



Jahresbericht vom 13. November 2018

70 MPa H₂-Tankstellen

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





Datum: 13 November 2018

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 70MPa H ₂ -Tankstelle an der Empa	5
1.2. AP2: Planung und Realisierung der 70/35 MPa H ₂ -Tankstelle in Hunzenschwil	7
1.3. AP3: Klärung rechtlicher Fragen zu Errichtung und Betrieb von H ₂ -Tankstellen	8
1.3.1. AP3 A: Genehmigungsverfahren von H ₂ -Tankstellen in der Schweiz	8
1.3.2. AP3 B: Untersuchungen zur Ex-Zonenregelung an H ₂ -Zapfsäulen	12
1.3.3. AP3 C: Erlangung der Eichfähigkeit für H ₂ -Zapfsäulen	19
1.4. AP4: Monitoring des H ₂ -Verdichters, der Speicher und des Anlagenbetriebs.....	26
1.5. AP5: Betrieb und Monitoring der Brennstoffzellen Fahrzeuge.....	26
Nationale Zusammenarbeit	27
Internationale Zusammenarbeit	28
Bewertung 2018 und Ausblick 2019	29
Referenzen	30
Abkürzungsverzeichnis	31
Anhang	32



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

Die Aktivitäten im Rahmen des „70 MPa H₂-Tankstellen“-Projektes konzentrierten sich im Jahr 2018 vor allem auf das Arbeitspaket 3, welches auf die Klärung von rechtlichen und regulatorischen Fragen zum Aufbau von H₂-Tankstellen abzielt.

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

Die Planung und Realisierung der 70MPa H₂-Tankstelle an der Empa wurde mit der Inbetriebnahme im Juli 2016 erfolgreich abgeschlossen. Die dabei ausgeführten Tätigkeiten sind im entsprechenden Jahresbericht festgehalten. Seit 2017 beschränken sich die Arbeiten im Rahmen dieses Arbeitspaketes somit vor allem auf Wartung und Reparaturen an der Anlage. Die Hauptpunkte der jährlichen Wartung der 70MPa Tankstellenkomponenten (Verdichter, Hochdruckspeicher, Vorkühlung, Zapfsäule) wurden bereits im vorangehenden Jahresbericht zusammengestellt.

Während an der H₂-Tankstelle der Empa im Jahr 2017 trotz hoher Verfügbarkeit immer wieder Ausfälle zu beklagen waren (siehe Jahresbericht), benötigte die Aufrechterhaltung des Tankstellenbetriebs im 2018 deutlich weniger Aufmerksamkeit. Die Kinderkrankheiten konnten somit mittlerweile ausgemerzt werden und Arbeiten an der Anlage beschränken sich auf die geplanten Wartungseinsätze und Messkampagnen.

Das im vierten Quartal 2017 realisierte Lärmschutzkonzept für den 70MPa-Verdichter wurde Anfang 2018 durch die Firma Prose vermessen. Das Konzept beinhaltet die elastische Lagerung des Verdichters sowie eine schalldämmende Kapselung, wodurch eine Reduktion des Schalldruckpegels um 15 dB erreicht werden soll.



Abb. 1 Messung des Schalldruckpegels im Anlagenbetrieb (Bild: Prose AG)



Messungen von Prose mit einem kalibrierten Schallpegelmessgerät auf der gegenüberliegenden Strassenseite vor dem *move* ergaben folgende Werte:

- Umgebungsgeräusche ohne Verdichter: 48.7 dB(A)
- 70MPa-Verdichter alleine: 52.6 dB(A)
- 70MPa-Verdichter ohne Kapselung: 63.3 dB(A)
- Kühlkompressor alleine: 55.4 dB(A)
- 70MPa-Verdichter und Kühlkompressor: 54.9 dB(A)

Die Reduktion des Schalldrucks durch die Kapselung liegt somit bei 10.7 dB. Der angestrebte Wert von 15 dB wurde nicht erreicht, was darauf zurückzuführen ist, dass die sehr engen Platzverhältnisse und zahlreichen Durchführungen von Leitungen zum Verdichter die Umsetzung einer effektiven Kapselung erschweren. Die Messungen zeigen allerdings auch, dass die Lärmemissionen des Verdichters mit Kapselung auf das Niveau des Kühlkompressors gesenkt werden konnten und dass eine weitere Reduktion ohnehin Massnahmen an beiden Komponenten erfordern würde. Der Kühlkompressor ist Teil der Vorkühleinheit für die Konditionierung des Wasserstoffs auf -40°C bei der Betankung und ist in periodischen Zeitabständen jeweils für wenige Minuten in Betrieb.

Anstrengungen zur weiteren Lärminderung sind nicht vorgesehen. Die Reduktion um über 10 dB ist bereits ausreichend und auch sehr deutlich wahrnehmbar. Zudem werden nun die Immissionsgrenzwerte für eine Zone III (Wohnen/Gewerbe) gemäss Lärmschutzverordnung LSV bereits in unmittelbarer Nähe des *move* eingehalten.

Empfindlichkeitsstufe (ES)		Planungswert (PW) In dB(A)		Immissionsgrenzwert (IGW) In dB(A)		Alarmwert (AW) In dB(A)	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
I	Erholung	50	40	55	45	65	60
II	Wohnen	55	45	60	50	70	65
III	Wohnen/Gewerbe	60	50	65	55	70	65
IV	Industrie	65	55	70	60	75	70

Abb. 2 Grenzwerte für Lärmimmissionen für verschiedene Zonen (Quelle: BAFU)

Der Nutzerkreis der 70 MPa Zapfsäule hat sich auch im Jahr 2018 vergrössert. Die Anzahl Brennstoffzellen-Fahrzeuge ist von 13 auf 15 angestiegen, wobei einige wenige Fahrzeuge lediglich für Vorführungen und Veranstaltungen eingesetzt werden. Das Gros der Fahrzeuge wird aber im gewöhnlichen Alltagsgebrauch eingesetzt. Mit dem Toyota Mirai ist seit 2018 neben dem Hyundai ix35 FC neu ein weiteres Brennstoffzellen-Modell regelmässig zur H₂-Betankung an der Empa. Die Modelle Mercedes F-Cell B-Klasse und Hyundai Nexo wurden ebenfalls bereits an der Empa-Tankstelle mit Wasserstoff befüllt.

Die an der Tankstelle aufgezeichneten Daten wurden für die Monate Januar bis Oktober ausgewertet und linear für das gesamte Jahr hochskaliert. Im Durchschnitt wurden im 2018 wiederum etwas mehr als eine Betankung pro Tag (bei Nenndruck 70 MPa) durchgeführt. Die betankte Menge betrug hochskaliert auf das Gesamtjahr zirka 1.2 Tonnen Wasserstoff. Unter Verwendung des im letztjährigen Jahresbericht eingeführten Vergleichsfahrzeugs (Hyundai ix35 mit 1.6 GDi Benzinmotor), ergaben sich 2018 folgende Werte hinsichtlich vermiedenen Benzinverbrauchs und CO₂-Emissionen:

- 8'600 Liter Benzin eingespart¹
- 20 Tonnen (lokale) CO₂-Emissionen verhindert¹

Die Rechnung zur CO₂-Vermeidung basiert dabei 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).

1.2. 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 entsprechenden Jahresbericht festgehalten.

Wie im Vorjahr lag die Verfügbarkeit der Tankstelle auch im 2018 auf hohem Niveau und es traten kaum Ausfälle auf.

Der Nutzerkreis der Tankstelle blieb im Vergleich zum Vorjahr faktisch unverändert. Daten zum Nutzungsprofil liegen für die Monate von April bis Oktober vor. Eine Hochrechnung auf das gesamte Jahr ergibt für die Betankung bei 70 MPa eine Wasserstoffmenge von ca. 3 Tonnen, was dem letztjährigen Wert entspricht. Die Anzahl Betankungen pro Tag liegt im Schnitt bei 3.6. Mit 2.2 Tonnen ergab sich eine starke Zunahme der betankten Wasserstoffmenge für die Betankung bei 35 MPa (Vorjahr: 0.4 Tonnen). Am Wasserstoff-LkW konnten mittlerweile diverse Mängel behoben werden, sodass dessen Einsatzzeit im Vergleich zum Vorjahr deutlich anstieg.

Werden lediglich die Betankungen bei 70 MPa betrachtet, ergeben sich in einem Vergleich zum Benzinfahrzeug für das 2018 somit die gleichen Einsparungen wie im Vorjahr:

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

Für den Vergleich gelten die in vorangehendem Kapitel erläuterten Bedingungen.

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)



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

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

Im Rahmen des Aufbaus der Wasserstofftankstellen an der Empa (AP1) und in Hunzenschwil (AP2) konnten wertvolle Erfahrungen zum Genehmigungsprozess in der Schweiz gesammelt werden. Durch die Projektpartnerschaft mit H₂ Energy stehen zudem Informationen zu den Bewilligungsverfahren der weiteren von Coop geplanten Wasserstofftankstellen zur Verfügung. Bei den Verfahren für die Coop-Tankstellen sowie auch für die Tankstelle an der Empa war die CE-Stelle «TÜV Thüringen Schweiz AG» involviert, weshalb sie für die Erstellung des geplanten Leitfadens zum Aufbau von Wasserstofftankstellen beigezogen wurde.

Neben verschiedenen bilateralen Treffen und Korrespondenzen fand im April 2018 eine Sitzung statt, an der Vertreter von TÜV Thüringen Schweiz, SVGW, VKF und Empa teilnahmen. Ziel des Treffens war die Klärung des Vorgehens zur Erstellung einer Genehmigungshilfe für Tankstellenbauer und Behörden, sowie das Ausloten von Möglichkeiten zur Harmonisierung von kantonal unterschiedlichen Regularien. Erfahrungen mit den Bewilligungsverfahren der bislang noch wenigen Wasserstofftankstellen haben gezeigt, dass kantonal unterschiedliche Anforderungen zum Aufbau der Tankstellen zu deutlichem administrativem Mehraufwand und einer Verzögerung der Verfahren führen können. In der Sitzung wurde beschlossen folgende beiden Dokumente zu erstellen, um den bestehenden Herausforderungen zu begegnen:

Leitfaden

<i>Ausgangslage</i>	<i>Tankstellenbauer- und betreiber besitzen vielfach wenig oder nur unzureichendes Wissen in Bezug auf die Vielfalt an Regularien, welche beim Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelle beachtet werden müssen. Auch von behördlicher Seite ist der Genehmigungsprozess eine Herausforderung, da auf diesem Gebiet noch kaum auf Erfahrungen zurückgegriffen werden kann.</i>
<i>Ziel</i>	<i>Mit Hilfe eines Leitfadens im Sinne einer Schritt-für-Schritt-Anleitung bzw. im Sinne eines Rezeptes sollen die zur Einhaltung von Regularien relevanten Schritte beim Aufbau einer neuen Wasserstoff-Tankstelle übersichtlich festgehalten werden. Für Deutschland besteht bereits ein entsprechendes Dokument, welches von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NOW herausgegeben wurde und für den Schweizer Leitfaden als Vorlage dienen soll (http://www.h2-genehmigung.de/). Zum Beispiel wird festgehalten, zu welchem Zeitpunkt im Realisierungsprozess einer Tankstelle welche Behörde angegangen werden muss.</i>
<i>Involviert</i>	<i>Empa / Erdölvereinigung / ESTI / IVA / SSC / Suva / SVGW / SVS / SVTI / TÜV Thüringen / VKF (in alphabetischer Reihenfolge)</i>

Merkblatt

Ausgangslage *Kantonal unterschiedliche Vorschriften zum Aufbau von Wasserstoff-Tankstellen erschweren Planung und Realisierung von Wasserstoff-Tankstellen. Insbesondere aufgrund fehlender Erfahrungen und da es keine Möglichkeit gibt auf ein für diesen Anwendungsfall eindeutiges Dokument zurückzugreifen, ergeben sich bezüglich der Anforderungen oft kantonale Unterschiede. Zum Beispiel in Bezug auf Brandschutzabstände.*

Ziel *Vereinheitlichung der kantonalen Vorschriften zu Wasserstoff-Tankstellen im Bereich Brandschutz. Die Tankstellen-spezifischen Vorschriften sollen in einem Merkblatt zusammengefasst werden (Brandschutz und Ex-Schutz). Dieses könnte beispielsweise auf der EKAS-Richtlinie für Flüssiggas basieren, wobei z.B. die Schutzabstände durch Faktoren angepasst werden, welche die physikalischen Unterschiede der beiden Energieträger berücksichtigen.*

Involviert *Empa / Suva / SVGW / SVS / TÜV Thüringen / VKF (in alphabetischer Reihenfolge)*

Es ist vorgesehen, dass mit Hilfe eines Merkblatts insbesondere die Brandschutzabstände auf nationaler Ebene vorgegeben werden. Des Weiteren soll das Merkblatt auch die Anpassungen im Bereich der Ex-Zonenregelung aufnehmen, welche im Rahmen des AP3 B erarbeitet werden. Dieses Vorgehen wurde bereits mit der Suva abgesprochen. Die Veröffentlichung der finalen Version des Merkblatts soll über den VKF erfolgen. Die vom VKF publizierten Merkblätter zur Umsetzung der Brandvorschriften haben interkantonale Gültigkeit. Das Vorhaben zur Erstellung von Leitfaden und Merkblatt wurde von der Technischen Kommission Brandschutz (TKB) des VKF in einer Sitzung im Juli 2018 behandelt. Die TKB begrüsst die Erstellung der vorgesehenen Dokumente und bot deren Prüfung hinsichtlich Übereinstimmung mit den Brandschutzvorschriften an.

Um die Akzeptanz des Leitfadens möglichst breit abzustützen und von möglichst viel Knowhow im Bereich der Genehmigungsprozesse zu profitieren, wurden diverse Behörden, Fachstellen und Organisation kontaktiert. Nachfolgend sind jene Parteien aufgelistet, welche Interesse an der Mitwirkung eines Leitfadens bekundeten (in alphabetischer Reihenfolge):

- Erdölvereinigung
- ESTI Starkstrominspektorat
- GVZ Gebäudeversicherung Kanton Zürich
- IVA Kantonale Arbeitsinspektorate
- Suva, Bereich Chemie
- SVGW / TISG
- SVS, Arbeitssicherheit
- SVTI, Kesselinspektorat
- Swiss Safety Center AG
- TÜV Thüringen Schweiz AG
- VKF Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen



In der zweiten Jahreshälfte 2018 wurde durch TÜV Thüringen Schweiz und die Empa ein erster Entwurf für den Leitfaden erstellt. Dabei wurde der Genehmigungsprozess in zwölf Schritte aufgeteilt und im Rahmen von zirka zehn A4-Seiten umschrieben. Der Entwurf enthält eine schematische Übersicht des Genehmigungsprozesses, welche in Abbildung 3 dargestellt ist.

Anfangs November 2018 wurde der Entwurf an die oben aufgelisteten Parteien verschickt. Die Korrekturvorschläge und Ergänzungen aus den einzelnen Rückmeldungen werden anschliessend zusammengetragen und wo nötig einander gegenübergestellt. Zu Beginn des Jahres 2019 soll im Rahmen einer grösseren Sitzung unter Teilnahme aller Parteien die Anpassungen abgesprochen und der Leitfaden finalisiert werden.

Für den Entwurf des Merkblatts wurden bislang Ideen gesammelt und Stichworte zusammengetragen. Die Erarbeitung einer ersten Version ist im ersten Quartal 2019 vorgesehen.

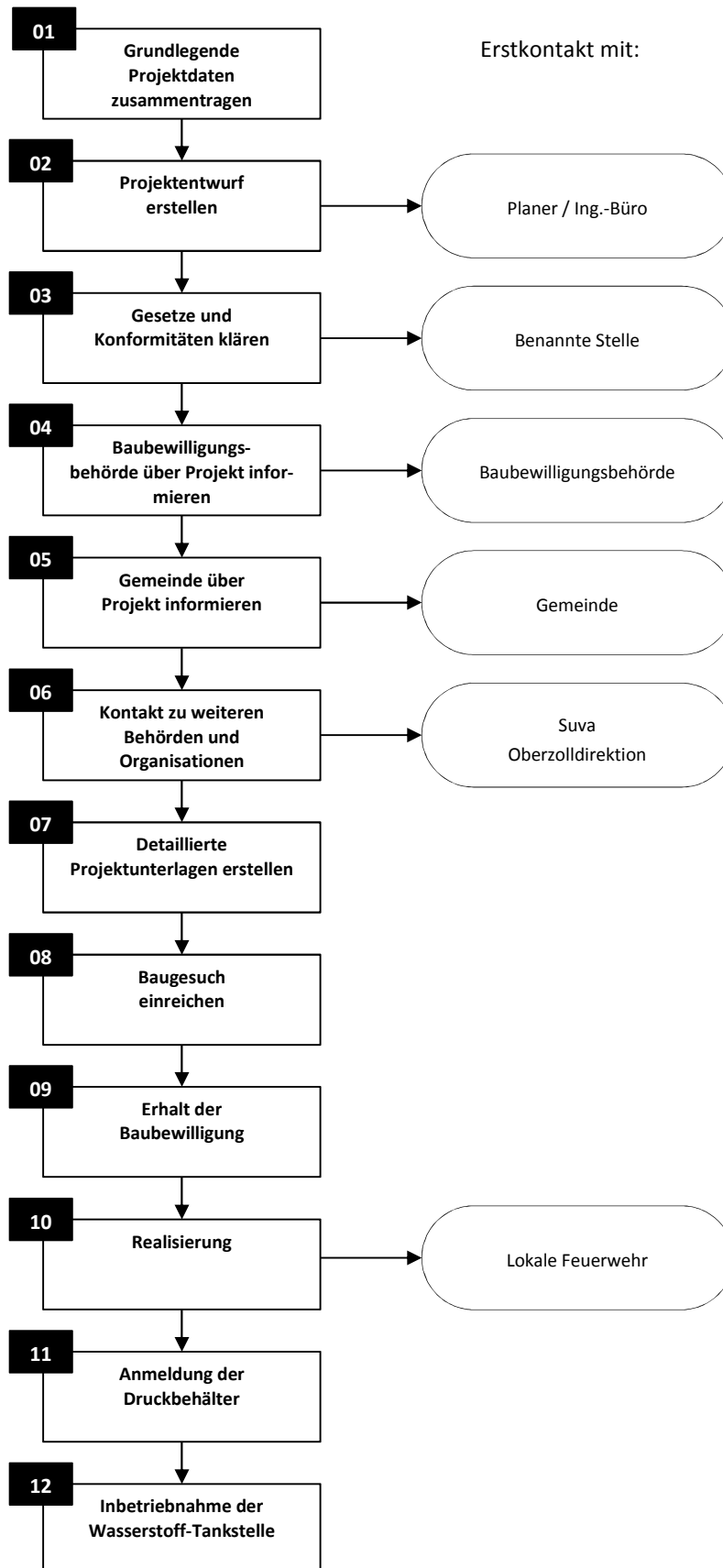


Abb. 3 Übersicht zum Genehmigungsprozess von H2-Tankstellen (Ausschnitt aus Leitfaden-Entwurf)



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 einer Sitzung vom 29.03.2017 wurde von der Suva bestätigt, dass der Ansatz «Lecktest zu Beginn der Betankung» unter bestimmten Bedingungen die Auflösung der Ex-Zone ermöglichen kann (siehe dazu Jahresbericht 2017). Die Suva fordert allerdings einen Nachweis für die Zuverlässigkeit des Lecktests, welcher mit Messungen an der Wasserstoff-Tankstelle der Empa erbracht werden soll.

Im 2017 wurden bereits Vorversuche durchgeführt, bei welchen ein Leck durch das Entfernen des Dichtungsringes am Stutzen erzeugt wurde. Da sich die Leckquerschnittsfläche bei diesem Vorgehen eher zufällig ergibt, sind die entsprechenden Messungen nur bedingt reproduzierbar. Unter Rücksprache mit der Suva und dem Projektpartner H2 Energy wurde deshalb eine Lecktestvorrichtung konzipiert, bei welcher das Leck mit Hilfe einer Blende mit vordefiniertem Querschnitt erzeugt wird. Die Teile für die entsprechende Vorrichtung wurden Ende 2017 beschafft.

Der Durchmesser der Blendenöffnungen wurde mit Hilfe nachfolgender Beziehung für Strömung kompressibler Fluide durch Düsen ermittelt.

$$\dot{m} = A C_q C_m \frac{p_{vor}}{\sqrt{T_{vor}}}$$

Wobei für Überschallströmungen gilt:

$$C_m = \sqrt{\frac{2 \gamma_s}{1 + \gamma_s} \frac{\rho_{vor} T_{vor}}{p_{vor}}} \left(\frac{2 \gamma_s}{1 + \gamma_s} \right)^{\frac{\gamma_s}{1 - \gamma_s}}$$

$\dot{m}$:	Massenstrom über Blende
A :	Querschnittsfläche der Blende
C_q :	Durchflusskoeffizient
C_m :	Massenstrom-Funktion
p_{vor} :	Druck vor der Blende
T_{vor} :	Temperatur vor der Blende
γ_s :	Kehrwert des Isentropenexponents
ρ_{vor} :	Dichte vor der Blende

Für den Massenstrom wurde dabei der von der Suva provisorisch angegebene Wert von 0.1 g/s verwendet. Um Leckmassenströme in dieser Größenordnung zu erzeugen, wurden gemäss Berechnungen mit obiger Beziehung Blenden mit Durchmessern von 20µm, 40µm, 60µm, 100µm und 200µm beschafft. Die Berechnungen sind allerdings mit Unsicherheiten behaftet. Beispielsweise hängt der Durchflusskoeffizient von Querschnitt und Massenstrom ab und muss experimentell ermittelt werden.

Aufgrund dieser Unsicherheiten wurde ein einfacher Prüfstand aufgebaut, welcher die experimentelle Überprüfung der verschiedenen Blenden durch «Ausströmversuche» ermöglichte (siehe Abbildung 4). Bei den Versuchen wurden jeweils Druck und Temperatur vor und nach dem Ausströmen gemessen, um die ausgeströmte Masse zu berechnen (pVT-Methode). Mit der für das Ausströmen benötigten Zeit kann der mittlere Massenstrom für die entsprechende Blende bei gegebenem Vordruck (Druck im Tank) ermittelt werden. Bei Versuchsbeginn lag der Druck im Tank jeweils einige 10 bar höher und bei Versuchsende einige 10 bar unter dem vordefinierten Vordruck. Je nach Vordruck und Blendendurchmesser benötigte der Ausströmvorgang zwischen 3 und 105 Minuten.

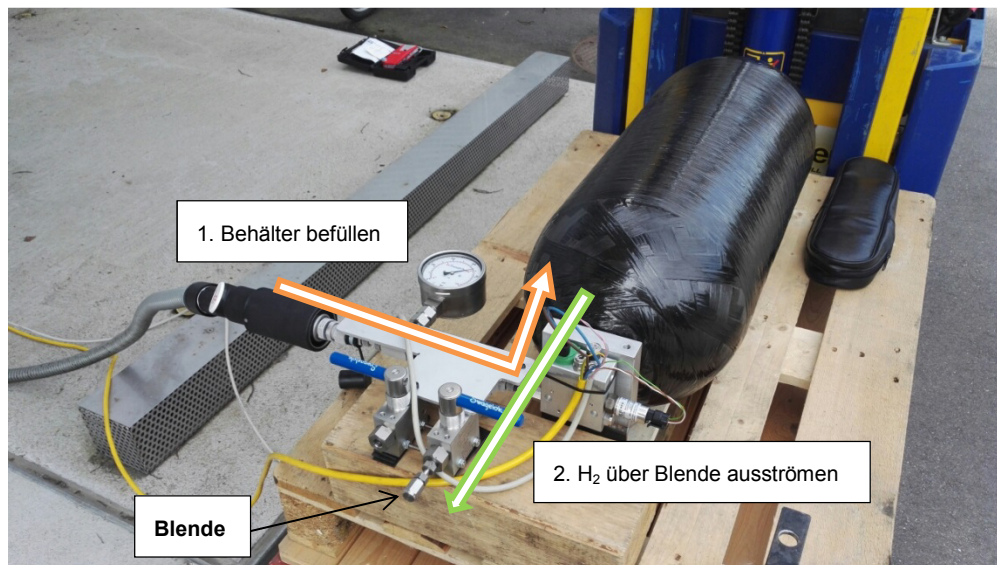


Abb. 4 «Ausströmversuche» zur experimentellen Bestimmung des Massenstroms über einer Blende

Unter anderem aufgrund der Messfehler bei Druck- und Temperaturmessungen und der lediglich approximativen Angabe zum Tankvolumen, bleibt die Genauigkeit der experimentell ermittelten Werte beschränkt. Nichtsdestotrotz stimmen Berechnungen und Messungen im Bereich der Blendendurchmesser von ca. 50µm - 200µm gut überein (siehe Anhang). Unterhalb von ca. 50µm steigt die Abweichung an. Möglicherweise ist dies auch darauf zurückzuführen, dass die Genauigkeit bei der Herstellung der Bohrungen für die Blenden bei tieferen Durchmessern abnimmt. Bohrungen mit Durchmessern unter 20µm werden vom Hersteller aus diesem Grund gar nicht angeboten.

Vor der Durchführung der eigentlichen Lecktestversuche, welche weiter unten beschrieben sind, wurde berechnet, ob ein Leck bestimmter Grösse bei vordefiniertem Druck im Fahrzeugtank von der Zapfsäulensteuerung erkannt wird oder nicht. In der Steuerung der Wasserstofftankstelle der Empa erfolgt die Prüfung auf ein Leck folgendermassen.

1. Initialisierungsschoss – Tankventil öffnet für wenige Sekunden
(stellt sicher, dass der Druck im Tankschlauch dem Fzg-Tankdruck entspricht)
2. Wartezeit 1 (z.B. 7s)
3. Erste Druckmessung im Tankschlauch
4. Wartezeit 2 (z.B. 8s)
5. Zweite Druckmessung im Tankschlauch
6. Tankabbruch falls die zweite Messung um einen vordefinierten Wert tiefer liegt als die erste

Dieser vordefinierte Wert beträgt an der Empa-Tankstelle 5 bar. Ein Leck wird folglich erkannt, wenn aus dem Leitungsvolumen zwischen Tankventil in der Zapfsäule und Fahrzeugstutzen (=Totvolumen) so viel Wasserstoff ausströmt, dass der Druck um 5 bar sinkt. Ein Rückschlagventil im Stutzen verhindert, dass Wasserstoff vom Fahrzeugtank zurück in den Tankschlauch gelangen kann.



Nachfolgende Abbildungen zeigen die Berechnungsergebnisse für das Erkennen eines Lecks in Abhängigkeit des Leckdurchmessers und des Drucks im Fahrzeugtank, welcher nach dem Initialisierungsschoss dem Druck im Tankschlauch entspricht. Die gestrichelte Linie zeigt dabei die Kombinationen von Leckdurchmesser und Tankdruck, welche zu einem Druckabfall im Tankschlauch von 5 bar führen. Das heisst dass alle Kombinationen links unterhalb der gestrichelten Linie nicht als Leck erkannt werden. Alle Kombinationen rechts oberhalb führen zu einem höheren Druckabfall als 5 bar und damit zu einem Erkennen des Lecks und zum Abbruch der Betankung. Beispielsweise führt die Kombination eines Lecks mit dem Durchmesser von 90 μm und einem Fahrzeugtankdruck von 62 bar zu einem Druckabfall von 5 bar (siehe mit grauen Linien markierter Punkt). Analog den Ausströmversuchen wurde die gestrichelte Linie ebenfalls mit der pVT-Methode ermittelt. Für das Volumen wurde das Totvolumen der Empa Tankstelle eingesetzt, welches ca. 22 l beträgt.

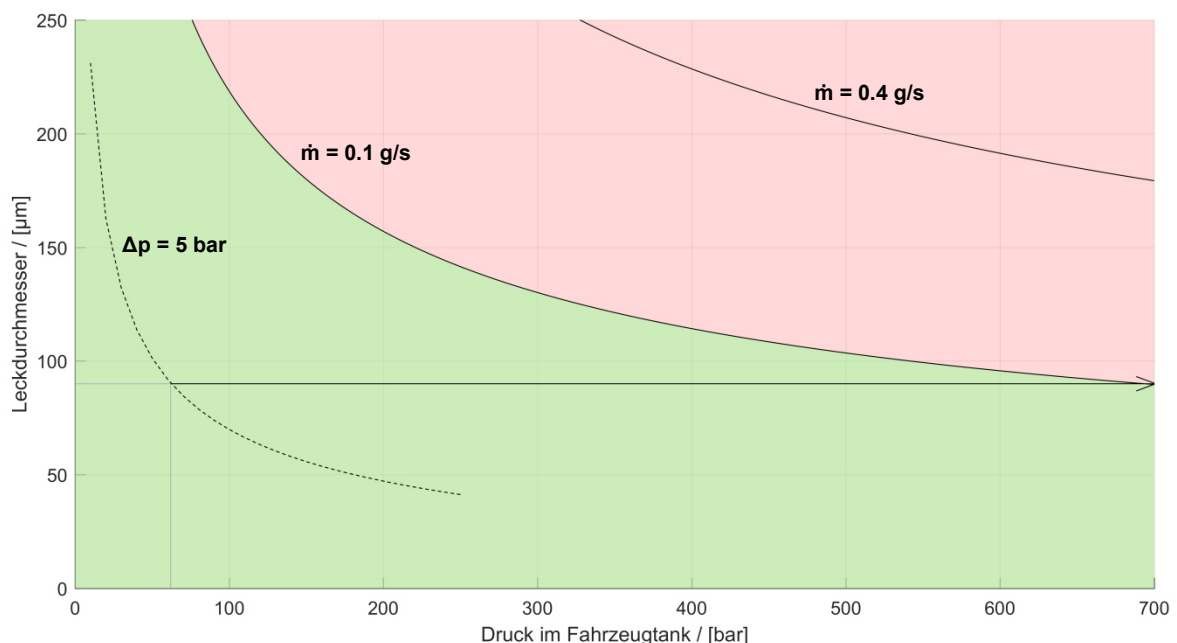


Abb. 5 Leckdurchmesser in Abhängigkeit des Tankdrucks für eine Druckabnahme im Tankschlauch um 5 bar (gestrichelt) und für einen Leckmassenstrom von 0.1 g/s bzw. 0.4 g/s (ausgezogen) inkl. Horizontale bei 90 μm

Die ausgezogenen Linien zeigen die Kombination von Leckdurchmesser und Tankdruck, welche zu einem Massenstrom von 0.1 g/s bzw. 0.4 g/s führen. Es handelt sich dabei um mögliche Grenzwerte für den Leckmassenstrom, welcher zu keiner Zeit überschritten werden darf. Die Werte gründen auf einem dichte-basierten bzw. energie-basierten Vergleich mit Methan, bei welchem ein Grenzwert von 1 g/s gilt.

Mit voranschreitender Betankung steigen der Druck im Fahrzeugtank und damit auch der Leckmassenstrom bei gleichbleibendem Leckdurchmesser. Für die Einhaltung der Grenzwerte ist folglich der Leckmassenstrom bei maximalem Tankdruck entscheidend. Da sich der maximale Tankdruck am Ende einer Betankung unter anderem in Abhängigkeit von Startdruck und Umgebungstemperatur ändert, wurde im Rahmen der Berechnungen der Standarddruck 700 bar als maximaler Tankdruck betrachtet. Für den in Abbildung 5 gezeigten Fall, darf das Leck folglich maximal einen Durchmesser von 90 μm aufweisen, damit der Grenzwert von 0.1 g/s am Ende der Betankung (als schwarzer Pfeil dargestellt) nicht überschritten wird. Im grünen Bereich liegt der Massenstrom für jede Kombination aus Leckdurchmesser und Tankdruck unter diesem Grenzwert.

Besteht ein Leck mit einem Durchmesser grösser als 90 μm , ist dies lediglich problematisch, wenn das Leck nicht erkannt werden kann. Dies trifft zu, sobald der Fahrzeugtankdruck zu Beginn der Betankung zu niedrig ist (Kombination liegt links unterhalb der gestrichelten Linie und oberhalb der horizontalen Linie für den Leckdurchmesser von 90 μm).

Wird ein Grenzwert von 0.4 g/s herangezogen, beträgt der maximale Leckdurchmesser 179 μm . Dieses Leck wird bereits ab einem Fahrzeugtankdruck von 17 bar erkannt (Abbildung 6). Es ist zu beachten, dass der Lecktest nur zu Beginn der Betankung durchgeführt wird (gilt für Empa-Tankstelle). Für die Leckerkennung ist somit ausschliesslich der Tankdruck zu Beginn der Betankung entscheidend.

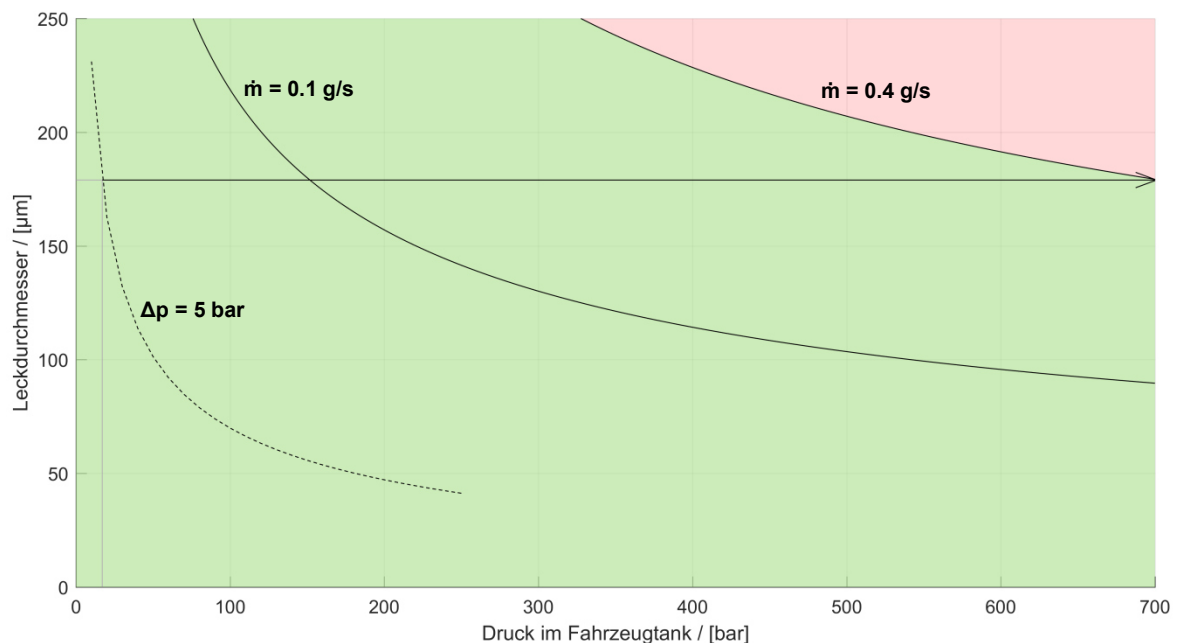


Abb. 6 Leckdurchmesser in Abhängigkeit des Tankdrucks für eine Druckabnahme im Tankschlauch um 5 bar (gestrichelt) und für einen Leckmassenstrom von 0.1 g/s bzw. 0.4 g/s (ausgezogen) inkl. Horizontale bei 179 μm

Mit der im 2017 konzipierten Lecktestvorrichtung (Abbildung 7) wurden mehrere Messreihen durchgeführt, um obige Berechnungen zu überprüfen. Die finalen Messungen fanden am 03.10.2018 unter Anwesenheit der Suva statt. Dabei wurde ein Prüfstand mit einem einzelnen Druckspeicher verwendet, welcher das zu betankende Fahrzeug simulierte. Die Lecktestvorrichtung befand sich zwischen

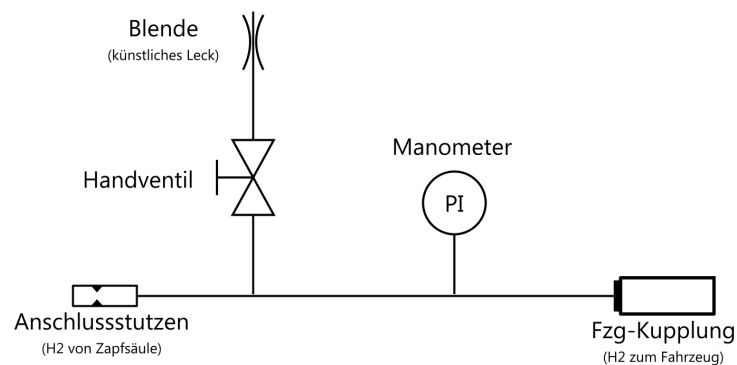


Abb. 7 P&ID der Lecktestvorrichtung mit einer Blende zur Erzeugung eines reproduzierbaren Lecks



Zapfpistole und Fahrzeugtank und wurde abwechselnd mit den verschiedenen Blenden bestückt. Der Druck im Fahrzeugtank wurde jeweils auf vordefinierte Werte eingestellt.

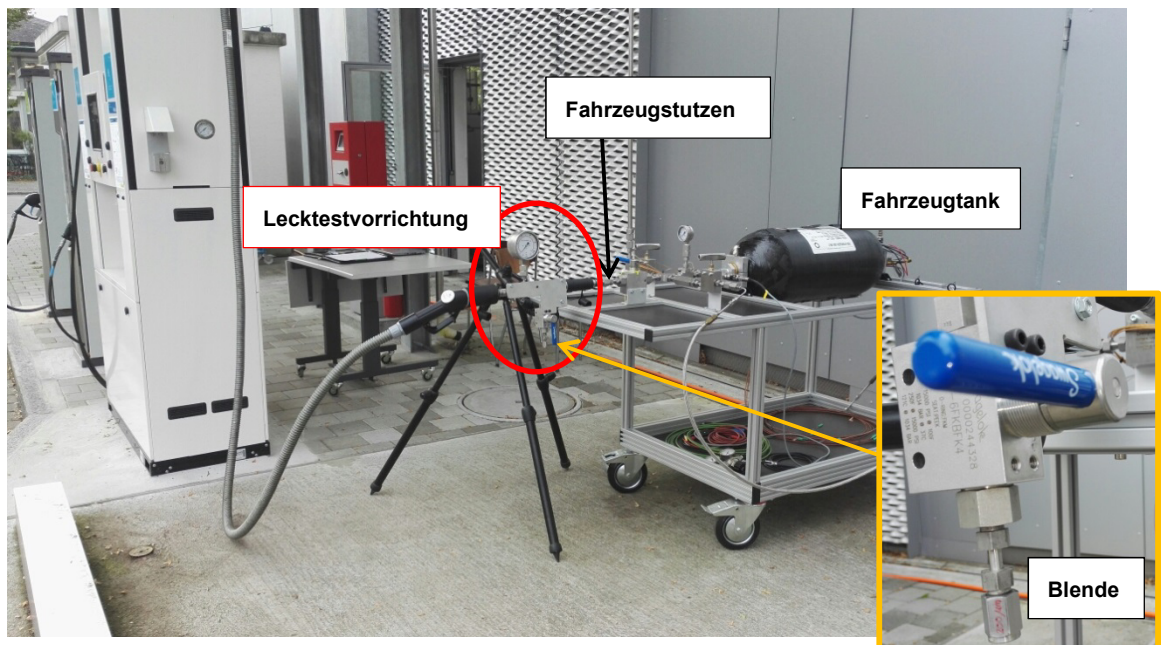


Abb. 8 Foto der Einrichtung für die Durchführung der Lecktestversuche

Insgesamt wurden 20 Testbetankungen ausgewertet, welche in nachfolgender Abbildung mit grünen und roten Markierungen dargestellt sind. Bei Betankungen mit grüner Markierung konnte das Leck durch die Zapfsäulensteuerung erkannt werden und der Vorgang wurde abgebrochen. Rote Markie-

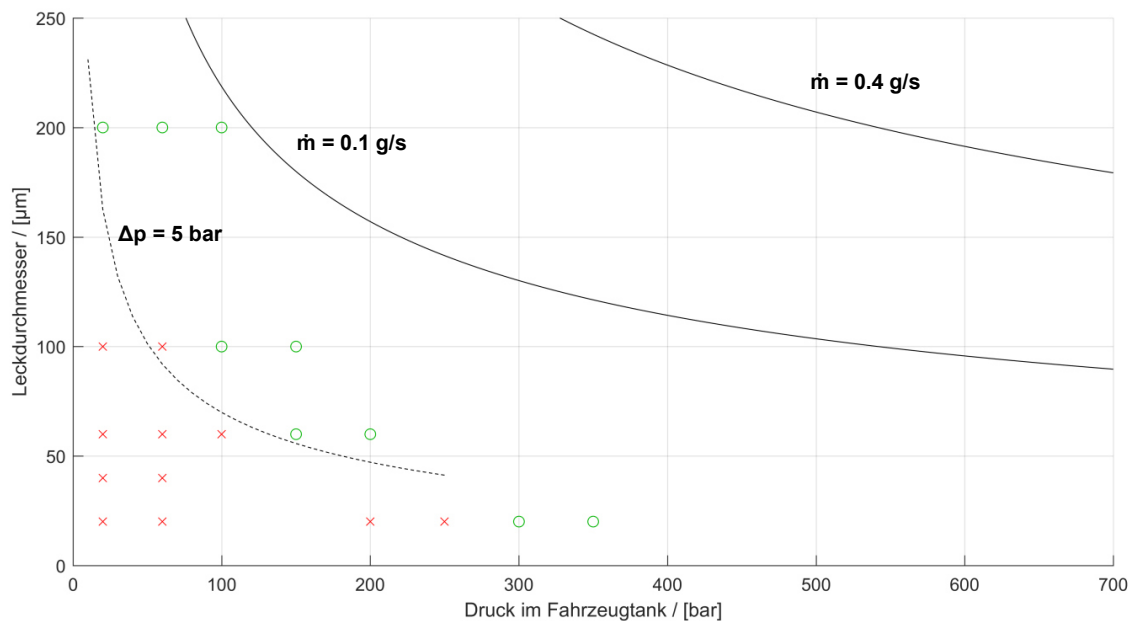


Abb. 9 Auswertung der 20 Testbetankungen; Leck erkannt = grün, Leck nicht erkannt = rot

ungen stehen für Betankungen, bei welchen das Leck nicht festgestellt werden konnte. Sämtliche roten Markierungen sollten links unterhalb und sämtliche grünen Markierung rechts oberhalb der gestrichelten Linie liegen. Aufgrund der bereits weiter oben beschriebenen Unsicherheiten bei den Berechnungen und den durchgeführten Messungen sind Abweichungen in kleinerem Ausmass zu erwarten. Beispielsweise hätte das Leck bei der Testbetankung mit der 100µm-Blende und 60 bar Tankdruck gemäss Berechnungen erkannt werden sollen. Abgesehen von den kleinen Blendendurchmessern (< ca. 50 µm – wie weiter oben erwähnt) stimmen die Berechnungen ansonsten gut mit den Messresultaten überein.

Eine Tabelle mit detaillierteren Angaben zu den Testbetankungen sowie ein Diagramm mit den Aufzeichnungen des Drucks im Tankschlauch befinden sich im Anhang.

Es ist wichtig zu beachten, dass die gezeigten Resultate aus Berechnungen und Messungen spezifisch für die Wasserstoff-Tankstelle an der Empa gelten. Andere Tankstellen können unterschiedliche Totvolumina sowie abweichende Betriebseinstellungen in Bezug auf Wartezeiten und Druckabfalltoleranz aufweisen. Der Einfluss solcher Unterschiede wird nachfolgend anhand von Beispielen aufgezeigt, für welche der Druck im Fahrzeugtank auf 62 bar festgelegt wurde:

1. Referenz (schwarz) [Empa-Tankstelle]	Totvolumen = 22 l Wartezeit 2 = 8 s Druckabfalltoleranz = 5 bar	Leck wird erkannt ab: 90 µm (Tankdruck: 62 bar)
2. Verschlechterung (rot)	Doppeltes Totvolumen (44 l) <u>oder</u> halbe Wartezeit 2 (4 s) <u>oder</u> doppelte Druckabfalltol. (10 bar)	Leck wird erkannt ab: 130 µm (Tankdruck: 62 bar)
3. Verbesserung (grün)	Halbes Totvolumen (11 l) <u>oder</u> doppelte Wartezeit 2 (16 s) <u>oder</u> halbe Druckabfalltol. (2.5 bar)	Leck wird erkannt ab: 65 µm (Tankdruck: 62 bar)

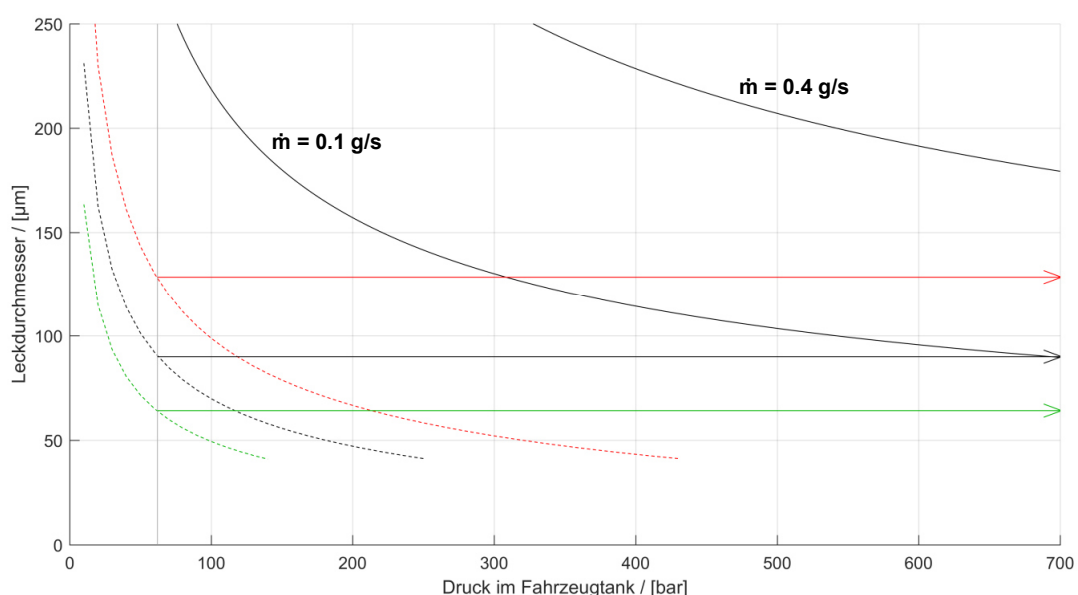


Abb. 10 Einfluss von Veränderungen im Aufbau und bei Parametereinstellungen von H₂-Tankstellen



Fazit und Ausblick

Die Lecktestversuche haben gezeigt, dass die Zapfsäulensteuerung ein vorhandenes Leck ab einem bestimmten Durchmesser und Tankdruck zuverlässig erkennt und die Betankung abbricht. Mit den durchgeführten Berechnungen und Messungen konnte eruiert werden, ab welchem Durchmesser bei gegebenem Tankdruck ein Leck erkannt wird und ob der über das Leck ausströmende Massenstrom zum Überschreiten der vorgegebenen Grenzwerte führt.

Der minimale Tankdruck bei aktuellen Brennstoffzellen-Fahrzeugen liegt bei 20 bar. Dieser Wert ist auch als untere Grenze in der Zapfsäulensteuerung hinterlegt, sodass Betankungen mit einem tieferen Startdruck im Fahrzeug nicht ausgeführt werden. Betrachtet man den Worst-Case in Bezug auf den Tankdruck ergeben sich somit folgende Werte:

Tankdruck bei Betankungsbeginn	20 bar
Leck wird erkannt ab	163 µm Durchmesser
Leck führt zu Leckmassenstrom von	0.33 g/s bei 700 bar

Die durchgeführten Berechnungen und Messungen zeigen somit, dass der erste Grenzwert von 0.1 g/s bei gegebenem Totvolumen und Einstellparametern nicht eingehalten werden kann. Der zweite Grenzwert von 0.4 g/s wird dagegen zu keinem Zeitpunkt der Betankung überschritten. Wäre ein Leck vorhanden, welches bei 700 bar zur Überschreitung des zweiten Grenzwerts führen würde (>179 µm), kann dieses Leck bereits beim minimalen Tankdruck von 20 bar erkannt werden.

Werden also die Tankstellenkonfiguration (Totvolumen, Einstellparameter) der Empa und ein Grenzwert von 0.4 g/s herangezogen, bietet der Lecktest von Wasserstoff-Zapfsäulen nachweislich eine Basis für die Reduktion der gegenwärtig geltenden Ex-Zoneneinteilung an Wasserstoff-Tankstellen.

Eine finale Diskussion der vorgestellten Resultate mit der Suva ist noch ausstehend. Eine Sitzung zur Besprechung der Erkenntnisse des weiteren Vorgehens ist für Anfang 2019 vorgesehen. Ist eine Reduktion der Ex-Zoneneinteilung möglich, sollen die angepassten Regelungen in das im Arbeitspaket 3 A geplante Merkblatt integriert werden und damit auf nationaler Ebene Gültigkeit erlangen.

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

Nachfolgend werden die Ergebnisse der ersten Messungen im Feld unter realen Bedingungen an der Empa Wasserstofftankstelle mit dem Metas Hydrogen Field Test Standard (HFTS) vorgestellt. Nach einer kurzen Beschreibung des HFTS und des Versuchsaufbaus folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Die gewonnenen Erkenntnisse und notwendigen Verbesserungen dienen als Basis für weiterführende Messungen welche im Rahmen des MetroHyVe Projekt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** durchgeführt werden.

Beschreibung des HFTS

Der HFTS, wie in Abbildung 11 dargestellt, besteht aus zwei Hochdrucktanks, die auf einem Rahmen montiert sind und auf eine Waage abgesenkt werden können, um die betankte Wasserstoffmenge in den Tanks zu wiegen. Mehrere Ventile, Rohrleitungs-, Druck- und Temperatursensoren sowie ein Coriolis-Durchflussmesser (CFM) sind ebenfalls am Rahmen montiert.



Abb. 11 Metas HFTS

Ein detailliertes Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagramm (R&ID) des HFTS ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigt. Der Inhalt des blauen Kasten ist auf dem Rahmen montiert und kann auf der Waage zum Wiegen abgesenkt werden, das rot markierte Hydrauliksystem ermöglicht das Heben oder Senken des Rahmens. Um die Waage vor Luftbewegungen zu schützen, sind die Waage und Rahmen in einem ESD-Kunststoffrahmen untergebracht. Mehrere Düsen unterhalb des Rahmens ermöglichen es, das Gehäuse mit einem Inertgas zu fluten, um eine mögliche Eisbildung an den Rohren während des Füllvorgangs zu begrenzen, da der zugeführte Wasserstoff auf -40°C abgekühlt werden kann. Der Nutzen dieses Merkmals des HFTS muss noch untersucht werden. Der nach dem Wiegen in den Tanks gespeicherte Wasserstoff kann über eine Ablassleitung mit einem 4 m Mast in die Atmosphäre entlüftet werden.



P&ID METAS- Hydrogen Field Test Standard (HFTS)

METAS- Hydrogen Field Test Standard (HFTS)	
Title:	P&ID
Version:	1.0
Date:	06.05.2018
Author:	M. Tschannen (METAS)

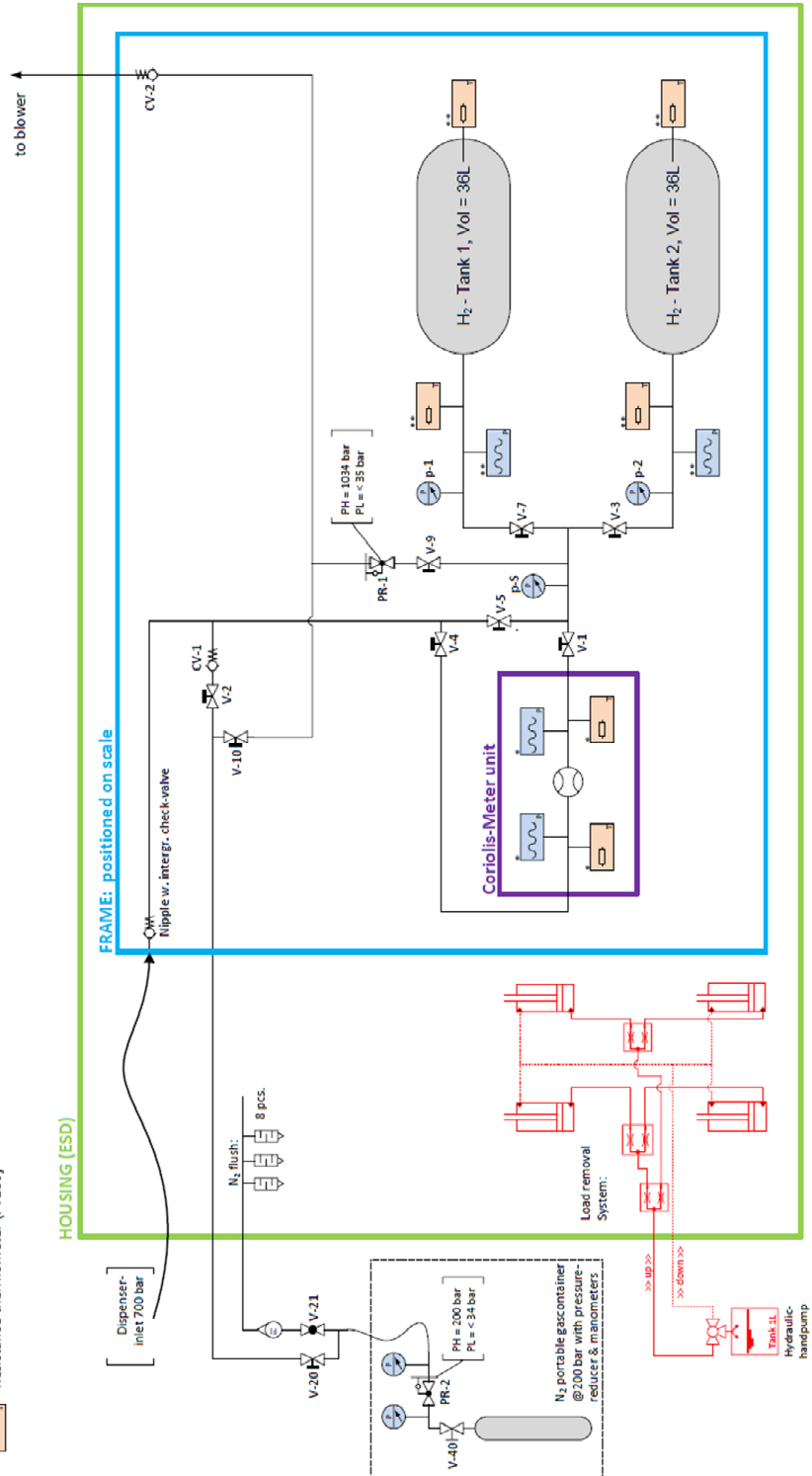
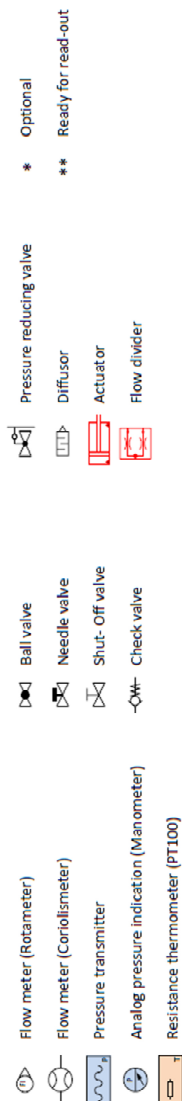


Abb. 12 R&ID des HFTS

Versuchsaufbau an der Empa Wasserstofftankstelle

Der HFTS wurde vor Ort an der Empa direkt neben der Wasserstofftankstelle platziert. Abbildung 13 zeigt die Ansichten des Aufbaus am ersten Tag der Messungen. Da das Gehäuse wie ein Gewächshaus wirkt, wurden um den HFTS herum Sonnenblenden installiert, um die direkte Sonneneinstrahlung zu begrenzen. Man sieht den Elektronikschrank, den Mast mit der Ablassleitung und das Stickstoffbündel, um das Gehäuse zu fluten und die Leitungen und Tanks vor und nach der Verwendung des HFTS zu spülen. Der Bereich ist durch Schilder und eine Sicherheitskette optisch gesichert.

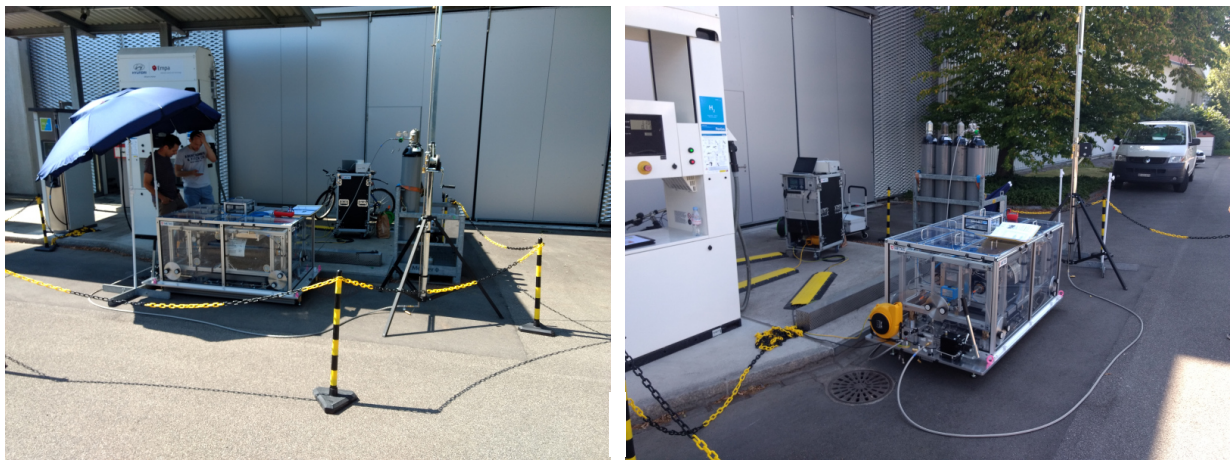


Abb. 13 Ansichten des Aufbaus am ersten Tag der Messungen

Am zweiten Tag fanden die Messungen am Morgen statt und die direkte Sonneneinstrahlung war anders. Die Sonnenblenden erwiesen sich als nicht ausreichend für eine gute Beschattung und ein kleines Zelt bot besseren Schutz, da es verhinderte, dass sich der Teer um den HFTS herum zu stark erwärmte. Der allgemeine Aufbau am zweiten Tag mit dem Zelt ist in Abbildung 14 gezeigt.



Abb. 14 Ansicht des Aufbaus am zweiten Tag der Messungen



Vorgehensweise

Die von der Wasserstofftankstelle abgegebene Masse wird gravimetrisch durch Wiegen des Rahmens vor und nach dem Befüllen der Tanks bestimmt.

Die Messdaten werden in ein Excel-Blatt zur Datenverarbeitung eingegeben. Eingespeicherte Werte sind Umgebungslufttemperatur und –druck, Lufttemperatur unter dem Gehäuse an verschiedenen Positionen um den Rahmen herum und Tankdruck im leeren und vollen Zustand. Festwerte sind das Volumen des Rahmens (71 L), das Aussenvolumen jedes Tanks (59.5 L) bei Umgebungsdruck und der Druckausdehnungskoeffizient ($1.3 \cdot 10^{-11}$ 1/Pa) für die Tanks.

Die abgegebene Wasserstoffmasse ergibt sich aus der Massendifferenz von gefüllten und leeren Tanks, korrigiert um den Luftauftrieb. Die Luftauftriebskorrektur berücksichtigt die Umrechnung von der konventionellen Masse zur realen Masse sowie die Änderung der Umgebungstemperatur um den Rahmen und die Volumenausdehnung des Tanks vor und nach dem Befüllen wie folgt:

$$m_{H_2} = (W_2 - W_1) \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_N}\right) + (V_{\text{tank},f} + V_{\text{frame}}) \cdot \rho_{\text{air},f} - (V_{\text{tank},e} + V_{\text{frame}}) \cdot \rho_{\text{air},e}$$

Wobei

$V_{\text{tank},e}$:	Volumen des leeren Tanks
$V_{\text{tank},f}$:	Volumen des gefüllten Tanks
V_{frame} :	Volumen des Rahmens
$\rho_{\text{air},s}$:	Dichte der Luft um den Tank herum, wenn der Tank leer ist
$\rho_{\text{air},f}$:	Dichte der Luft um den Tank herum, wenn der Tank gefüllt ist
ρ_N :	Dichte der Referenzgewichte (8000 kg/m ³)
ρ_0 :	Dichte der Referenzluft (1.2 kg/m ³)
W_1 :	Skalenwert in konventionelle Masse
W_2 :	Ablesung auf der Waage
m_{H_2} :	Masse des Wasserstoffs im Tank

Während des Füllvorgangs kann sich das Volumen des HFTS-Tanks durch die Auswirkung der Druckausdehnung ändern:

$$V_{\text{tank}} = V_{\text{tank},0} \cdot (1 + \lambda \cdot \Delta P)$$

wobei $V_{\text{tank},0}$ das HFTS-Tankvolumen bei Referenzumgebungsbedingungen (22°C und 960 hPa) ist, λ den Druckausdehnungskoeffizienten des Tanks und ΔP die Druckdifferenz zu den Referenzumgebungsbedingungen. Bei einem maximalen Druck von 875 bar beträgt die volumetrische Ausdehnung des Tanks 1.14 L und ist daher nicht vernachlässigbar. Die thermische Ausdehnung ist zehnmal kleiner und wird in dieser Analyse vernachlässigt. Bei allen Messungen in diesem Bericht haben wir das Gehäuse kontinuierlich mit Stickstoff geflutet.

Messungen

Es handelt sich bei diesen Messungen lediglich um erste Versuche, um sich mit dem System vertraut zu machen und mögliche Fehlerquellen zu eruieren. Insgesamt wurden zwei Messungen bei 700 bar durchgeführt. Die erste Betankung wurde bereits nach 30 s abgebrochen, weil die Temperatur des Wasserstoffs nach dem Wärmetauscher nicht kalt genug war.

Bei der zweiten Messung bei 700 bar wurde ebenfalls aufgrund einer zu hohen Wasserstofftemperatur abgebrochen. Es wurde beschlossen, die Betankung ohne Entleerung der Tanks des HFTS wieder aufzunehmen und aus der Gesamtmenge die Abweichung der Tankstelle gegenüber dem HFTS zu bestimmen. Abbildung 15 zeigen die Entwicklung von Druck, Temperatur und Massenstrom, wie sie durch die Tankstellen gemessen wurde. Die Unterbrechung ist deutlich sichtbar: Der Druck im Tankschlauch und der Massenstrom gehen auf null, bevor sie nach dem Wiederanlauf des Betankungsprozesses wieder ansteigen. Die vorgekühlte Wasserstofftemperatur gemessen in der Zapfsäule (gestrichelt blau) bleibt relativ stabil und liegt erwartungsgemäss nahe bei -40°C . Die Druckrampe (blau) ist konstant, während der Massenstrom (rot gestrichelt) einen starken Anstieg vor einem langsamen Abfall bei steigendem Druck im Tank zeigt.

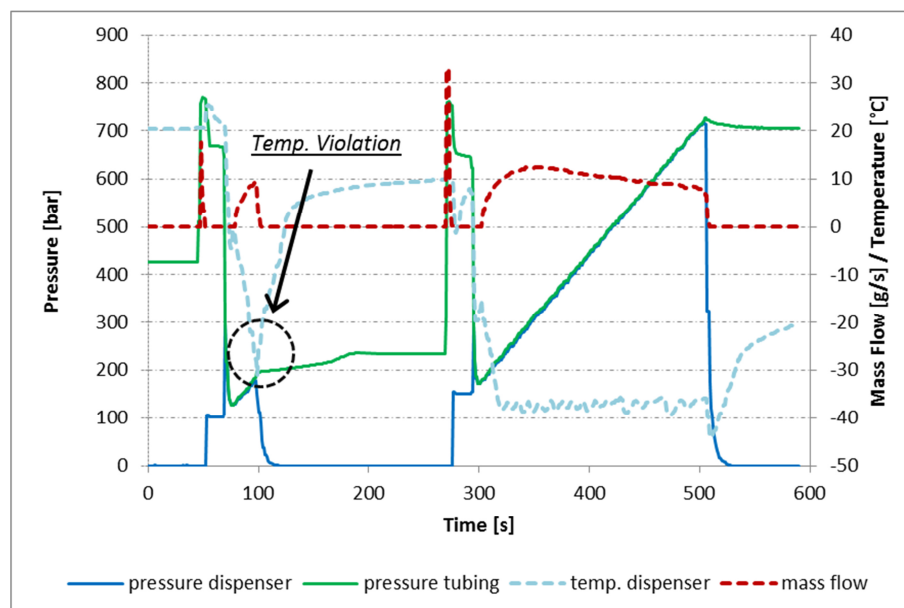


Abb. 15 Druck-, Temperatur- und Massenstromverlauf der zweiten 700 bar Messung, Druckrampe: 160 bar/min

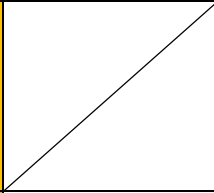
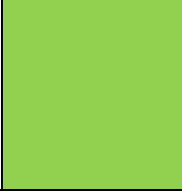
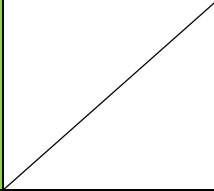
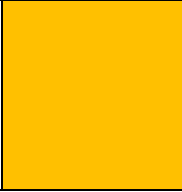
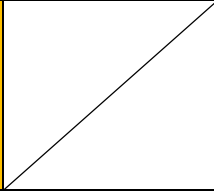
Tabelle 1 fasst die vom HFTS gemessenen Daten zusammen. Basierend auf der Betankungszeit und der gesammelten Wasserstoffmasse erhält man einen durchschnittlichen Durchfluss von 540 g/min. Beim Betanken konnte eine Eisbildung an den verschiedenen Rohren und am Anschluss der HFTS beobachtet werden, obwohl das Gehäuse ständig mit Stickstoff geflutet wurde. Dies beeinflusste die Messung und wird beim Wägen als zusätzliche Unsicherheitskomponente betrachtet. Wir haben beobachtet, dass das Eis ziemlich schnell schmilzt (mehrere Minuten). Der von der Waage angezeigte Wert hat sich nach dem Tanken nicht stabilisiert, was darauf hindeutet, dass einige thermische Effekte (Eisverlust oder Temperaturstabilisierung) die Waage noch beeinflussten.



Umgebungstemperatur		27.5°C
Tankdruck	Initial (1. Bet., 2. Bet.)	100 bar, 150 bar
	Final (1. Bet., 2. Bet.)	180 bar, 710 bar
Betankungszeit	1. Bet.+ 2. Bet.	30 s + 212 s
HFTS H₂-Menge		2168.5 g
Abweichung	Metas CFM	0.6%
	Empa Tankstelle	-1.2%

Tab. 1 Messergebnisse für die zweite 700 bar Messung mit einer Druckrampe von 160 bar/min

Die Messabweichung des Metas CFM gegenüber dem HFTS beträgt 0.6% und ist damit in besserer Übereinstimmung als der gemessene Wert der Tankstelle. Es ist jedoch zu beachten, dass bei dieser Messung nebst einem möglichen Messfehler weitere tankstellenseitige Unsicherheitsquellen eine Rolle spielen, wie in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

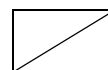
Tankstellenseitige Unsicherheitsquellen	Empa CFM	Metas HFTS
Ausgangsdruck der Leitungen Der CFM der Tankstelle misst eine grössere Menge als tatsächlich abgegeben, falls der Leitungsdruck nach einer Betankung grösser als davor ist. Falls er kleiner ist als vor der Bet., wird eine zu kleine Menge gemessen (siehe Abb. 16: in orange markiert)	 	
Dichtheitsprüfung Der CFM der Tankstelle misst den bei der Dichtheitsprüfung abgegebene Wasserstoff nicht mit.		
Entlüftung des Totvolumens und Betankungsschlauch Die gemessene Wasserstoffmenge des CFM der Tankstelle enthält das Totvolumen, das am Ende einer Betankung entlüftet wird. (siehe Abb. 16: in rot markiert)		



unterschätzt



überschätzt



Kein Einfluss

Tab. 2 Tankstellenseitige Unsicherheitsquellen

Abbildung 16 zeigt schematisch, was normalerweise in einer Wasserstofftankstelle entlüftet wird. Basierend auf Berechnungen des Totvolumens kann in unserem Fall die Totvolumenmasse auf ca. 10 g geschätzt werden. Bei einer Betankten Wasserstoffmenge von 1 bis 5 kg kann demnach die Totvolumenmasse bis zu 1% der Kraftstoffmenge betragen.

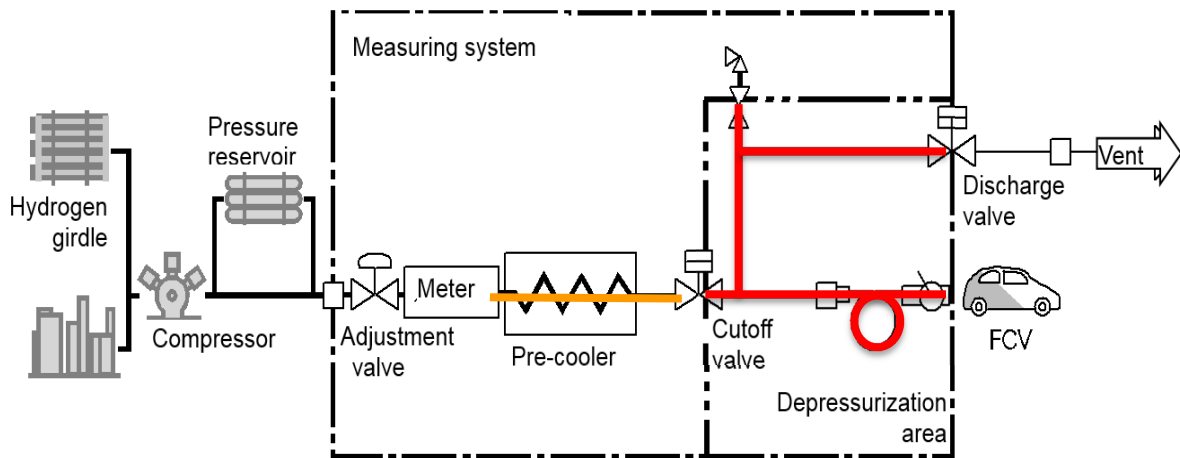


Abb. 16 Druckentlastung bei einer Wasserstoff-Tankstelle (Quelle: [1] - Bild wurde ergänzt)

Grundsätzlich ist wichtig festzuhalten, dass Eichmessungen bei Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas/Biogas deutlich anspruchsvoller sind. Neben den Unterschieden in Bezug auf Temperatur- und Druckbereiche, besteht die Herausforderung insbesondere darin, dass die betankte Masse im Fall von Wasserstoff nahezu eine Grössenordnung tiefer liegt. Folglich fallen tankstellenseitige Unsicherheitsquellen (siehe Tabelle 2) sowie auch dem HFTS zugeordnete Unsicherheiten viel deutlicher ins Gewicht. Wie weiter oben erläutert können die Messungen beispielsweise durch Wind, Eisbildung an Leitungen und Veränderungen des Auftriebs der Tanks (aufgrund der Druckausdehnung) signifikant beeinflusst werden. Dies führt zu einer deutlich komplexeren Eichvorrichtung.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die in Tabelle 1 gezeigten Messergebnisse zwar eine gute Übereinstimmung zwischen Waage und den beiden Massenstromsensoren zeigen, es sich dabei aber erst um eine einzelne Messung handelt. Untersuchungen anderer europäischer Metrologie-Institute haben gezeigt, dass die Wiederholung von Messungen zu stark abweichenden Ergebnissen führen kann. Dementsprechend sind weitere Messungen nötig, um aussagekräftige Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Massenstrommessungen zu ziehen.

Gewonnene Erkenntnisse

Aus der Messkampagne können wir folgende Erkenntnisse ziehen, die als Basis für weiterführende Messungen im Rahmen des MetroHyVe Projekt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dienen sollen:

- Obwohl das Gehäuse mit Stickstoff geflutet wurde, beobachteten wir eine Eisbildung an den Rohren des HFTS. Das bedeutet, dass noch Feuchtigkeit vorhanden ist und die Messungen beeinflusst werden.
- Bei 700 bar schwankt der von der Waage angezeigte Wert nach dem Tanken um mehrere Gramm. Was darauf hindeutet, dass thermische Effekte (Eisverlust oder Temperaturstabilisierung) die Waage beeinflussen.
- Ein Vergleich der gemessenen Werte des HFTS gegenüber der Tankstelle setzt ein genaues Verständnis sämtlicher Unsicherheitsquellen voraus (u.a. Tabelle 2)



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

Die Aufzeichnungen zum Anlagenbetrieb wurden im Jahr 2018 fortgeführt. Bisher erfolgte die Datenerfassung über einen USB-Stick an der übergeordneten SPS-Steuerung und für Detailaufzeichnungen der Anlagenkomponenten von Linde über die zugehörige Steuerungssoftware. Seit Ende des zweiten Quartals 2018 werden nun alle durch die übergeordnete SPS erfassten Daten auf einer SQL-Datenbank gespeichert. Das Auslesen per USB-Stick entfällt somit. Die Messdaten werden nicht mehr nur periodisch sondern dauerhaft in einem Zeitintervall von einer Minute aufgezeichnet.

Dieselbe Datenbank wird auch für die Demonstrationsanlage «NEST» verwendet, sodass die aufgezeichneten Daten beider Demonstrationsanlagen der Empa in einheitlicher Weise abgerufen werden können. Messdaten welche über eine bestimmte Zeitperiode in höherer Auflösung erfasst werden sollen, werden über entsprechende Trigger gesteuert. Beispielsweise werden Druck-, Temperatur- und Massestrommessungen während einer Betankung mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Als Trigger wird das Betriebssignal der entsprechenden Zapfsäule verwendet.

Die Liste der aufgezeichneten Signale wurde im 2018 erweitert. Beispielsweise werden neu die Stellung des Bypass-Ventils in der Zapfsäule und des Rampenreglers erfasst. Das Bypass-Ventil erlaubt die Zudosierung von nicht vorgekühltem Wasserstoff bei der 70MPa-Betankung und vermindert damit den Energieverbrauch des Vorkühlsystems. Der Rampenregler ist ein nachdruckgesteuertes Membran-Regelventil, welches den Druckanstieg im Fahrzeugtank während der Betankung steuert.

Messungen zum Energieverbrauch entlang des Pfades von Wasserstoffproduktion bis Fahrzeugrad (well-to-wheel) wurden im Rahmen des AP4 und AP5 im Jahr 2017 durchgeführt und sind im entsprechenden Jahresbericht festgehalten. Die energetischen Untersuchungen zur Anlage wurden damit abgeschlossen.

1.5. AP5: Betrieb und Monitoring der Brennstoffzellen Fahrzeuge

Neben den abgeschlossenen Untersuchungen zur Energiebilanz beinhaltet das Arbeitspaket 5 die Durchführung einer Umfrage zum Nutzerverhalten von Brennstoffzellen-Fahrzeugbetreibern. Die Umfrage wurde im 2018 unter Verwendung des Online-Umfragetools von umfrageonline.com erstellt. Der Link zur Teilnahme an der Befragung wurde an Hyundai Schweiz und Toyota AG zur Weiterleitung an die Nutzer verschickt. Die Fahrzeugbetreiber werden unter anderem zu folgenden Themen befragt:

- Kaufentscheid
- Einsatzzweck des Fzgs
- Jährliche Laufleistung & geschätzter Verbrauch
- Alltagstauglichkeit & generelle Zufriedenheit mit dem BZ-Fzg

Weitere Details zur Umfrage und die Auswertung der Rückmeldungen werden in den Schlussbericht des Projektes einfließen.

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 H ₂ -Tankstellen
Hyundai	Erfahrungsaustausch bezüglich Nutzung von BZ-Fahrzeugen und Tankstellen

Zusammenarbeit mit Projektpartnern (ohne finanzielle Beteiligung)

Metas	Erfahrungsaustausch bezüglich Eichmessungen von H ₂ -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 „H ₂ -Reinheit“ von H ₂ -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 (Erf-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 Empa übernimmt eine Beratungsfunktion im Projekt „CombiFuel“ (Projektleitung Graforce), 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 [3]).

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.

Hydrogen Europe

Die Empa ist Mitglied bei Hydrogen Europe. Im Rahmen von Sitzungen von Hydrogen Europe Research findet ein Informationsaustausch auf europäischer Ebene statt.

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 2018 und Ausblick 2019

Während die Projektaktivitäten der Arbeitspakete 1, 2, 4 und 5 grösstenteils abgeschlossen sind, lag der Fokus im 2018 auf dem dritten Arbeitspaket. In Bezug auf den Leitfaden ist das geplante Vorhaben mit der Kontaktaufnahme zu allen relevanten Behörden und Institutionen erfolgreich abgestützt worden und findet breite Zustimmung. Ein erster Entwurf wurde erarbeitet und zur Vernehmlassung versandt. Im ersten Halbjahr 2019 soll in Zusammenarbeit aller Mitwirkenden eine finale Version des Leitfadens ausgearbeitet werden. Mit der Erstellung des Entwurfs für ein Merkblatt soll im ersten Quartal 2019 begonnen werden.

Im Rahmen des Teilarbeitspaketes B konnten die Berechnungen, Messungen und Auswertungen zu den Lecktestversuchen im 2018 abgeschlossen werden. Damit wurde eine fundierte Ausgangslage für die Entscheidung zur Re-Definition der Ex-Zoneneinteilung geschaffen. Die Diskussion der Auswertungen mit der Suva ist noch ausstehend und für Anfang 2019 vorgesehen.

In Teilarbeitspaket C konnte Metas den Aufbau der mobilen Eichvorrichtung «Hydrogen Field Test Standard - HFTS» im 2018 fertigstellen. Die Vorrichtung wurde an der Wasserstofftankstelle der Empa in Betrieb genommen und es wurden erste Messungen durchgeführt. Die Auswertungen der Messungen lieferten wertvolle Erkenntnisse, welche als Grundlage für die weiterführenden Arbeiten im Rahmen des EU-Projektes «MetroHyVe» dienen. Mit den Messungen an der Empa konnten somit die ersten Schritte zur Entwicklung eines Eichverfahrens eingeleitet werden.

Zur Untersuchung des Nutzerverhaltens von Brennstoffzellen-Fahrzeugbetreibern wurde im Rahmen des Arbeitspaketes 5 eine Umfrage erstellt. Die Umfrage wurde an Hyundai Schweiz und Toyota AG zur Weiterleitung an die Nutzer verschickt. Im 2019 erfolgt die Auswertung der Umfrage.

Das Projekt ist insgesamt auf gutem Weg und ein Grossteil der Projektaktivitäten konnte bereits erfolgreich abgeschlossen werden. Im 2019 stehen die Fertigstellung des Leitfadens und die Erarbeitung des Merkblatts mit der Integration der potentiell angepassten Ex-Zonenregelung im Vordergrund.



Referenzen

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



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BZ	Brennstoffzelle
CFM	Coriolis Flow Meter (Coriolis Massendurchfluss Messgerät)
Ex-Zone	Explosionsschutz-Zone
Fzg	Fahrzeug
H ₂	Wasserstoff
HFTS	Hydrogen Field Test Standard (Wasserstoff-Eichvorrichtung)
LkW	Lastkraftwagen
Metas	Metrologisches Institut der Schweiz
PRR	Pressure Ramp Rate (Druckrampe bei der Betankung)
R&ID	Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagramm
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language (Datenbanksprache)



Anhang

Diagramme und Tabellen zu den Lecktestversuchen (AP3B):

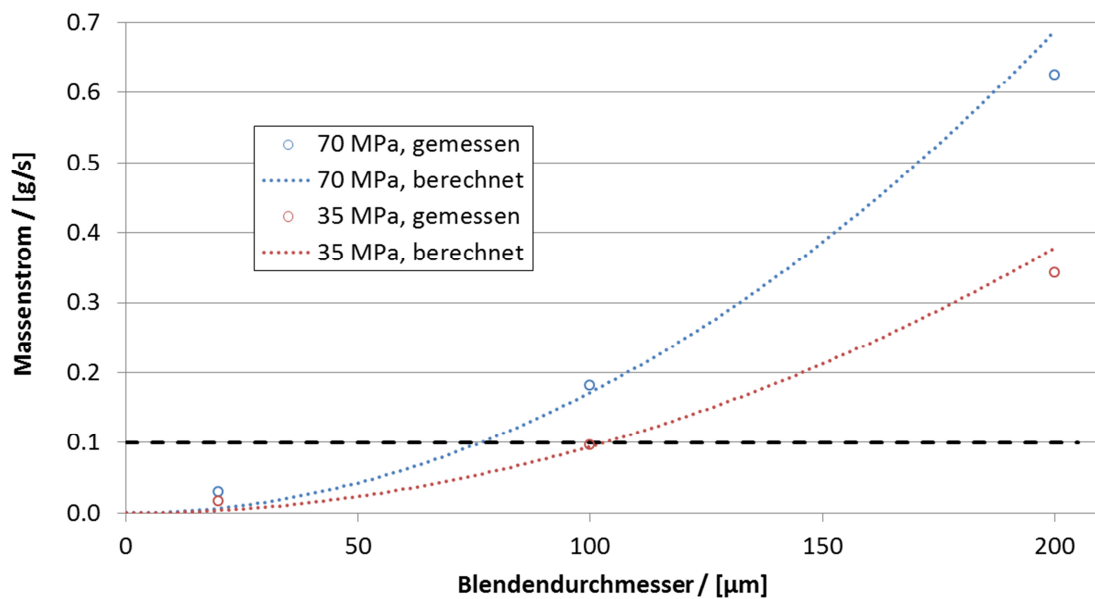


Abb. 17 Vergleich von gemessenem und berechneten Massenstrom über die Blenden 20μm, 100μm und 200μm

Startdruck im Fzg-tank Leckdurch- messer / [μm]		[bar]							
		20	60	100	150	200	250	300	350
20	Durchführungs-Nr.	1	7			21	22	24	26
	Starttemp. [°C]	14.5	17.5			23	23	24.5	25
	Leck erkannt	NEIN	NEIN			NEIN	NEIN	JA	JA
40	Durchführungs-Nr.	2	8						
	Starttemp. [°C]	14	17	Nach Versuch 15 wurde festgestellt, dass bei der 40μm-Blende kein H ₂ mehr					
	Leck erkannt	NEIN	NEIN						
60	Durchführungs-Nr.	6	9	15	18	20			
	Starttemp. [°C]	14.5	15.5	19	22				
	Leck erkannt	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA			
100	Durchführungs-Nr.	4	10	14	17				
	Starttemp. [°C]	15.5	15.5	19	23				
	Leck erkannt	NEIN	NEIN	JA	JA				
200	Durchführungs-Nr.	5	11	13					
	Starttemp. [°C]	14.5	16.5	19					
	Leck erkannt	JA	JA	JA					

Tab. 3 Ergebnisse der Lecktestversuche

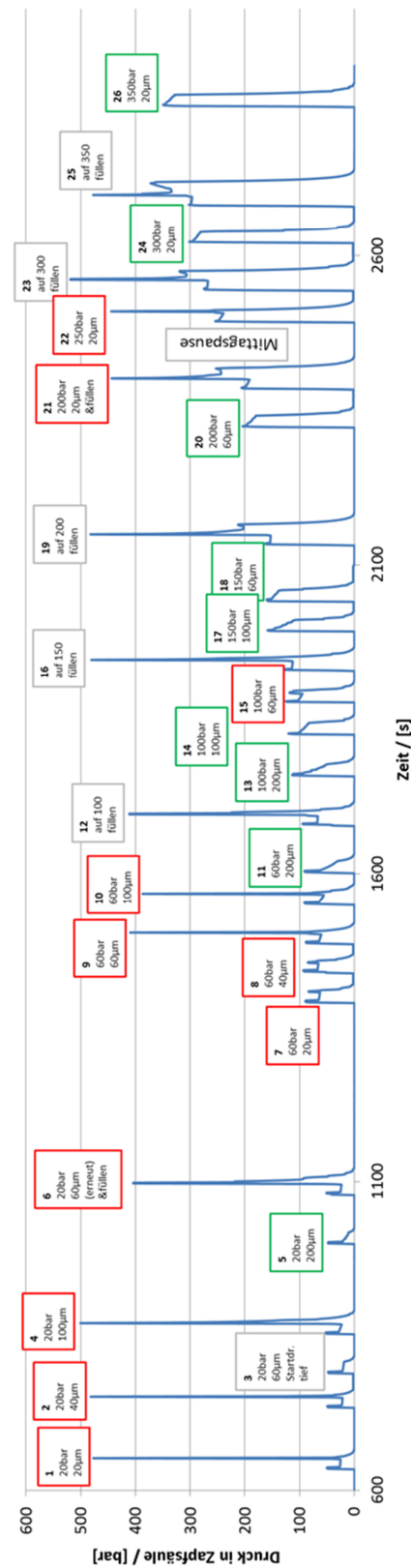


Abb. 18 Gemessener Druck im Tankschlauch während den Lecktestversuchen