispielsweise die Peripherieverluste bei grösseren Elektrolyseuren deutlich reduziert werden. Aus diesem Grund wurde die Energiebilanz zum *move* mit einer Energiebilanz zu einer fiktiven Industrieanlage ergänzt. Die entsprechenden Zahlen basieren dabei auf Literaturdaten und Herstellerangaben. Die verwendeten Herstellerangaben konnten für die *move*-Komponenten bereits bestätigt werden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass auch die Angaben zu Komponenten für Anlagen industrieller Grösse zutreffen. Sämtliche aufgeführten Zahlen beschreiben den heutigen Stand der Technik. Durch die Weiterentwicklung der entsprechenden Technologien sind in Zukunft Verbesserungen hinsichtlich Umwandlungseffizienz zu erwarten, die hier nicht berücksichtigt wurden.

Die well-to-wheel Bilanz ist nachfolgend für den *move* und die fiktive industrielle Anlage in Form von je einer Tabelle und einem Sankey-Diagramm dargestellt. Wirkungsgrade und Abwärme bzw. Verluste wurden auf Basis des Brennwertes (HHV) berechnet. Grund dafür ist die Tatsache, dass die Kondensationsenthalpie im H₂ auf dem gesamten Energiepfad bis zur Brennstoffzelle enthalten ist. Erst bei der Umwandlung von H₂ in elektrische Energie bleibt diese ungenutzt und verschlechtert damit den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Deren Wirkungsgrad wird allerdings oft auf Basis des Heizwertes (LHV) angegeben, weshalb die in untenstehenden Tabellen aufgeführten Werte auf den ersten Blick niedrig erscheinen. Das Resultat der gesamten well-to-wheel Bilanz ist allerdings unabhängig von der Verwendung von Brennwert oder Heizwert.



Einheit	Wirkungsgrad Energieumwandlung [%]	Abwärme bzw. Verluste bezogen auf ... [%]	Abwärme bzw. Verluste bezogen auf insgesamt eingesetzte Energie [%]
		...Strominput am Elektrolys.	
Elektrolyseur	61.0	39.0	36.8
		...H ₂ -Menge (Brennwert)	
Verdichter	-	6.8	4.0
Vorkühlsystem	-	2.5	1.5
Antriebsstrang	36.8	63.2	36.5
			Energie am Rad [%]
well-to-wheel Effizienz:			21.2

Tab. 2 Wirkungsgrad und Abwärme bzw. Verluste entlang des H₂-Pfad für die Anlage *move* (bezogen auf den Brennwert von H₂)

Einheit	Wirkungsgrad Energieumwandlung [%]	Abwärme bzw. Verluste bezogen auf ... [%]	Abwärme bzw. Verluste bezogen auf insgesamt eingesetzte Energie [%]
		...Strominput am Elektrolys.	
Elektrolyseur	74.0	26.0	23.3
		...H ₂ -Menge (Brennwert)	
Transport	-	6.5	4.3
Verdichter	-	6.8	4.5
Vorkühlsystem	-	2.5	1.7
Antriebsstrang	36.8	63.2	41.8
			Energie am Rad [%]
well-to-wheel Effizienz:			24.4

Tab. 3 Wirkungsgrad und Abwärme bzw. Verluste entlang des H₂-Pfad für eine industrielle Anlage (bezogen auf den Brennwert von H₂)

Der Antriebsstrang umfasst dabei sämtliche Energiewandler im Fahrzeug (Brennstoffzelle, Batterie, Leistungselektronik, Elektromotor, Untersetzungsgetriebe). Die Zahlen zu Vorkühlsystem und Antriebsstrang aus den Spalten 2 und 3 wurden für die industrielle Anlage unverändert übernommen, da sich diese mit steigender Anlagengröße nicht ändern. Bei der industriellen Anlage wird davon ausgegangen, dass der H₂ nicht lokal bei der Tankstelle produziert, sondern von einer zentralen Produktionsanlage zur Tankstelle gebracht wird. Insbesondere die zumeist stark eingeschränkten Platzverhältnisse bei Tankstellen erlauben keine lokale Produktion. Die Vermeidung von Netzgebühren stellt zudem ein weiterer Grund für eine zentrale H₂-Produktion dar. Da der H₂ nicht lokal produziert wird, wurde der H₂-Pfad der industriellen Anlage mit der Einheit ‚Transport‘ ergänzt, welche die Verdich-



tungsarbeit zur Beladung eines Trailers auf einen Nenndruck von 20 MPa sowie auch dessen Treibstoffverbrauch für die Fahrten zwischen Tankstelle und Produktionsanlage umfasst.

Für den Verdichter und das Vorkühlsystem wird kein Wirkungsgrad angegeben, da deren Nutzenergie eine Druckerhöhung bzw. eine Wärmeabfuhr darstellt. Die für Verdichtung und Vorkühlung eingesetzte Energie kann aber auf den Brennwert der geförderten bzw. gekühlten H₂-Menge bezogen werden. So braucht die Verdichtung von H₂ beispielsweise 6.8% vom Energieinhalt des geförderten H₂ in Form von elektrischer Energie. Diese Werte erlauben dann einen Vergleich mit den Energieumwandlungsverlusten von Elektrolyseur und Antriebsstrang (Spalte 3 der Tabelle). In der vierten Spalte werden Abwärme bzw. Verluste auf die insgesamt eingesetzte Energie bezogen.

Streng genommen wird die zur Verdichtung eingesetzte Energie nicht nur in Abwärme bzw. Verluste umgesetzt, sondern ein Teil der Energie wird in Form einer Enthalpieerhöhung (Druckerhöhung) im H₂ gespeichert. Dieser Teil ergibt sich aus dem eigentlichen Wirkungsgrad des Verdichters und ist in Relation zu den Verlusten sehr gering. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Sankey-Diagrammen die gesamte am Verdichter eingesetzte Energie nach dem Verdichter als Abwärme bzw. Verluste dargestellt. Das Gleiche gilt für das Vorkühlsystem.

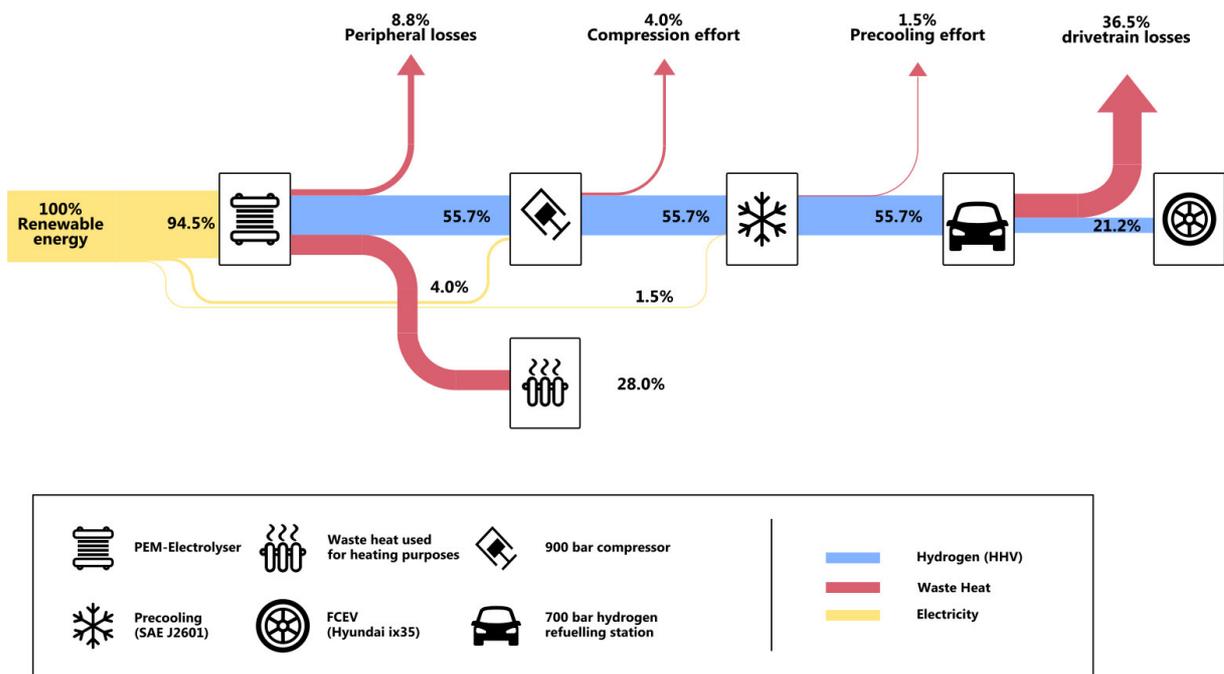


Abb. 7 well-to-wheel Bilanz entlang des H₂-Pfads für die Anlage *move* (bezogen auf den Brennwert von H₂)

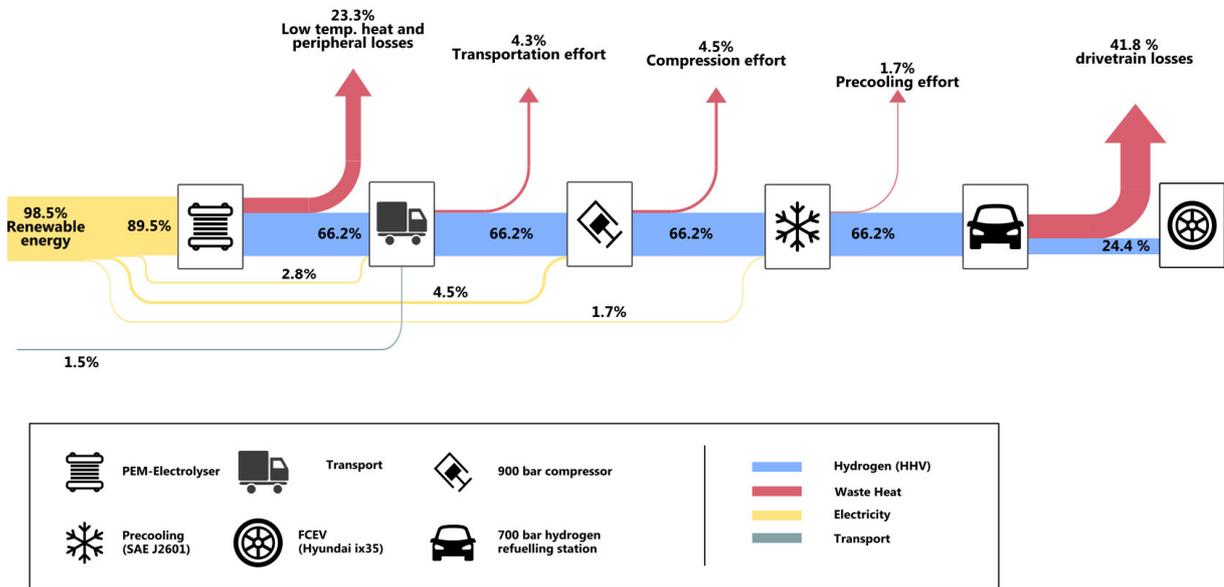


Abb. 8 well-to-wheel Bilanz entlang des H₂-Pfads für eine industrielle Anlage (bez. auf den Brennwert von H₂)

Bei Anlagen von industrieller Grösse mit derzeit verfügbaren Komponenten stehen damit zirka ein Viertel der eingesetzten Energie am Rad als mechanische Energie zur Verfügung. Die grössten Umwandlungsverluste entstehen bei der Elektrolyse und im Antriebsstrang. Es ist allerdings zu beachten, dass die in rot dargestellten Pfade nicht zwingend Verluste sind. Beispielsweise wird die Abwärme bei der *move*-Anlage im Winterhalbjahr zu Heizzwecken verwendet und stellt somit auch eine Nutzenergie dar. Analog ist es denkbar, dass die Abwärme von einer Elektrolyse-Anlage von industrieller Grösse in ein Fernwärmenetz einspeist wird. Dasselbe gilt für die Abwärme der Brennstoffzelle, welche bei niedrigen Aussentemperaturen zur Heizung der Fahrgastkabine eingesetzt werden kann. Der Gesamtwirkungsgrad des dargestellten Pfads kann dementsprechend deutlich über dem Umwandlungswirkungsgrad von Strom zu Radleistung liegen.

In obigen Tabellen und Diagrammen werden Energieaufwände, welche im stand-by Betrieb der Komponenten anfallen, nicht berücksichtigt. Neben dem geringen Grundverbrauch von Steuerungen, Lichter und Lüfter der Gesamtanlage weisen insbesondere die Elektrolyse (im hot stand-by) und die Vorkühlung eine erwähnenswerte Leistungsaufnahme im stand-by Modus auf. Allerdings kann der stand-by Verbrauch nicht ohne weiteres zu obigen Zahlen ergänzt werden, da er stark von der Betriebsart und der Anzahl Betankungen bzw. dem H₂-Bedarf abhängt. Nähere Betrachtungen zum Energieverbrauch des Vorkühlsystems – bei der Betankung sowie im stand-by – werden im Projekt ‚eHF‘ angestellt, welches im 2017 gestartet wurde und ebenfalls vom BFE unterstützt wird. Erste Messungen zeigen, dass der durchschnittliche stand-by Verbrauch der Vorkühlung bei zirka 1 kW_{el} liegt.

Ebenfalls nicht berücksichtigt in obigen Darstellungen sind Auswirkungen von Last- oder Drehzahländerungen an den Komponenten. Allerdings haben solche Änderungen grösstenteils auch einen relativ geringen Einfluss auf den Energieverbrauch. Der im *move* eingesetzte Elektrolyseur weist im Lastbereich von ca. 30 – 100% eine nahezu konstante Umwandlungseffizienz auf. Wird der Elektrolyseur jedoch unter 30% Last betrieben, steigt der spezifische Verbrauch rasch deutlich an.



Im Jahr 2017 wurde das BZ-Fahrzeug der Empa auf Basis verschiedener Standard-Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand vermessen. Die Prüfstandsdaten und auch die Daten aus dem Monitoring des Realbetriebs wurden in Form von ersten Auswertungen zum Kraftstoffverbrauch analysiert. Detaillierte Auswertungen sind für 2018 geplant. Die ersten Auswertungen deuten darauf hin, dass der im Testzyklus WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle) gemessene Kraftstoffverbrauch in etwa mit dem Verbrauch aus dem Monitoring des Realbetriebs übereinstimmt. Dies deckt sich mit Messungen, welche an anderen elektrifizierten Fahrzeugen im Rahmen des Projektes „ESMOBIL-RED“ durchgeführt wurden. Im Vergleich zum Testzyklus NEDC (New European Driving Cycle) liegt der Kraftstoffverbrauch jedoch erwartungsgemäss höher. Der WLTC wurde im September 2017 eingeführt und wird in den kommenden Jahren den NEDC ersetzen.

Folgende Tabelle erlaubt einen Vergleich der Verbrauchsdaten zum Testfahrzeug Hyundai ix35 FC aus Fahrzyklen und Realbetrieb.

Datenquelle	Kraftstoffverbrauch [kg/100km]
Hersteller (NEDC)	0.95
Prüfstandsmessungen (WLTC)	1.24
Monitoring Hyundai Empa	1.20

Tab. 4 Verbrauchsdaten zu Hyundai ix35 Fuel Cell aus Fahrzyklen und Realbetrieb

Realverbrauchsdaten von nur einem Fahrzeug erlauben grundsätzlich keine statistisch relevanten Aussagen. Das Fahrzeug der Empa wurde allerdings als Dienstwagen eingesetzt und von vielen verschiedenen Personen gefahren, sodass obige Zahl dennoch als Durchschnittsverbrauchswert angesehen werden kann.

Im Rahmen von ersten Auswertungen wurde zudem die Abhängigkeit des Verbrauchs von der Umgebungstemperatur untersucht. Dazu wurden WLTC-Messungen bei den Temperaturen 0°C, 14°C, 23°C (=Standard) und 30°C durchgeführt. Während der Einfluss der Umgebungstemperatur bei betriebswarmer Brennstoffzelle erwartungsgemäss gering ist, spielt die Temperatur vor allem beim Kaltstart eine Rolle. Wird das Fahrzeug bei 0°C mit ‚kalter‘ Brennstoffzelle gestartet, dauert es im Zyklus zirka 15 bis 20 min bis die Brennstoffzelle ihre Betriebstemperatur erreicht. Tiefe Betriebstemperaturen führen zu einer Hemmung der Reaktionskinetik und damit zu einer Erhöhung der Überspannung in der Brennstoffzelle. Dies wiederum führt zu einem H₂-Verbrauch, welcher im Vergleich zu einem warmgestarteten Zyklus um ungefähr 17% höher liegt.

In weiterführenden Auswertungen sollen die Unterschiede von Sommer- und Winterverbrauch eruiert werden. Da die Wärme für den Fahrgastraum des Hyundai ix35 FC über eine elektrische Widerstandsheizung bereitgestellt wird, ist in den Wintermonaten ein erhöhter Realverbrauch zu erwarten. Dieser Zusatzverbrauch ist in obigen Jahresdurchschnitt-Realverbrauchswerten bereits enthalten. Wenn in Zukunft die Abwärme der Brennstoffzelle für Heizzwecke verwendet wird, kann der durchschnittliche Realverbrauch folglich gesenkt werden.



Nationale Zusammenarbeit

Zusammenarbeit mit Industriepartnern (mit finanzieller Beteiligung)

- H2 Energy Erfahrungsaustausch bezüglich Planung, Realisierung und Einhaltung von gesetzlichen Bestimmungen beim Bau, Betrieb und Wartung von H₂-Tankstellen
- Hyundai Erfahrungsaustausch bezüglich Nutzung von BZ-Fahrzeugen und Tankstellen

Zusammenarbeit mit Projektpartnern (ohne finanzielle Beteiligung)

- Metas Erfahrungsaustausch bezüglich Eichmessungen von H₂-Zapfsäulen
Zudem: mit Metrologischen Instituten aus weiteren europäischen Ländern wurde im Jahr 2017 das EU-Projekt „MetroHyVe“ gestartet, welches unter anderem die Themen „Eichung“ und „H₂-Reinheit“ von H₂-Zapfsäulen adressiert. Metas und Empa sind an diesem Projekt beteiligt (Metas hat die Leitung eines Arbeitspakets)
- Stäubli Kontakte in Bezug auf die Lecktest-Vorrichtung (Stutzen und Kupplung)

Erfahrungsaustausch mit H₂-Tankstellenbetreibern

Es besteht ein aktiver Erfahrungsaustausch mit den Betreibern der übrigen H₂-Tankstellen in der Schweiz. Namentlich:

- Hunzenschwil, H₂-Energy/Coop -> in AP2 integriert
- Martigny, EPFL

Neben bilateralen Kontakten findet ein regelmässiges Treffen (Erfahrungsaustausch-Gruppe) zum Thema Power-to-Gas statt, welches von der Hochschule Rapperswil organisiert wird. Neben der Produktion von strombasierten Kraftstoffen, werden dabei auch Erfahrungen zu deren Betankung ausgetauscht. Die Vertreter der Tankstellen Hunzenschwil und Martigny nehmen ebenfalls an diesen Treffen teil.

Ein intensiver Erfahrungsaustausch mit anderen Tankstellen- und PtX-Anlagen-Betreibern findet zudem über das Projekt *CEDA* (SCCER JA) statt, welches Anfang 2017 gestartet wurde.

Anlagenbesichtigungen

Als Teil der Power-to-Gas Demonstrationsanlage *move* wird die H₂-Tankstelle der Empa mehrmals wöchentlich von Vertretern aus Industrie, Wissenschaft und Politik besucht. Im Schnitt liegen die Besucherzahlen bei ca. 150 Personen pro Monat.

Im Rahmen des Vorgänger-Projektes „Future Mobility“ wurde eine 3D-Visualisierung der Anlage erstellt, welche vor Ort über einen Touchscreen und auf der Empa Webpage abrufbar ist (siehe [2]). Über die Visualisierung können Interessierte Informationen zur Funktion der Anlage und Ihrer einzelnen Komponenten sowie demnächst auch aktuelle Betriebswerte (PV-Output, Produktion Elektrolyse, ...) abrufen. Die Visualisierung umfasst auch die Komponenten für die Betankung bei 70 MPa.

Im 2017 wurde zudem eine Station für den „Umweltveloweg“ errichtet, welcher an der Empa vorbeiführt. Die Station ist unmittelbar vor dem *move* platziert und stellt ein familienfreundliches Buch bereit, welches die Anlage auf einfache Weise erklärt.



Internationale Zusammenarbeit

Erfahrungsaustausch mit H₂-Tankstellenbetreibern

Auch mit Betreibern von H₂-Tankstellen im Ausland bestehen Kontakte und es werden gelegentlich Erfahrungen ausgetauscht. Beispielsweise:

- Freiburg (DE), Fraunhofer ISE
- Bozen (IT), Institut für innovative Technologien (IIT)

Erfahrungsaustausch mit Graforce Hydro GmbH & Schulz Systemtechnik (DE)

Die Graforce Hydro GmbH erhielt kürzlich eine positive Rückmeldung vom BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) zu einer eingereichten Projektskizze, welche die Inhalte des Projektes „CombiFuel“ festhält. Die Empa übernimmt eine Beratungsfunktion in diesem Projekt, welches im Themenbereich Power-to-Gas und Betankung gasförmiger Kraftstoffe angesiedelt ist.

Über das im 2017 gestartete eHF-Projekt bestehen zudem Kontakte zu Schulz-Systemtechnik, welche ihr Tätigkeitsfeld im Anlagenbau erweitern und sich Kompetenzen zur Realisierung von H₂-Tankstellen erarbeiten. Schulz-Systemtechnik baut unter anderem die Anlage für Graforce Hydro.

Wenger Engineering GmbH (DE)

Kontakte bestehen auch zu Wenger Engineering, welche unter anderem eine hohe Kompetenz in der Betankung von gasförmigen Kraftstoffen aufweisen (Mitwirkung bei der Erstellung der SAE-Norm 2601 [1]).

TME - Toyota Motor Europe (Belgien)

Vertreter von TME besuchten die Empa im September 2017. Bei Testfahrten auf Schweizer Strassen mit dem BZ-Fahrzeug Mirai betankten sie ihre Fahrzeuge in Hunzenschwil und an der Empa. Während den Betankungen wurden von TME und der Empa Messungen durchgeführt, welche im Anschluss ausgetauscht wurden.

Projekt MetroHyVe (siehe auch Nationale Zusammenarbeit Abschnitt Metas)

Das EU-Projekt MetroHyVe zielt auf die Reduktion bzw. Beseitigung von weltweit bestehenden Hindernissen für eine Verbreitung der H₂-Mobilität ab. Insbesondere stehen die Erreichung der Eichfähigkeit für H₂-Zapfsäulen (siehe AP3 C) sowie die Überprüfung der Reinheit des an den Zapfsäulen abgegebenen H₂ im Mittelpunkt. Die Empa nimmt zusammen mit 20 weiteren Instituten und Firmen aus Europa an diesem Projekt teil.

<http://www.metrohyve.eu/>



Bewertung 2017 und Ausblick 2018

Die für das Jahr 2017 geplanten Arbeiten im Arbeitspaket 3 konnten nicht alle abgeschlossen werden. Nichtsdestotrotz konnten in den Teilpaketen B und C wichtige Fortschritte verzeichnet werden. Insbesondere führten Besprechungen und Abklärungen mit der SUVA dazu, dass mit dem Lösungsansatz „Lecktest bei Beginn der Betankung“ eine Möglichkeit zur Aufhebung der Ex-Zonen bei H₂-Zapfsäulen gefunden werden konnte. Erste Messungen zeigen bereits, dass Lecks durch eine Standard-Zapfsäulensteuerung erkannt werden und zum Abbruch der Betankung führen. Konzeptionierung und Komponentenbeschaffung für eine Lecktestvorrichtung, welche ausführliche und reproduzierbare Messungen erlaubt, wurden im 2017 durchgeführt. Die Durchführung der ausführlichen Messungen ist im 2018 geplant.

Hinsichtlich Teilpaket C stellte die Beschaffung der benötigten Zulassungsdokumente für die Eichvorrichtung eine Herausforderung dar und führte zu erheblichen Verzögerungen. Das Design wurde im 2017 zur Bauartprüfung bei ElectroSuisse eingereicht, sodass im Frühjahr 2018 die Vorrichtung fertiggestellt und erste Messkampagnen durchgeführt werden können. Die Komponenten für die Eichvorrichtung (Waage, Druckbehälter, Gestellprofile, etc.) wurden mittlerweile geliefert und es konnte mit dem Aufbau des Gestells begonnen werden.

Im Rahmen der Arbeitspakete 4 und 5 konnten im 2017 mit Hilfe des ausgedehnten Monitorings von Anlagenkomponenten und BZ-Fahrzeug wichtige Daten und Erkenntnisse gewonnen werden. Insbesondere wurden Daten für eine Analyse des Energiepfades von erneuerbarem Strom bis zur mechanischen Leistung am Rad ausgewertet (well-to-wheel Bilanz). Wirkungsgrade und energetische Verluste der einzelnen Komponenten wurden für die Anlage *move* messtechnisch und für eine Anlage industrieller Grösse auf der Basis von Literaturdaten und Herstellerangaben bestimmt.



Referenzen

- [1] SAE J2601 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles, SAE International, 2014
- [2] <https://www.empa.ch/web/move> (3D-Visualisierung *move*)



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
BZ	Brennstoffzelle
CAD	Computer Aided Design (Computer-unterstützte Konstruktion)
CMA	Coop Mineralöl AG
Ex-Zone	Explosionsschutz-Zone
H ₂	Wasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybridelektrisches Fahrzeug)
LKW	Lastkraftwagen
MPa	Megapascal (1 MPa = 10 bar)
NGV	Natural Gas Vehicle (Erdgas/Biogas Fahrzeug)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in Hybridelektrisches Fahrzeug)
PW	Personenwagen



Anhang

(keine Anlagen)